

**SILVESTRE DA SILVA NETO**



**PROTÓTIPO DE DISPOSITIVO PARA CALIBRAÇÃO DE  
GRAVÍMETROS – MODULAR (PDCG-M)**

Dissertação de Mestrado apresentada ao  
Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia de São Paulo para obtenção do  
título de Mestre em Engenharia Mecânica.

**São Paulo**

**2018**

**SILVESTRE DA SILVA NETO**

**PROTÓTIPO DE DISPOSITIVO PARA CALIBRAÇÃO DE  
GRAVÍMETROS – MODULAR (PDCG-M)**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração:  
Engenharia Mecânica - Materiais e Processos de Fabricação

Orientador:  
Prof. Dr. Carlos Frajuca

Coorientador:  
Prof. Dr. Davinson Mariano da Silva

**São Paulo**

**2018**

**Catálogo na fonte**  
**Biblioteca Francisco Montojos - IFSP Campus São Paulo**  
**Dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

S586p	<p>Silva Neto, Silvestre da Protótipo de dispositivo para calibração de gravímetros - modular (PDCG-M) / Silvestre da Silva Neto. São Paulo: [s.n.], 2018. 207 f. il.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Carlos Frajuca Co-orientador: Prof. Dr. Davinson Mariano da Silva</p> <p>Dissertação (Mestrado Acadêmico em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, IFSP, 2018.</p> <p>1. Análise vibracional e balanceamento. 2. Calibração de gravímetros. 3. Detectores de ondas gravitacionais. 4. Mancal Magnético por levitação. 5. Rotores para máquinas de alta velocidade. I. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo II. Título.</p> <p>CDD 620.1</p>
-------	--

Ficha catalográfica elaborada por  
Alex Silva Rodrigues  
CRB 8/8966  
IFSP – Campus São Paulo

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SÃO PAULO

**MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

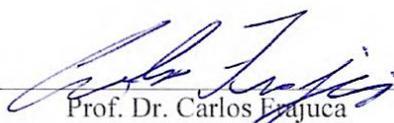
“PROTÓTIPO DE DISPOSITIVO PARA CALIBRAÇÃO DE  
GRAVÍMETRO – MODULAR (PDCG-M)”

Autor: Silvestre da Silva Neto

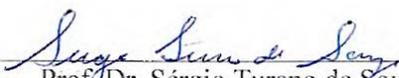
Orientador: Prof. Dr. Carlos Frajuca

Coorientador: Prof. Dr. Davinson Mariano da Silva

A banca examinadora composta pelos membros abaixo aprovou essa dissertação:

  
Prof. Dr. Carlos Frajuca  
IFSP – SPO

  
Prof. Dr. Givanildo Alves dos Santos  
IFSP – SPO

  
Prof. Dr. Sérgio Turano de Souza  
FATEC - SP

São Paulo, 23 de junho de 2018

## DEDICATÓRIA

À minha mãe, Margarida Silva por me conceder o dom da vida.

Às minhas mães do coração: Shizuko Ávila (ancestra) e Maria Querino (Mainha).

Ao meu pai, Benedito Silvestre (ancestro), um exemplo de vida, um homem com uma mente e sonho especiais.

Ao meu pai do coração: Gabriel Araújo (Painho, ancestral).

Às minhas irmãs: Maria Aparecida (ancestra), Maria Bernadete e Iracema Silva.

Aos Meus Irmãos: Raimundo Silva e Sílvio Silva.

À minha amada Esposa: Sônia Querino pelo amor, compreensão, empenho e luta conjunta.

Aos meus filhos amados, Yhasmin Silva e Janderson Gabriel, pelo amor incondicional, e que esta minha luta como discente do mestrado e pai, sirva como incentivo para moldá-los no valor dos estudos e aprendizado para o futuro e que também possam se alimentar do néctar de meus sonhos.

À minhas sobrinhas: Amanda, Jade, Laís e Maria Luiza (do coração)

Aos meus sobrinhos: Adriano, Alessandro, Anderson, Artur, Augusto, Danillo, Diego, Evandro, Fabrício (do coração), Iago, Jean (do coração), Márcio, Marcos Jr., Milton Jr. E Rhailan (do coração).

Às “sementes” do futuro da família: Ayla, Bernardo, Benício Dante, Evelyn, Gabriel, Larissa, Lorenzo, Matheus, Victória e Vinícius e Benício, que chegou recentemente para esta família

E à “semente pequenina” Bryan que está por vir para esta família

À minha madrinha, Irmã Lindaura de Araújo, pelo amor, religiosidade, benevolência, grande incentivo e carinho para com minha família.

## AGRADECIMENTOS

À Lei que rege o Universo, da causa e efeito, com a qual me conecto por meio de minha fé e orações, transformando meu carma, e assim como o imã pode atrair energias positivas, para superar e transpor obstáculos no decorrer deste labor.

Meus efusivos e sinceros agradecimentos àqueles que contribuíram para tornar possível a concretização e conquista deste trabalho:

Ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Frajuca pela oportunidade, pelo suporte e imprescindíveis orientações, conhecimentos e experiência partilhados, confiança, amizade, dedicação e paciência ao longo deste trabalho, que resultou na construção deste Protótipo de Calibração de Gravímetros (PDCG).

Ao Coorientador deste trabalho, Prof. Dr. Davinson Mariano da Silva (FATEC/SP), pela amizade, disponibilidade, partilha de conhecimentos e importante no apoio da elaboração do circuito eletrônico e programação para acionamento do motor do PDCG.

Ao Prof. Dr. Givanildo Alves dos Santos, Coord. do programa da Pós-graduação *Stricto Sensu* em Mestrado em Engenharia Mecânica por ter aceitado compor as bancas de qualificação e defesa e importantes contribuições para o resultado final deste labor.

Ao Prof. Dr. Sergio Turano de Souza (FATEC-Itaquera/ UNICSUL) por ter aceitado compor a banca de defesa, pelas importantes contribuições e efetuação de apontamentos para melhoria deste labor.

Ao Prof. Dr. Fábio da Silva Bortoli por ter aceitado compor a banca de qualificação e efetuação de apontamentos e contribuições para melhoria deste trabalho.

Ao Prof. e amigo do Mestrado, Eduardo Sanchez pelo companheirismo e importante ajuda na aquisição de materiais e equipamentos que possibilitou a construção do PDCG.

À minha esposa, Prof.<sup>a</sup> Me. Sônia Querino, pelo suporte e conhecimento em letras vernáculas, imprescindíveis no apoio e revisão textual deste estudo, agregando valiosas sugestões que contribuíram para melhoria e qualidade dessa dissertação de mestrado.

Ao Núcleo dos Cientistas do DEPAC da BSGI, grupo que me orgulho de fazer parte, pelos incentivos, ideal de paz por intermédio da ciência e partilha desta importante conquista.

Ao Professor do SENAI Mariano Ferraz e amigo do Mestrado, Ricardo Palma pelo companheirismo e preciosa ajuda na usinagem não convencional por eletroerosão a fio e penetração para confecção do rotor experimental que contribuiu para Construção do PDCG.

Aos professores e amigos do IFSP, Kauê Mello, Fabio Miranda, Wilson Ruiz, Paulo Fernandes e Henrique Linares pelo apoio, colaboração e realização de trabalhos anteriores, nesta mesma linha de pesquisa.

A todos os docentes, colegas e amigos discentes e funcionários ligados ao programa de Mestrado, que de forma direta ou indireta contribuíram para tornar possível a realização e conquista deste mestrado.

Ao IFSP instituição que como discente tive a oportunidade de cursar a Licenciatura em Física e a Pós-graduação *Stricto Sensu* em Mestrado em Engenharia Mecânica e como docente atuar nos departamentos de mecânica e automação.

Ao amigo e Prof. Eng.º. Sérgio Senra, Coord. do Laboratório de Construção de Mecânica de Precisão (LCMP I), pelo auxílio na área de análise vibracional e balanceamento, Termografia e disponibilização do LCMP I/FATEC-SP.

À Prof.<sup>a</sup> Me. Maria da Graça Marcatto, Chefe do Depto. de Mecânica, pela disponibilização do uso dos laboratórios e equipamentos do departamento, importantes recursos para elaboração deste trabalho.

Ao Prof. Me. Douglas Fellipe Therezani, Chefe do Depto. de Mecânica de Precisão, pela colaboração e disponibilização do uso dos laboratórios e equipamentos do Laboratório de Construção em Mecânica de Precisão (LCMP I).

Ao Prof. Armando Shimahara pela importante ajuda na disponibilização de material polimérico e fios para usinagem de eletroerosão.

Ao Prof. Dr. Carlos Rezende de Menezes da FATEC – SP, pela importante ajuda na disponibilização dos tubos de alumínio extrudado (liga 6061), essencial para construção do PDCG.

Prof. Dr. Milton Silva da Rocha e Milene Conceição do Departamento de Tecnologia da Informação e Laboratório de Informática (LabInfo) pelo minicurso de programação no Arduíno e apoio nos testes do motor de passo.

Ao amigo Renato Rosa, do Laboratório de Construção Mecânica (LCM), da FATEC – SP, pelo imprescindível apoio na modelação do PDCG em 3D .

Aos amigos do Laboratório de Tratamento Térmico e Seleção de Materiais (LTTSM)/FATEC-SP, Caio Rodrigues e Edson Barbosa pelo importante apoio na caracterização de materiais utilizados no PDCG.

Aos amigos do Laboratório de Processamento e Caracterização de Materiais (LPCM)/FATEC-SP, Abrão Merij e Silvano Leal, pela colaboração nas análises de trabalhos de colegas e amigos discentes do Mestrado em Engenharia Mecânica do IFSP

Ao amigo Elias Santos Junior do Laboratório de Metrologia (LM)/FATEC-SP, pela colaboração na efetuação das medidas das coordenadas das furações do Motor (com Máquina de Medição de Três Eixos/Mitutoyo<sup>®</sup>), usado no acionamento do PDCG.

Aos professores e amigos do Laboratório de Usinagem, Marcos Nascimento, Damião Fiuza, Diego Penalver, Felipe Toloszko, Ítalo Almeida, José Wagner Garcia, Kleberon Cartolari, Marco Augusto pelos apoios, incentivos, colaboração técnica e disponibilização de ferramental, importantes para realização desse trabalho.

Ao amigo Israel Ribeiro, do Laboratório de Eletrônica da Mecânica de Precisão (LEMP) - FATEC – SP, pelo apoio no teste com o motor de passo modificado.

Aos amigos Danilo Cesar Pedro, Domênico Cainelli e Tiago Moura do Laboratório de Eletricidade Aplicada (LabEletro) da FATEC – SP pelo apoio e disponibilização do tacômetro foto/ contato digital, instrumento importante para medição da velocidade do PDCG-M.

À Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC – SP) que como discente tive a oportunidade de cursar a Tecnologia em Mecânica – Processos de Produção e como Auxiliar - Docente atuar nos Laboratórios dos Departamentos de Mecânica e Mecânica de Precisão, e pela disponibilização dos laboratórios e equipamentos, possibilitando a usinagem para construção do Protótipo de Calibração de Gravímetros (PDCG).

A empresa Arnes Preditiva & Treinamentos por disponibilizar os equipamentos de termografia e de análise vibracional e balanceamento de campo.

À minha esposa, Sônia Querino e filhos, Yhasmin Silva e Janderson Gabriel, pelo apoio, compreensão pelas horas que precisei me ausentar para empenhar-me neste trabalho e amor incondicional, energias propulsoras essenciais para esta conquista.

À minha madrinha, Irmã Lindaura de Araújo, pelo gesto nobre de ofertar, na ocasião da qualificação deste trabalho, seus doces finos e verdadeiras obras de arte.

À equipe do SEDES Sapientiae, doutoras Márcia Porto, Camélia Araújo, Cristina Bueno, Elisa Amaral e Elisa Mesquita, pelos importantes apoios a minha família

*“Sonhe, ainda que o sonho pareça impossível.  
Lute, ainda que o inimigo pareça invencível.  
Suporte a dor, ainda que pareça insuportável.  
Percorra por onde os bravos não ousam percorrer.  
Transforme o mal em bem, ainda que seja  
necessário percorrer mil milhas.  
Ame o puro e inocente, ainda que seja inexistente.  
Resista, ainda que o corpo não resista.  
E, no final alcançará aquela estrela, ainda que  
pareça inalcançável.”*

*Adaptação do poema de DAISAKU IKEDA,  
adaptado de MIGUEL de CERVANTES*

*“a competência em pesquisa científica está  
estritamente relacionada ao grau de experiência que  
o pesquisador vai adquirindo à medida que  
consegue finalizar os seus estudos para refletir  
sobre suas dificuldades”*

BARROS e LEHFELD

## RESUMO

O anúncio científico e êxito tecnológico da detecção das ondas gravitacionais (OG), confirmando a Teoria da Relatividade Geral (TRG), proposta por Albert Einstein, reforçou a perspectiva de cientistas e astrônomos em todo o mundo, pelo aperfeiçoamento dos detectores de OG e busca por detecções similares, e que possam contribuir com o esclarecimento da ação da energia escura, aceleração do ritmo de expansão do Universo e certamente novas descobertas. As duas principais técnicas de detecção de ondas gravitacionais são por interferometria a laser e por antena ressonante massiva, esta última teoricamente mais eficiente, pois possui a propriedade de ser multidirecional, ou seja, em qualquer direção que as ondas gravitacionais se propaguem, a antena é igualmente sensível. Dentre outros países, possuímos uma proposta brasileira, o detector de OG Mário Schenberg, que se encontra no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). O presente trabalho objetiva a proposição do desenvolvimento de um Protótipo de Dispositivo para Calibração de Gravímetros - Modular (PDCG-M), em escala reduzida, utilizando técnicas preditivas de análise vibracional e balanceamento dinâmico e termografia, uso de mancais por levitação LENZ e mancais magnéticos, em substituição aos rolamentos convencionais, que possibilite a modulação dos componentes e que seja capaz de girar a rotações próximas a 10.000 RPM (167 Hz), e com a evolução dos experimentos, possa girar a 96.000 RPM (1600 Hz) e produzir sinais gravitacionais em escala laboratorial conhecidos, e seja testado em câmara de vácuo, possibilitando a medição da velocidade de interação gravitacional por massa ressonante, possibilitando a calibração do sistema vibracional do detector Mário Schenberg e similares ao redor do mundo. Foram construídos um dispositivo de simulação de campo (DSC) e um protótipo físico modular reduzido (PDCG-M) mais estável, comprovou-se a eficiência das técnicas preditivas utilizadas como apoio, e o PDCG-M atingiu velocidade de 8112 RPM, alcançando o objetivo inicial da proposta do projeto.

**Palavras chaves:** Análise Vibracional e Balanceamento, Calibração de Gravímetros, Detectores de ondas gravitacionais, Mancal magnético por levitação, Rotores para máquinas de alta velocidade.

## ABSTRACT

The scientific announcement and technological success of the detection of gravitational waves (OG), confirming the theory of general relativity (TRG), proposed by Albert Einstein, reinforced the prospect of scientists and astronomers around the world, by the improvement of OG detectors and search for similar detections, and that can contribute to the clarification of the action of dark energy, acceleration of the pace of expansion of the universe and certainly new discoveries. The two main techniques of detection of gravitational waves are by laser interferometry and by massive resonance antenna, the latter theoretically more efficient, because it possesses the property of being multidirectional, that is, in any direction that the waves Gravitational propagate, the antenna is equally sensitive. Among other countries, we have a Brazilian proposal, the OG detector Mario Schenberg, which is at the National Institute of Spatial Research (INPE). The present work aims to proposition the development of a prototype of gravity-modular calibration device (PDCG-M), on a reduced scale, using predictive techniques of vibrational analysis and dynamic balancing and thermography, Use of bearings by LENZ levitation and magnetic bearings, in lieu of conventional bearings, which enables the modulation of the components and that is capable of rotating the rotations close to 10,000 RPM (167 Hz), and with the evolution of the experiments, can rotate the 96,000 RPM (1600 Hz) and produce gravitational signals on known laboratory scales, and be tested in vacuum chamber, enabling the measurement of the velocity of gravitational interaction by resonant mass, enabling the calibration of the system Vibration detector Mario Schenberg and similar around the world. A field simulation device (DSC) and a reduced modular physical prototype (PDCG-M) were constructed, the efficiency of the predictive techniques used as support was verified, and the PDCG-m reached speed of 8112 RPM, achieving the objective of the project proposal.

**Keywords:** Gravimeters calibration, Gravitational wave detectors, Magnetic bearing by levitation, Rotors for high speed machines, Vibrational and balancing analysis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Simulação de estrelas de nêutrons ou buracos negros prestes a coalescer .....	24
Figura 1.2: Principais detectores de Ondas Gravitacionais e sua localização geográfica .....	25
Figura 2.1: Representação de um sistema binário emissor de ondas gravitacionais .....	30
Figura 2.2: Forças gravitacionais em três pontos de um corpo extenso cujo centro de massa está a uma distância “ $r$ ” de outro corpo $F_1 < FCM < F_2$ . .....	31
Figura 2.3: Evento de ondas gravitacionais GW150914 observada pelo aLIGO Hanford (H1, painéis da coluna da esquerda) e Livingston (L1, detectores de painéis de coluna da direita). .....	36
Figura 2.4: Estimativa da amplitude de tensão da onda gravitacional GW150914, projetada no H1 (Parte superior – Figura 2.4) e largura completa das formas de banda da onda, sem a filtragem. Imagens de baixo-relevo mostrando <i>os modelos de relatividade numérica e aglutinação dos buracos negros</i> (Parte inferior – Figura 2.4). .....	37
Figura 2.5: Diagrama simplificado do detector Advanced LIGO (fora de escala) .....	38
Figura 2.6: Histogramas que mostram o resultado da pesquisa genérica (à esquerda) e a busca de coalescência binária (à direita, número de eventos de candidato (marcadores laranja) e o número médio de eventos de fundo (linhas pretas) na busca da classe onde quantificando quão incomum é GW150914 em comparação com outros "eventos" falsos decorrentes de flutuações de ruído. Esta pesquisa concluiu que um evento de ruído imitando GW150914 seria extremamente raro - menos do que uma ocorrência em cerca de 200.000 anos. ....	39
Figura 2.7: Localização da onda gravitacional, raios gama e sinais ópticos. O painel esquerdo mostra uma projeção ortográfica de 90% de regiões credíveis ao LIGO (190 graus <sup>2</sup> , luz verde), a localização inicial de LIGO-Virgo (31 graus <sup>2</sup> , verde escuro), triangulação IPN do intervalo de tempo entre Fermi e INTEGRAL (azul claro), e Fermi GBM (azul escuro). A inserção mostra a localização da aparente galáxia hospedeira NGC4993 na imagem de descoberta óptica Swope em 10, 9 horas após a fusão (superior direito) e a imagem DLT40 pré-descoberta de 20, 5 dias antes da fusão (direita inferior). A retícula marca a posição do transiente em ambas as imagens .....	41
Figura 2.8: Cronograma da descoberta de GW170817, GRB170817A, SSS17a/ AT 2017gfo e as observações de seguimento mostradas por mensageira e comprimento de onda em relação ao tempo “ $t_c$ ” do evento de onda gravitacional. Dois tipos de informações são mostrados para cada banda/ mensageira. Primeiro, os traços sombreados representam os tempos em que as informações foram relatadas em uma circular GCN. Os nomes dos instrumentos relevantes, instalações ou observações das equipes que foram coletadas no início da linha. Segundo, observações representativas em cada banda são mostradas como círculos sólidos com suas áreas aproximadamente dimensionadas pelo brilho; as linhas sólidas indicam quando a fonte foi detectável por pelo menos um telescópio. As indefinições de ampliação dão uma imagem das primeiras detecções na onda gravitacional, raios gama, óptica, raio-X e bandas de rádio. ....	42
Figura 2.9: Observatório do Ligo, em Hanford, Washington - EUA.....	44
Figura 2.10: Observatório do Ligo, em Livingston, Louisiana- EUA.....	44
Figura 2.11: Detector por antenas ressonantes massivas - Mário Schenberg.....	45
Figura 2.12: Modelo de cabeamento usando o melhor atenuador de cabo em massa (massa 5 está localizado na parte inferior da suspensão) e uma visão geral do suspensão com cabeamento .....	46
Figura 2.13: Arranjo experimental de Jaseja et al. Para a versão do experimento de Michelson-Morley usando lasers.....	47



Figura 2.49: Ilustração do princípio de funcionamento dos MRVs. ....	87
Figura 2.50: Desenho em corte transversal do motor <i>brushless</i> CC .....	88
Figura 2.51 Modelo do motor CC <i>brushless</i> .....	88
Figura 2.52: Diagrama representativo do projeto do MRV .....	89
Figura 2.53: Dimensões do projeto do rotor e do estator: (a) Vista Frontal; (b) Vista Superior .....	89
Figura 2.54: Usinagens convencionais e Não Convencionais (tradicionais).....	90
Figura 2.55:Esquema de um processo por eletroerosão a penetração.....	91
Figura 2.56: Esquema de um processo por eletroerosão a fio .....	92
Figura 3.1: Materiais de Engenharia - módulo de elasticidade versus massa específica .....	94
Figura 3.2: Tubo extrudado de alumínio 6061 da Alcoa para confecção dos suportes do PDCG.....	97
Figura 3.3: Desgaste observado no ímã do mancal MPS .....	98
Figura 3.4: Imagens obtidas no projetor de perfis: (a) Pivô antes do ensaio; (b) Pivô depois do ensaio. .....	99
Figura 3.5: Protótipo de Dispositivo para Calibração de Gravímetros –Modular (PDCG-M). ....	101
Figura 3.6: Motor Brushless usado no Projeto do PDCG-M.....	103
Figura 3.7: Diagrama Simplificado do Projeto do PDCG-M .....	103
Figura 3.8 : Montagem final do Projeto do PDCG-M.....	104
Figura 3.9: Placa do Arduino UNO (Montado pelo Discente do Mestrado Eduardo Sanchez no IFSP) .....	104
Figura 3.10: montagem parcial do circuito do projeto no Proteus® .....	105
Figura 3.11: imagem real do circuito no Protoboard .....	105
Figura 3.12: Bancada com Materiais no LCMP I e Simulador de Campo com Roda .....	106
Figura 3.13: Analisador Vibracional e Canhão Laser com Transdutor. ....	107
Figura 3.14: Roda montada no torno mecânico .....	108
Figura 3.15:Desenho esquemático da análise vibracional e balanceamento. ....	108
Figura 3.16: Esquema com etapas da análise vibracional e balanceamento.....	109
Figura 3.17: Sequência de imagens demonstrando o procedimento. ....	110
Figura 3.18: software ROZH MRS 3000® (ROHZ Measurement & Control Co., Ltda). ....	111
Figura 3.19: Blank de alumínio, novo motor e instrumentos para confecção do novo DSC.....	112
Figura 3.20: Algumas fases da reconstrução e montagem do novo DSC.....	112
Figura 3.21: Novo DSC para Análise Vibracional Dinâmica finalizado .....	113
Figura 3.22: Transferidor 360° fixado em base magnética.....	113
Figura 3.23: Procedimento Experimental do balanceamento dinâmico modificado.....	114
Figura 3.24: Verificação inicial do RPM para início do Procedimento Experimental.....	115
Figura 3.25: Medida a velocidade média global inicial ( $V_{m0}$ ).....	115
Figura 3.26: Arranjo Experimental com colocação da massa de vidro .....	116
Figura 3.27: Medida Inicial com DSC desbalanceado .....	116
Figura 3.28: Teste inicial com massa de vidro e massor de chumbo adesivado (pré-carga).....	117
Figura 3.29: Massores de chumbo adesivados e medida da pré-carga em balança digital de precisão.....	117
Figura 3.30: Medida do desbalanceamento (valor global), carga sugerida e indicação de ângulo de fase.....	118
Figura 3.31: Fixação da carga sugerida no ângulo de fase e retirada da pré-carga.....	118
Figura 3.32: Medida da velocidade global (mm/s), carga de adição (g) e ângulo de fase (°) no aparelho Vaibro. ....	119
Figura 3.33: Dispositivo de campo, com vibra-stops em bancada reforçada .....	120

Figura 3.34: Dispositivo de campo, com vibra-stops e fixação com grampos fixos na bancada.....	120
Figura 3.35: Leitura inicial com vibra-stops e fixação com grampos fixos .....	121
Figura 3.36: Retirada dos vibra-stops do Dispositivo de Campo .....	121
Figura 3.37: Dispositivo de campo, em vibra-stops e fixação com grampos fixos na bancada.....	122
Figura 3.38: Velocidade global média inicial ( $V_{m0}$ ) com melhorias na rigidez do Dispositivo .....	122
Figura 3.39: Eixo novo do motor pré-usinado (esquerda) e eixo original (direita) .....	124
Figura 3.40: Torneamento do novo rotor entre pontas e instrumentos de medida usados .....	124
Figura 3.41: Preparação e alinhamento do divisor, e tentativa de fresamento do rotor .....	125
Figura 3.42: Análise do material do rotor por microscopia óptica - SPECTROMAXx DCM 2752 ...	125
Figura 3.43: Eletrodo de cobre eletrolítico usinado por erosão a fio (acima) e eixo usinado por erosão a penetração (abaixo).....	126
Figura 3.44: Motor modificado e com novo rotor .....	126
Figura 3.45: Driver motor ponte H L298N .....	127
Figura 3.46: Esquema para teste de módulo (Desenho adaptado) .....	127
Figura 3.47: Arranjo Experimental do Teste com o Motor de Passo.....	128
Figura 3.48: Vista da Montagem em 3D do Projeto Modular do PDCG-M.....	129
Figura 3.49: Vista da Montagem em 3D em Corte do Projeto Modular do PDCG-M.....	129
Figura 3.50: Alinhamentos do Cabeçote e Morsa da Fresadora Ferramenteira Analógica .....	130
Figura 3.51: Alinhamento da Morsa na Fresadora Ferramenteira de Coordenadas.....	130
Figura 3.52: Fresamento e esquadreamento da base de poliacetal .....	131
Figura 3.53: Fresamento da superfície da base de poliacetal com “bailarina” .....	131
Figura 3.54: Fresamento da base de Alumínio .....	132
Figura 3.55: Usinagem dos chanfros das Bases.....	132
Figura 3.56: Referenciamento com pino retificado e fita de papel .....	133
Figura 3.57: Mandrilhamento dos Suportes de Fixação dos Anéis de Neodímio .....	133
Figura 3.58: Fresamento dos Suportes dos Ímãs dos Mancais Magnéticos .....	134
Figura 3.59: Torneamento, Fresamento e Buchas de Fixação dos Anéis de Neodímio .....	134
Figura 3.60: Furações e Mandrilhamento dos Suportes de Fixação dos Motores .....	135
Figura 3.61: Usinagem de ponta cônica postiça para Torneamento .....	135
Figura 3.62: Torneamento do Eixo entre Pontas com Arrastador.....	136
Figura 3.63: Torneamento do Eixo entre Pontas sem Arrastador (pressão/ atrito) .....	136
Figura 3.64: Uso de Luneta e Rolamento para Torneamento do Alojamento do Ímã do Mancal .....	137
Figura 3.65: Dispositivo de fixação de Ferramenta para Torneamento do Alojamento do Ímã do Mancal.....	137
Figura 3.66: Eixo com Ímã de Neodímio Montado na Extremidade .....	138
Figura 3.67: Suportes de Fixação do Anéis de Neodímio com Buchas e Pré-montados.....	138
Figura 3.68: Suporte de Fixação do Anel de Neodímio com Bucha, Verificação de Esquadro em Mesa de Desempeno .....	139
Figura 3.69: Suportes de Fixação dos Ímãs dos Mancais Magnéticos e Montagem das Buchas .....	139
Figura 3.70: Roscamentos parciais nas buchas de latão na fresadora e na bancada .....	140
Figura 3.71: Suportes de Fixação dos Ímãs com Bucha de Latão e Verificação de Esquadro no Desempeno .....	140
Figura 3.72: Suportes dos Mancais, Verificação de Esquadro e Alinhamento com Pino Guia no Desempeno .....	141

Figura 3.73: Medição Tridimensional das Coordenadas Furações do Motor – Mitutoyo / FATEC-SP .....	141
Figura 3.74: Abertura feita na carcaça do motor .....	142
Figura 3.75: Usinagem de Abertura Parcial da Carcaça do Motor .....	142
Figura 3.76: Configuração do rotor com o núcleo magnetizado do MIP .....	143
Figura 3.77: Detalhes do rotor montado e acoplamento do ímã de neodímio na extremidade do eixo .....	143
Figura 3.78: Desmontagem do motor para retirada do rotor .....	144
Figura 3.79: dispositivo para sacar rolamento .....	144
Figura 3.80: Teste de passagem de corrente elétrica com multímetro .....	145
Figura 3.81: Utilização de uma lima agulha diamantada para retirar com cuidado o “miolo” do rotor .....	145
Figura 3.82: Finalização da retirada do “miolo” do rotor .....	146
Figura 3.83: Bucha de Poliacetal para Possibilitar a Usinagem do furo Interno do Anel do Rotor .....	146
Figura 3.84: Montagem da Bucha de Poliacetal Menor no Torno Mecânico .....	147
Figura 3.85: Usinagem da bucha do anel ferromagnético e teste com pó ferromagnético (nº de polos) .....	147
Figura 3.86: : Montagem do rotor no eixo .....	148
Figura 3.87: Montagem do eixo com rotor nos mancais de levitação (Lenz) .....	148
Figura 3.88: Esboço do dispositivo proposto .....	149
Figura 3.89: Esboço do pivô inteiriço proposto b) Imagem do conjunto de fixação do pivô .....	149
Figura 3.90: Bucha Bipartida para Centralização da Extremidade do Eixo do PDCG .....	150
Figura 3.91: Eixo escalonado para aferição da centralização da interface estator/roto .....	150
Figura 3.92: Furos para pinos-guias e centralização da interface estator/roto .....	151
Figura 3.93: Detalhe da vista superior do PDCG-M sem cabeamento elétrico .....	151
Figura 3.94: Detalhe do parafuso de regulagem dos ímãs das extremidades do PDCG-M .....	151
Figura 3.95: Esquema de montagem e indicação da distancia de interação ( $d_i$ ) .....	152
Figura 3.96: PDCG-M com identificações dos Mancais de Levitação LENZ e Magnéticos .....	153
Figura 3.97: Desgaste pivô na extremidade mancal magnético traseiro externo ( $T_E$ ) .....	154
Figura 3.98: Falhas de sinterização e desgaste do ímã de neodímio .....	154
Figura 3.99: Retirada do ímã de neodímio da extremidade ( $T_E$ ) .....	155
Figura 3.100: Pivô de Latão e Anel Espaçador .....	156
Figura 3.101: Velocidade de 6503 rpm e tensão de 46,8 V .....	156
Figura 3.102: Velocidade de 7149 rpm e tensão de 50,9 V .....	157
Figura 3.103: Teste Final - Velocidade de 8112 rpm e Tensão de 60 V .....	157
Figura 3.104: Espectro da Análise Vibracional - Teste nº 6 PDCG-M – Levitação LENZ (Desgaste Pivôs) .....	158
Figura 3.105: Espectro da Análise Vibracional - Teste nº 6 PDCG-M – Mancais Magnéticos (Desgaste Pivôs) .....	159
Figura 3.106: Espectro da Análise Vibracional - Teste nº 9 PDCG-M – Levitação LENZ (Rot. menor de 3700 rpm) .....	160
Fig. 3.107: Espectro da Análise Vibracional - Teste nº 9 PDCG-M – Mancais Magnéticos (Rot. Menor 3700 rpm) .....	161
Figura 3.108: Dados Técnicos do Termoviosor e certificado de calibração .....	162
Figura 3.111: Termograma, imagem real e dados da medição termográfica (nº 3) .....	163

Figura 3.112: Termograma, imagem real e medição termográfica do circuito de acionamento do PDCG-M .....	163
Figura 3.113: Imagem termográfica e real do tacômetro na análise nº 3 – 7762 rpm.....	164
Figura 4.1: Gráfico da medição de vibração do PDCG-M.....	168
Figura 4.2: Diagrama do coeficiente de fricção de materiais em aço a seco .....	169
Figura 4.3: Diagrama de desgaste comparativo de materiais em teste por abrasão .....	170
Figura 6.1: Ilustração de melhoria dos mancais magnéticos (Pastilha de anteparo/ fricção) .....	174
Figura 3.114: (a) bomba de vácuo; b) sistema de vácuo / Lab. Vácuo da FATEC/SP. ....	175

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Principais técnicas de detecção (OG).....	32
Tabela 2.2: Detectores de OG interferométricos e características .....	48
Tabela 2.3: Classificação dos detectores de massa ressonante. ....	50
Tabela 2.4: Características relevantes dos detectores de (OG) de massa ressonante. ....	51
Tabela 2.5: Classificação de severidade conforme potência do motor da máquina .....	65
Tabela 2.6: Níveis de criticidade vibratórias .....	66
Tabela 2.7: Níveis de criticidade vibratórias – ISO 10816-3 .....	66
Tabela 2.8: Suscetibilidade Magnética à Temperatura Ambiente para Materiais Diamagnéticos e Paramagnéticos .....	79
Tabela 2.9: Propriedades típicas dos materiais magnéticos duros $\text{Sm}_2\text{O}_3$ (samário-cobalto) e $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (Neodímio-ferro-boro) .....	83
Tabela 3.1: Proposta de materiais de engenharia para fabricação do PDCG-M.....	95
Tabela 3.2: Análise química da liga de alumínio (Base e Eixo ) .....	96
Tabela 3.3: Composição química típica de uma liga latão C-360.....	97
Tabela 3.4: Composição química típica de uma liga de alumínio 6061.....	98
Tabela 3.5: Desempenho dos diferentes polímeros usados como pivôs .....	99
Tabela 3.6: Análise química do latão utilizado na construção de pivô para teste no PDCG_M .....	155
Tabela 3.7: Medidas de frequência, e os valores velocidade e aceleração do mancal de levitação Lenz .....	158
Tabela 3.8: Medidas de frequência, e os valores velocidade e aceleração do mancais magnéticos ....	159
Tabela 3.9: Medidas de frequência, e os valores velocidade do mancal de levitação Lenz .....	160
Tabela 3.10: Medidas de frequência e valores de velocidade dos mancais magnéticos .....	161
Tabela 4.1: Resultados iniciais obtidos nos pré-testes I (torno mecânico).....	166
Tabela 4.2: Resultados e medições do Teste III após melhorias no Dispositivo de Simulação de Campo (DSC) .....	166
Tabela 4.3: Dados e resultados dos testes finais do PDCG-M .....	171

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

<b>aLIGO</b>	<i>Advanced Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)</i>
<b>BLDC</b>	<i>Brushless Direct Current Motor</i> (Motor de Corrente Contínua sem Escova)
<b>CEM</b>	Ciência e Engenharia dos Materiais
<b>CG</b>	Conjunto Girante
<b>CNC</b>	Comando Numérico computadorizado
<b>DCMS</b>	Dispositivo de Calibração Mário Schenberg
<b>DSC</b>	Dispositivo de Simulação de Campo
<b>EDM</b>	<i>Electrical Discharge Machine</i>
<b>eLISA</b>	<i>Evolved Laser Interferometer Space Antenna</i>
<b>FATEC/SP</b>	Faculdade de Tecnologia de São Paulo
<b>FFT</b>	<i>Fast Fourier Transform</i>
<b>IEC</b>	<i>(International Electrical Commission).</i>
<b>IFSP</b>	Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia de São Paulo
<b>IFUSP</b>	Instituto de Física da Universidade de São Paulo
<b>INPE</b>	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
<b>LCMP I</b>	Laboratório de Construção em Mecânica de Precisão I
<b>LSU</b>	<i>Louisiana State University</i>
<b>MAV</b>	Máquinas Rotativas de Alta Velocidade
<b>MP</b>	Motor de Passo
<b>MRV</b>	Motor De Relutância Variável
<b>Ms</b>	Massa Solar
<b>NEMA</b>	<i>National Electrical Manufacturers Association</i>
<b>OG</b>	Ondas Gravitacionais
<b>PDCG-M</b>	Protótipo de Dispositivo de Calibração de Gravímetros-Modular
<b>RPM</b>	Rotações por Minuto
<b>TRG</b>	Teoria da Relatividade Geral
<b>UNC</b>	Usinagem Não Convencional (ou Não Tradicional)
<b>USP</b>	Universidade de São Paulo
<b>UWA</b>	<i>University of Western Australia</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLO	UNIDADE	DESCRIÇÃO
<b>a</b>	m	Distância do emissor ao detector
<b>a</b>	m	Raio de rotação da esfera girante
<b>b</b>	m	Comprimento efetivo do detector
<b>B</b>	T (tesla)	Densidade de fluxo magnético
<b>B<sub>0</sub></b>	T (tesla)	Densidade de fluxo magnético no vácuo
<b>d</b>	m	Distância entre o corpo originador do campo e o corpo extenso imerso nele
<b>Δf</b>	Hz	Largura de banda
<b>F</b>	N	Força
<b>ΔF</b>	N	Força gravitacional diferencial
<b>F<sub>CM</sub></b>	N	Força no centro de massa
<b>f<sub>c</sub></b>	Hz	Frequência característica e emissão da fonte
<b>fem</b>	V (Volt)	Força eletromotriz
<b>I</b>	A	Corrente de descarga
<b>G</b>	m <sup>3</sup> Kg <sup>-1</sup> s <sup>2</sup>	Constante de Newton;
<b>H</b>	voltas/m	Intensidade do campo magnético
<b>l</b>	m	Comprimento
<b>L</b>	henry (H)	Indutância de uma fase
<b>M</b>	kg	Massa do corpo
<b>μ</b>	H/m (Wb/A.m)	Permeabilidade magnética
<b>μ<sub>0</sub></b>	H/m (Wb/A.m)	Permeabilidade magnética no vácuo
<b>μ<sub>r</sub></b>	H/m (Wb/A.m)	Permeabilidade magnética relativa
<b>P</b>	W	Potência do Motor
<b>Q<sub>RM</sub></b>	mm <sup>3</sup> /min	Taxa de remoção de material
<b>q</b>	-	Número de ciclos coerentes apresentados pelo sinal
<b>R</b>	m	Raio do corpo extenso
<b>R</b>	m	Raio de giro
<b>r</b>	m	Raio de rotação das massas

$r$	m	Distância entre o detector e a massa girante
$R_e$	Ohms ( $\Omega$ )	Resistência de uma fase
$T_f$	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura de fusão do material
$\sigma$	Pa	Tensão de ruptura do material
$\omega$	rad./s	Velocidade angular
$V_{m_0}$	mm/s	Velocidade global média inicial
$\rho$	$\text{g}/\text{cm}^3$	Massa específica do material
$\chi_m$	-	Suscetibilidade magnética

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	23
1.1	OBJETIVO	26
1.1.1	Objetivo geral	26
1.1.2	Objetivos específicos	26
1.2	JUSTIFICATIVA DA PROPOSTA	27
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b>	28
2.1	ONDAS GRAVITACIONAIS	29
2.2	FONTES DE ONDAS GRAVITACIONAIS	31
2.3	FONTES CANDIDATAS À OBSERVAÇÃO PELO DETECTOR MÁRIO SCHENBERG	33
2.4	FIM DA LONGA ESPERA: A DETECÇÃO DAS ONDAS GRAVITACIONAIS	35
2.4.1	Novas descobertas: Colisão de estrelas de nêutrons	40
2.5	DETECTORES DE ONDAS GRAVITACIONAIS	44
2.5.1	Detectores de interferômetros laser	46
2.5.2	Detectores de antenas ressonante massivas	49
2.6	DETECTOR MÁRIO SCHENBERG	54
2.7	ANCESTRALIDADE: PROTÓTIPOS DE CALIBRADORES DE GRAVÍMETROS	56
2.8	ANÁLISE VIBRACIONAL	61
2.9	ARDUÍNO: BREVE INTRODUÇÃO SOBRE A PLATAFORMA	67
2.10	LEI DE LENZ	69
2.11	MATERIAIS DE FABRICAÇÃO	71
2.11.1	Materiais compósitos	71
2.11.2	Materiais para construção do Protótipo de Dispositivo de Calibração de Gravímetros - Modular (PDCG-M)	72
2.12	MATERIAIS: PROPRIEDADES MAGNÉTICAS	73
2.12.1	Conceitos básicos: Magnetismo	74
2.12.2	Diamagnetismo, Paramagnetismo, Ferromagnetismo, Ferrimagnetismo e Antiferrimagnetismo	77
2.12.3	Ímãs de neodímio	82
2.13	MOTORES DE PASSO (MP)	85
2.14	MOTOR SEM ESCOVAS	87
2.15	MOTOR DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL (MRV)	88
2.16	USINAGEM NÃO CONVENCIONAL	90
2.16.1	Eletroerosão por penetração	91
2.16.2	Eletroerosão a fio	92
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	93
3.1	ESTUDOS PARA O DESENVOLVIMENTO DO PROJETO DE UM PROTÓTIPO PARA CALIBRAÇÃO DE GRAVÍMETROS MODULAR	93
3.2	MATERIAIS: PESQUISA E DIRETRIZES	93
3.3	GEOMETRIA E DIMENSIONAMENTO DO DISPOSITIVO	100
3.3.1	Protótipo do Dispositivo de Calibração de Gravímetros-Modular	101

3.3.2	Conjunto girante do rotor .....	102
3.4	CIRCUITO DE ACIONAMENTO DA MOTORIZAÇÃO DO PROTÓTIPO .....	103
3.5	PRÉ-TESTES I - ANÁLISE VIBRACIONAL E BALANCEAMENTO DO DSC – 1º PROTÓTIPO .....	106
3.5.1	Melhorias no dispositivo simulador de campo (dsc) e acessórios para análise vibracional dinâmica .....	111
3.5.2	Melhoria da precisão da indicação do ponto de adição de massa para o DSC .....	113
3.6	TESTES II - COM O NOVO DISPOSITIVO DE SIMULAÇÃO DE CAMPO (DSC) .....	114
3.6.1	Testes II - Configuração dos parâmetros de coleta .....	114
3.6.2	Testes II - Provocação forçada do desbalanceamento do novo DSC .....	116
3.6.3	Teste II - Pré-carga no ponto de referência .....	117
3.6.4	Testes II - Medida com pré-carga (sugestão de carga e ângulo fase).....	118
3.6.5	Testes II - Retirada da pré-carga e fixação de massa no ângulo de fase para 2ª medição .....	118
3.6.6	Testes II - Prosseguimento de etapas, verificações e análises Preliminares (DSC) .....	119
3.6.7	Melhorias na estabilidade do dsc e leitura do canhão laser da Vaibro® .....	120
3.7	TESTES III - APÓS MELHORIAS NO DISPOSITIVO DE SIMULAÇÃO CAMPO .....	123
3.8	TESTES IV - COM MOTOR DE PASSO MODIFICADO .....	123
3.8.1	Testes IV - Controle de motor de passo: Uso do Arduíno e drive com ponte H L298N .....	127
3.9	CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DE DISPOSITIVO PARA CALIBRAÇÃO DE GRAVÍMETROS - MODULAR (PDCG-M).....	128
3.9.1	Fresamento das bases e suportes modulares .....	130
3.9.2	Torneamento do eixo principal e embutimento dos ímãs de neodímio dos mancais ...	135
3.9.3	Montagem e verificação dos módulos do PDCG-M .....	138
3.9.4	Preparação do motor e adaptação do rotor .....	141
3.9.5	Pivôs de apoio, dispositivos de centralização e montagem mecânica do PDCG-M ....	148
3.10	TESTES V - PROTÓTIPO DE DISPOSITIVO PARA CALIBRAÇÃO DE GRAVÍMETROS - MODULAR (PDCG-M) – VERSÃO FINAL.....	152
3.10.1	Testes V do PDCG-M – Análise vibracional do experimento nº 6.....	158
3.10.2	Testes V do PDCG-M – Análise vibracional do experimento nº 9.....	160
3.10.3	Testes V do PDCG-M – Análises termográficas .....	162
a)	Testes V do PDCG-M – Análises Termográficas .....	163
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	165
5	<b>CONCLUSÕES</b> .....	172
6	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	174
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	176
	<b>APÊNDICES</b> .....	183
	<b>ANEXOS</b> .....	197

## 1 INTRODUÇÃO

Alguns pesquisadores mudaram a história da astronomia, entre os quais, o físico e astrônomo italiano, Galileu Galilei<sup>1</sup>, o primeiro a observar os corpos celestes com uma luneta; suas observações desvendaram as quatro luas de Júpiter e muitas estrelas. Este cientista refutou a ideia de que os corpos celestes eram esferas imutáveis e perfeitas, teoria predominante entre os astrônomos, e a partir de suas investigações sobre a natureza da superfície da lua, revelou a existência de montanhas, crateras e mares.

Outro cientista que contribuiu para avanço da ciência foi o inglês Isaac Newton<sup>2</sup>. Sua obra “Princípios da Matemática e da Filosofia Natural<sup>3</sup>” é considerada uma das mais influentes da história.

De igual importância ressaltamos o cientista Alemão Albert Einstein<sup>4</sup>. A relevância de sua pesquisa foi fundamental no estabelecimento da teoria da física quântica<sup>5</sup>. Segundo Tipler (2014) na formulação da Teoria da Relatividade Geral (TRG), Albert Einstein propôs a existência de ondas gravitacionais. Para Einstein, massas aceleradas devem criar campos gravitacionais oscilantes, isto é, ondas gravitacionais, que se propagam na velocidade da luz, do mesmo modo como cargas elétricas aceleradas produzem campos eletromagnéticos oscilantes, isto é, ondas eletromagnéticas. Nesta alusão de Einstein, as ondas gravitacionais são distorções do espaço-tempo.

“Uma teoria é considerada boa se satisfaz dois requisitos: descreve de forma adequada um grande número de observações com base em um modelo que contém apenas poucos elementos arbitrários e faz previsões precisas sobre os resultados de futuras observações.”

(HAWKING; MLODINOW, 2005)

---

<sup>1</sup> (1564–1642), considerado o pai da ciência moderna.

<sup>2</sup> (1643–1727), matemático e físico, que inventou os métodos matemáticos de cálculo.

<sup>3</sup> Publicada em 1687, essa descreve as três leis de Newton, que fundamentaram a mecânica clássica, e desenvolveu a lei da gravitação universal.

<sup>4</sup> (1879–1955) que desenvolveu a Teoria da Relatividade Geral (TRG) e revelou a equação  $E=mc^2$  (energia é igual à massa multiplicada pelo quadrado da velocidade da luz).

<sup>5</sup> Segundo Serway (1996) Einstein foi laureado com o Prêmio Nobel de Física de 1921 por suas contribuições à física teórica e especialmente por suas descobertas da lei do efeito fotoelétrico.

Primordialmente a previsão matemática da Teoria da Relatividade Geral de Einstein de 1916 (TIPLER, 2014) preconizava a existência das partículas grávitons, espécie de pacotes de energia derivada de deformações do espaço-tempo, e propagada em forma de ondas gravitacionais (OG) com a velocidade da luz. Essa previsão revolucionou os estudos do espectro e análise do Universo para astronomia, cosmologia e física: a astronomia gravitacional.

Por conseguinte, cientistas preconizavam que ondas gravitacionais são suficientemente intensas para serem detectadas na Terra, como as emitidas por meio de sistemas binários constituídos por estrelas de nêutrons ou buracos negros prestes a coalescer (NASA, 2009), isto é, se tornar um só, conforme ilustrado na Figura 1.1.

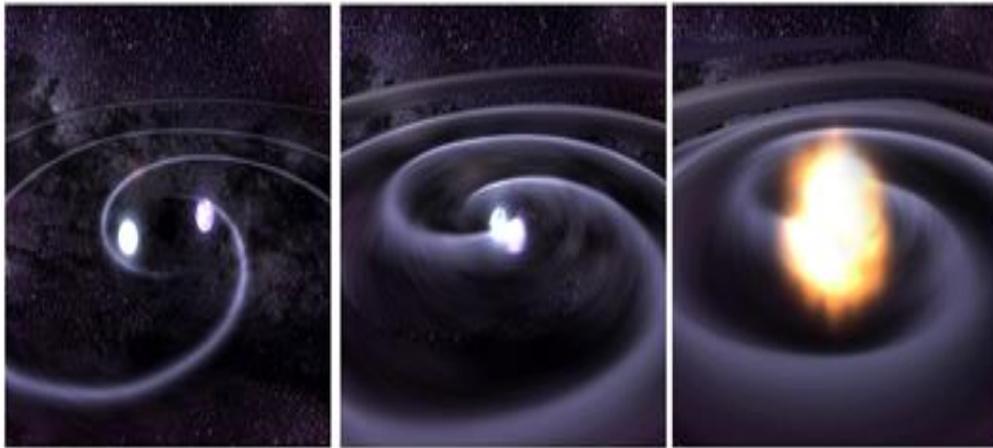


Figura 1.1: Simulação de estrelas de nêutrons ou buracos negros prestes a coalescer

Fonte: (NASA 2009)

Porquanto, a realidade da detecção das ondas gravitacionais a partir destes estudos e desenvolvimento de diferentes experimentos realizados para comprovar esta teoria, permaneceu durante um século como um dos grandes desafios e conquista da comunidade científica, da Física moderna e da astronomia gravitacional.

Nesta perspectiva, segundo Lakatos (2011) “...*não há ciência sem o emprego de métodos científicos...*” e a definição de Trujillo Ferrari (1982), expressa bem esta busca: “...A ciência é todo um conjunto de atitudes e atividades racionais, dirigidas ao sistemático conhecimento com objeto limitado, capaz de ser submetido à verificação...”, igualmente importante é não vilipendiar os métodos experimentais e matemáticos ou a Heurística que de acordo com Polya (1995) é o estudo dos métodos e das regras da descoberta e da invenção.

Contudo, a ciência não se baseia somente na metodologia científica,

“Eu acredito na intuição e na inspiração. A imaginação é mais importante que o conhecimento. O conhecimento é limitado, enquanto a imaginação abraça o mundo inteiro, estimulando o progresso, dando a luz à evolução. Ela é, rigorosamente falando, um fator real na pesquisa científica”

(EINSTEIN, 2011)

A saber, os principais métodos de detecção de ondas gravitacionais existentes e espalhados pelo mundo (Figura 1.2) estão associados com a frequência da Onda Gravitacional (OG) emitida pela fonte emissora (MAGALHÃES *et al.*, 1995), que são: Antenas ressonantes massivas e Interferômetros laser (BORTOLLI, 2011; FRAJUCA, 2014; ABBOTT *et al.*, 2016/2017).

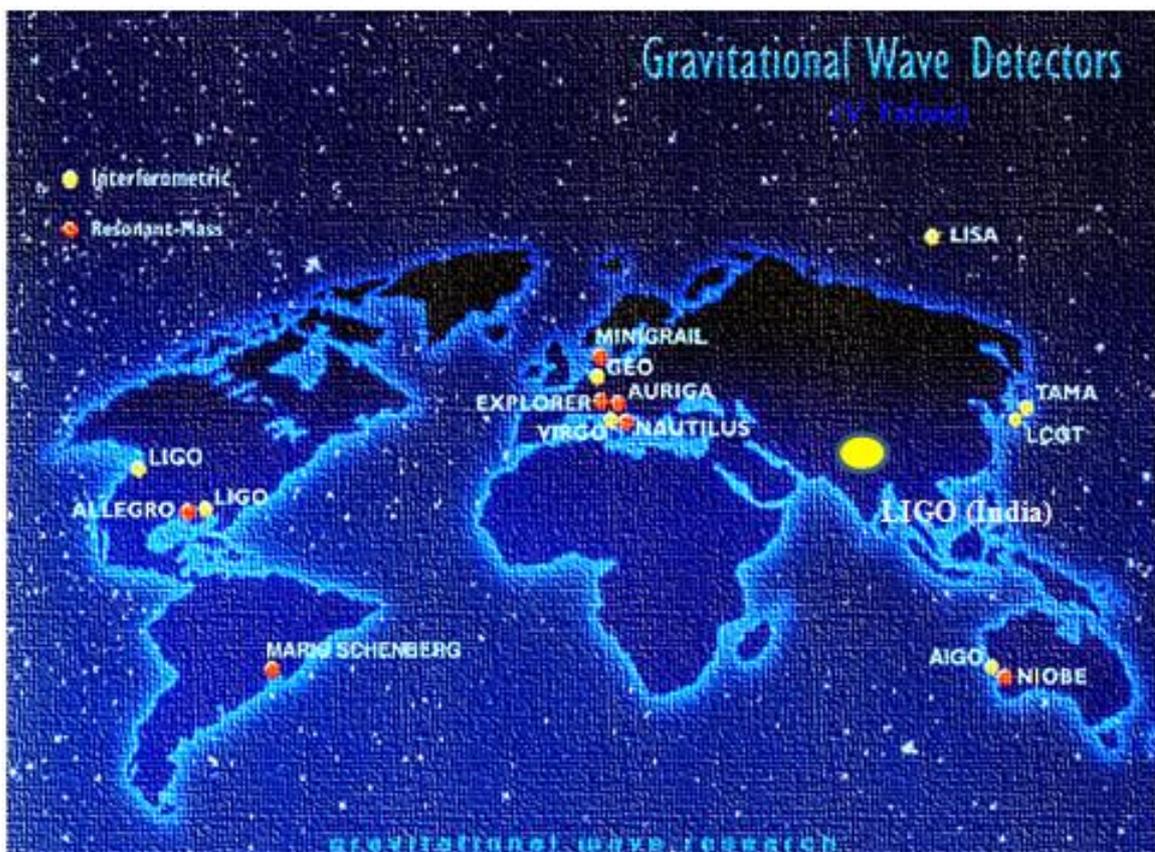


Figura 1.2: Principais detectores de Ondas Gravitacionais e sua localização geográfica

Fonte: Adaptação (FAFONE, V. - Copyright®)

A partir do anúncio científico e êxito tecnológico da detecção das ondas gravitacionais ocorrido em 14 de setembro 2015, pelo observatório avançado (*Advanced Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*) nos Estados

Unidos (ABBOTT et al., 2016), bem como, a recente observação de uma estrela binária de nêutrons, candidata a coalescência (designada GW170817), em 17 de agosto de 2017, tanto visualmente (luz da explosão/ Telescópios do Observatório Europeu do Sul (ESO) / Chile), quanto por detectores de ondas gravitacionais por interferometria a laser, pelos observatórios aLIGO e Virgo (localizado próximo de Pisa, na Itália), abrem-se proeminentes janelas para repensarmos os paradigmas e os questionamentos da observação do Universo, como também inauguramos uma nova forma de se estudar os objetos astronômicos envolvendo mais de um método de recepção de informações, a astronomia multimessageira (ABBOTT et al., 2016). Por conseguinte, tais eventos incitam investigações mais detalhadas sobre o surgimento de elementos químicos pesados, cálculo do número de relevância astronômica e taxa de expansão do universo.

## **1.1 OBJETIVO**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Buscar-se-á desenvolver um Protótipo de Dispositivo para Calibração de Gravímetros - Modular (PDCG-M).

### **1.1.2 Objetivos específicos**

Nesse intento, este trabalho propõe o projeto do Protótipo de Dispositivo para Calibração de Gravímetros-Modular (PDCG-M): em escala reduzida; utilizando mancais magnéticos e de levitação (LENZ; que possibilite a modulação dos componentes; com estabilidade na rotação e capacidade para girar a rotações próximas a 10.000 RPM (167 Hz); que seja analisado por técnicas preditivas (Análise Vibracional/ Termografia); e com a continuidade e evolução dos experimentos possibilite a blindagem e reforço balístico para testes futuros no vácuo.

*"[...] temos que reconhecer que um dos grandes desafios dos pesquisadores, atualmente, é mapear rapidamente o tema de seu interesse, pois a velocidade com a qual novos estudos são publicados é muito elevada" (DE SORDI, 2013)*

## 1.2 JUSTIFICATIVA DA PROPOSTA

Com efeito justifica-se os objetivos geral e específico dessa pesquisa em vista de desenvolver um (PDCG-M) com novo modelo, que possibilite modificações de posicionamento de componentes, favorecendo a estabilidade e balanceamento do mesmo e aumento gradativo da velocidade de rotação; encontrar a forma adequada de acoplamento mecânico entre o motor de acionamento e a parte massiva do dispositivo; haja vista, maximizar o sinal gravitacional utilizando materiais que proporcionam a maior resistência mecânica possível e que permitam que o dispositivo trabalhe no vácuo.

Segundo pesquisadores<sup>6</sup> do projeto Gráviton um detector que utiliza uma antena esférica ao ser comparado com os atuais detectores de interferômetros a laser e os de barra, têm vantagens. Contudo, o detector de Ondas Gravitacionais (OG) Mário Schenberg (MS)<sup>7</sup>, precisa ser calibrado e aperfeiçoado, por meio de sinais de intensidade conhecida, para que possamos fazer frente aos recentes êxitos tecnológicos de detecções de ondas gravitacionais, perspectiva de novas detecções similares, quais possam contribuir com o esclarecimento da ação da energia escura e aceleração do ritmo de expansão do Universo.

---

<sup>6</sup> (FRAJUCA, 1996; AGUIAR, 2001)

<sup>7</sup> Encontra-se no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (OLIVEIRA, N., AGUIAR, O., 2016)

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

A revisão bibliográfica está pautada na leitura crítica dos teóricos pertinentes ao tema investigado, trabalhos anteriores<sup>8</sup> e inúmeras fontes de consulta: artigos e periódicos científicos, livros, artigos em congressos, teses e dissertações. Trentine e Paim (1999) certificam que "...a seleção criteriosa de uma revisão de literatura pertinente ao problema significa familiarizar-se com textos e, por eles, reconhecer os autores e os que eles estudaram anteriormente sobre o problema a ser estudado..."

Os tópicos abordados a seguir visam à compreensão e o entendimento das necessidades para o desenvolvimento deste trabalho, tais como:

- a) o conceito sobre ondas gravitacionais (OG), fontes de OG candidatas a observação, a primeira detecção de uma onda gravitacional e o início da astronomia multimessageira;
- b) os detectores de ondas gravitacionais por interferometria a laser, por antenas ressonante massivas; O detector de ondas gravitacionais brasileiro- Mário Schenberg (MS); e os protótipos antecessores, criados com a perspectiva de calibrar o MS;
- c) o uso da técnica preditiva de análise vibracional e balanceamento, e Termografia; da plataforma de programação do Arduíno® e Proteus®, para comutação da motorização do PDCG-M; e da levitação magnética utilizando a lei de Lenz, em auxílio aos mancais magnéticos passivos;
- d) a pesquisa dos materiais para construção do protótipo (metais, polímeros e compósitos) e propriedades necessárias para atender as diretrizes para construção do PDCG-M;
- e) os materiais magnéticos e suas propriedades (dimagnetismo, paramagnetismo, ferromagnetismo, ferrimagnetismo e antiferromagnetismo); os ímãs de neodímio e propriedades dos materiais magnéticos duros
- f) uma introdução sobre motores de passo, motores brushless e de relutância variável.
- g) breve introdução sobre usinagem não convencional ou não tradicional (eletroerosão a penetração e a fio) e possibilidades de uso para construção PDCG-M com precisão;

---

<sup>8</sup> Desenvolvidos por Padovani (2012); Napoleão e Santos, K. (2013), Ruiz (2014), Fernandes (2015) e Linares (2016)

“...Pesquisa é o processo formal e sistemático de desenvolvimento do Método Científico, uma atividade humana, honesta, cujo propósito é descobrir respostas para as indagações ou questões significativas que são propostas, e visa à produção de conhecimento novo...”

(TRUJILLO FERRARI, 1982; GIL, 2007)

## 2.1 ONDAS GRAVITACIONAIS

O conceito de uma onda gravitacional exige a idealização de um liso, imperturbável fundo no qual as ondas se propagam. Ao contrário de ondas de água, no entanto, as ondas gravitacionais não são movimentos de um suporte material.

Em 1916 o cientista e físico alemão Albert Einstein formulou a Teoria da Relatividade Geral (TRG), propondo a existência de Ondas Gravitacionais (OG), que são distorções da métrica do espaço-tempo e se propagam com a velocidade da luz. As ondas gravitacionais, detectadas recentemente, interagem fracamente com a matéria e assim chegam até nós na sua forma original, nos dando informações diretas de suas fontes, como formação de buracos negros prestes a coalescer, explosões de supernovas, colisão de estrelas de nêutrons etc (SOUZA, 2012; TIPLER, 2014; ABBOTT et al., 2016/2017).

*"[...] quando um corpo, na superfície da terra, inicia um deslocamento a distribuição de massas do sistema Terra-corpo se altera, provocando uma súbita mudança no campo gravitacional da Terra que tem que se adaptar a esta mudança. Esta variação no campo gravitacional propaga-se, supõe-se, com velocidade igual à da luz; e longe da fonte é chamada de onda gravitacional (OG)[...]"* (BORTOLI, 2011)

Segundo Aguiar (1990) a formulação da TRG e equação matemática das ondas gravitacionais somente foram possíveis após a confirmação da existência das ondas eletromagnéticas por Hertz em 1887 e estudos sobre a existência das ondas gravitacionais realizados por Heaviside em 1893, Lorentz em 1900 e Poincaré em 1905.

Assim sendo, a geração de radiação gravitacional enquanto um sistema binário (SHAPIRO, 1983) composto por duas massas pontuais  $M_1$  e  $M_2$  (uma em torno da outra), em órbita circular com raio ( $a$ ), sendo  $a_1$  e  $a_2$  as distâncias respectivas entre as massas e o centro de massa ( $O$ ) do sistema, pode ser exemplificada conforme mostra a Figura 2.1.

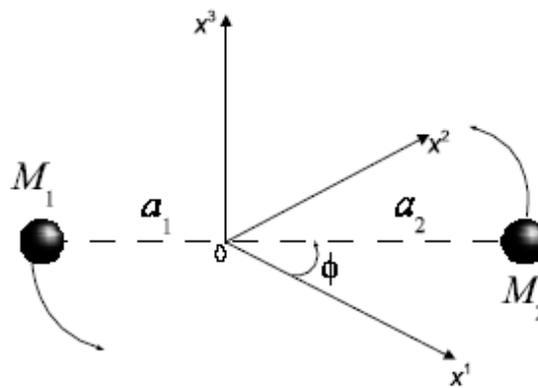


Figura 2.1: Representação de um sistema binário emissor de ondas gravitacionais

Fonte: adaptação (SHAPIRO, 1983)

Por certo, a radiação gravitacional ainda não tinha sido detectada diretamente, todavia, conforme Assis (2016) havia evidências indiretas de sua existência, o que testaria a relatividade geral sob condições extremas. Assim sendo, a detecção de OG não é simples por dois motivos: as OG interagem fracamente com a matéria e a intensidade das OG é muito baixa (NAPOLEÃO, 2013).

As forças gravitacionais diferenciais e o efeito nos corpos que as sofrem segundo Müller et al. (2013) são forças que surgem dentro de um corpo extenso imerso no campo gravitacional de outro, mais distante, também chamadas forças de maré. A força gravitacional diferencial ( $\Delta F$ ) é diretamente proporcional à massa do corpo originador do campo gravitacional ( $M$ ), diretamente proporcional ao raio do corpo extenso ( $R$ ) e inversamente proporcional ao cubo da distância entre o corpo originador do campo e o corpo extenso imerso nele, Equação 2.1:

$$\Delta F = \frac{MR}{d^3} \quad (2.1)$$

Em que:

$\Delta F$  = força gravitacional diferencial [N]

$M$  = massa do corpo [kg]

$R$  = raio do corpo extenso [m]

$d$  = distância entre o corpo originador do campo e o corpo extenso imerso nele [m]

A Figura 2.2 ilustra as forças gravitacionais em três pontos de um corpo extenso, de diâmetro ( $2 \Delta r$ ), cujo Centro de Massa ( $CM$ ) está a uma distância ( $r$ ) de outro, que tem massa ( $M$ ). A força gravitacional no centro de massa é proporcional a  $1/r^2$ , a força gravitacional no ponto 1 ( $F_1$ ) é proporcional a  $[1/(r+\Delta r)^2]$  e a força gravitacional no ponto 2 ( $F_2$ ) é proporcional à  $[1/(r-\Delta r)^2]$  (MÜLLER et al, 2013).



Figura 2.2: Forças gravitacionais em três pontos de um corpo extenso cujo centro de massa está a uma distância “ $r$ ” de outro corpo  $F_1 < F_{CM} < F_2$ .

(Fonte: MÜLLER *et al.*, 2013)

## 2.2 FONTES DE ONDAS GRAVITACIONAIS

As fontes de Ondas Gravitacionais (OG) segundo Ribeiro (2003) são classificadas em quatro tipos, definidos pela quantidade de ( $q$ ), que é o número de ciclos coerentes apresentados pelo sinal de onda, conforme apresentadas a seguir:

a) **Fontes Espiralantes - "Chirp"**: são emissoras de OG's na fase final de espiralação de um sistema binário ( $q$  é variável);

b) **Fontes Estocásticas**: correspondem ao somatório de uma distribuição aleatória e, portanto, não coerentes ( $q > 0$ ). Entre estas fontes, destacam-se as superposições de estrelas binárias, OG's primordiais, estrelas de população III, transições de fase e possíveis cordas cósmicas;

c) **Fontes impulsivas – "Bursts"**: as ondas mantêm a coerência durante um tempo correspondente a poucos ciclos da própria onda ( $q$  é pequeno). Exemplos, supernovas (SN's), coalescência de binárias compactas - estrelas de nêutrons (EN's), colapsos de estrelas ou aglomerados de estrelas para formar um buraco negro (BN), e BN supermassivos e instabilidades em EN's em rotação;

d) **Fontes periódicas**: os sinais são emitidos continuamente e mantêm a coerência durante um tempo longo ( $q$  é grande). Como exemplo, temos estrelas binárias e EN's .

Nesta perspectiva, pela quantidade de ( $q$ ), é possível determinar a largura da banda para uma frequência ( $f_c$ ) característica através da Equação 2.2:

$$\Delta f = \frac{f_c}{q} \quad (2.2)$$

Em que:

$\Delta f$  - é a largura de banda [Hz]

$f_c$  - é a frequência característica e emissão da fonte [Hz]

$q$  - é o número de ciclos coerentes apresentados pelo sinal

Ainda segundo Ribeiro (2003) e com base na classificação citada é possível associar a frequência da OG com o tipo da fonte emissora e com isso, o melhor método para sua detecção, conforme exposto na Tabela 2.1:

Tabela 2.1: Principais técnicas de detecção (OG)

Frequência [Hz]	Fonte	Método de Detecção
$10^{-16}$	Primordial	Anisotropia da radiação cósmica de fundo de micro-ondas
$10^{-9}$	Primordial Cordas Cósmicas	Tempo de Pulsar de Ms (Massa solar)
$10^{-4} \sim 10^{-1}$	Estrelas binárias supermassivas	Interferometria laser no espaço
$10 \sim 10^3$	Espiral de EN e BN binários ( $1 - 10^3$ Ms)	Interferometria laser na Terra
$10^3$	Coalescência de EM e BN binários - Supernovas	Detectores de massa ressonante

Fonte: (RIBEIRO, INPE 2003)

## 2.3 FONTES CANDIDATAS À OBSERVAÇÃO PELO DETECTOR MÁRIO SCHENBERG

Segundo Furtado (2009)<sup>9</sup> entre os prováveis eventos astrofísicos candidatos à detecção na região de 3,0 – 3,4 kHz, onde o detector Mario Schenberg será sensível, pode-se citar:

- a) Colapsos de núcleos estelares que gerem um evento do tipo supernova;
- b) Instabilidades hidrodinâmicas de estrelas de nêutrons; “quakes” e oscilações de estrelas de nêutrons (*modo f*) induzidos pela queda de matéria em sistemas binários;
- c) Excitação dos primeiros modos quasi-normais de buracos negros de aproximadamente 3,8  $M_{\odot}$  até 9  $M_{\odot}$ ;
- d) Coalescência de buracos negros e/ou estrelas de nêutrons de cerca de 1,9  $M_{\odot}$ .

Porquanto, pesquisas recentes e anteriores à detecção das ondas gravitacionais demonstravam avanços relativos às fontes de detecção, possibilidades dos observatórios e detecção das ondas gravitacionais, sendo assim, segundo Graham *et al.* (2015) o trânsito de buracos negros primordiais, através de uma anã branca<sup>10</sup> provoca aquecimento localizado em torno da trajetória do buraco negro, através de atrito dinâmico. Este calor pode iniciar uma fusão termonuclear em fuga, fazendo com que a anã branca exploda como uma supernova. Estes limites podem ser reforçados através de medições de binários da anã branca em observatórios de ondas gravitacionais.

Ademais as fusões binárias compactas (buraco da estrela de nêutrons/negro) emitem radiação eletromagnética (MARGALIT; PIRAN, 2015) através de três canais possíveis, que poderia revelar uma riqueza de informações sobre a fusão, aspecto relevante para a astronomia. Pois, o método dos mesmos fornece um limite superior para o efeito de não esfericidade.

De certo a superposição de ondas gravitacionais gerados por fontes astrofísicas (CROCKER *et al.*, 2015), a qual é esperada para dar origem ao plano de fundo estocástico de ondas gravitacionais, possivelmente podem ser captadas pela

---

<sup>9</sup> pesquisas referenciadas por (ARAUJO, MIRANDA e AGUIAR, 2006; ARAUJO *et al.*, 2004; MIRANDA, ARAUJO e AGUIAR, 2004; COSTA, AGUIAR e MAGALHÃES, 2004)

<sup>10</sup> Em astronomia, anã branca é o objeto celeste resultante do processo evolutivo de estrelas de até 10  $M_{\odot}$

segunda e terceira gerações de detectores de ondas gravitacionais, os quais poderiam observar este fundo estocástico<sup>11</sup>.

Lockerbie e Tokmakov (2014) propuseram o sistema composto por emissores (fontes de iluminação) e detectores de sombra, projetados para monitorar as vibrações de ondas gravitacionais para o detector aLIGO<sup>12</sup>, em ressonâncias de modos chamados violino (VM).

Segundo Bejger (2015) através da física de partículas e núcleos, é possível ter uma ideia resumida sobre métodos utilizados na análise dos dados e cálculos dos limites superiores sobre as ondas gravitacionais, tais quais os projetos aLIGO e Virgo, observatório instalado na cidade italiana de Cascina.

A finalidade dos dados fictícios é um desafio para ciência, segundo (MEACHER et al., 2015) preparar a análise dos dados e interpretação da ciência, para a segunda geração de ondas gravitacionais dos experimentos avançados aLIGO e Virgo, na busca de um sinal de fundo estocástico de ondas gravitacionais de origem astrofísica são um grande desafio. Os mesmos apresentam em seu uma série de sinais e desafios de dados, com o aumento da complexidade, cujo objetivo é testar a capacidade das atuais tabulações de análise de dados na detecção de um fundo de ondas gravitacionais produzido astrofisicamente, onde métodos de estimativa do parâmetro de teste interpretam os resultados.

De acordo com (EDWARDS et al., 2015) o modelo padrão de ruído, em análise de dados de ondas gravitacionais (OG), pressupõe que o ruído do detector é estacionário e uma Gaussiana distribuída, com uma densidade espectral de potência conhecida de (PSD). Propõem ainda uma abordagem semiparamétrico Bayesiana, não-paramétrico de Bernstein sobre o PSD, processo de Dirichlet e probabilidade de Whittle. Eles estimam, simultaneamente, que os parâmetros de reconstrução de um núcleo rotativo, colapso e explosão de supernova GW, tem sido incorporado no simulador de ruído aLIGO. Discutem também uma abordagem para lidar com dados estáticos, por invadir menores, mais fluxos de dados e componentes localmente estacionários.

Porter (2015) propôs um projeto conceitual chamado eLISA<sup>13</sup>. Este

---

<sup>11</sup> Vale ressaltar que se a eficiência do anel inferior do buraco negro em produzir ondas gravitacionais for suficientemente alta, ou seja semelhante a  $10^{-4}$  até a  $10^{-6}$  de energia do resto o buraco negro, respectivamente.

<sup>12</sup> *Laser Interferometer Gravitational - Wave Observatory* (observatório avançado de ondas gravitacionais por interferometria a laser)

<sup>13</sup> *Evolved Laser Interferometer Space Antenna*

Observatório tem uma configuração inicial atual que consiste em quatro links de laser entre três satélites, que são separados por uma distância de 1 milhão de quilômetros, construindo um interferômetro de Michelson de canal único.

O Telescópio Einstein (KROKER; NAWRODT, 2015), formado por um conjunto de três interferômetros<sup>14</sup> subterrâneos. Pretende-se neste observatório, com o Telescópio de Einstein, estudar toda a gama de frequência das ondas gravitacionais - de 1 Hz até 10 kHz, com uma sensibilidade 100 vezes maior do que os atuais, capaz de explorar uma região do Universo com um raio de bilhões de anos-luz, coletando dados de milhares de eventos emissores de ondas gravitacionais por ano, o qual deverá estar pronto em 2025.

Ainda nesta perspectiva de observação, em conformidade com Margalit e Piran (2015) a primeira detecção das ondas gravitacionais<sup>15</sup> e a sua observação regular estão entre os objetivos científicos e desafios tecnológicos mais importantes deste início de milênio para a observação do Universo.

## 2.4 FIM DA LONGA ESPERA: A DETECÇÃO DAS ONDAS GRAVITACIONAIS

Um século após as previsões fundamentais de Einstein e Schwarzschild, cientistas do projeto aLIGO, relataram a primeira detecção direta de ondas gravitacionais e a primeira observação direta de um sistema binário mesclado de buracos negros, massas aproximadamente iguais a 36 e 29 massas solares, para formar um único buraco negro de aproximadamente 62 massas solares a uma distância de 1,34 bilhão de anos-luz da Terra. Essas observações fornecem acesso exclusivo às propriedades do espaço-tempo no campo-forte, e regime de alta velocidade, confirmando as previsões da (TRG) para a dinâmica não-linear de buracos negros altamente perturbados (ABBOTT et al., 2016)

Ainda de acordo com Abbott et al. (2016) o sinal coincidente GW150914 (considerando que as ondas gravitacionais se propaguem com a velocidade da luz), recentemente<sup>16</sup> detectado (Figura 2.3), compatível com o produzido pela fusão dos dois buracos negros foi considerado legítimo, pois foram registrados com intervalo de tempo

---

<sup>14</sup> Cada um a uma distância de 10 quilômetros um do outro, cujo princípio de funcionamento é bastante simples, apesar da grande complexidade de engenharia envolvida na sua construção.

<sup>15</sup> Previstas pela teoria da relatividade geral de Einstein e outras teorias de gravitação.

<sup>16</sup> Em 14 de setembro de 2015 às 09:50:45 (UTC, the LIGO Hanford, WA, and Livingston, LA)

passível de coexistir com a distância entre os detectores. A detecção inicial foi feita por meio de buscas de baixa latência para ondas gravitacionais transientes genéricas e foi relatado dentro de três minutos de aquisição de dados. Posteriormente, análises de filtro de correspondência, que usam modelos relativísticos compactos de formas de onda binárias, recuperaram o sinal coincidente GW150914, acontecimentos significativos de cada detector para as observações relatadas pelos pesquisadores do projeto.

Somente o detector LIGO estava observando o sinal da GW150914 no momento. O detector Virgo estava sendo atualizado, e o GEO 600 estava operando, mas não no modo observacional, e não foi suficientemente sensível para detectar este evento (KLIMENKO et al., 2004 apud ABBOTT et al., 2016).

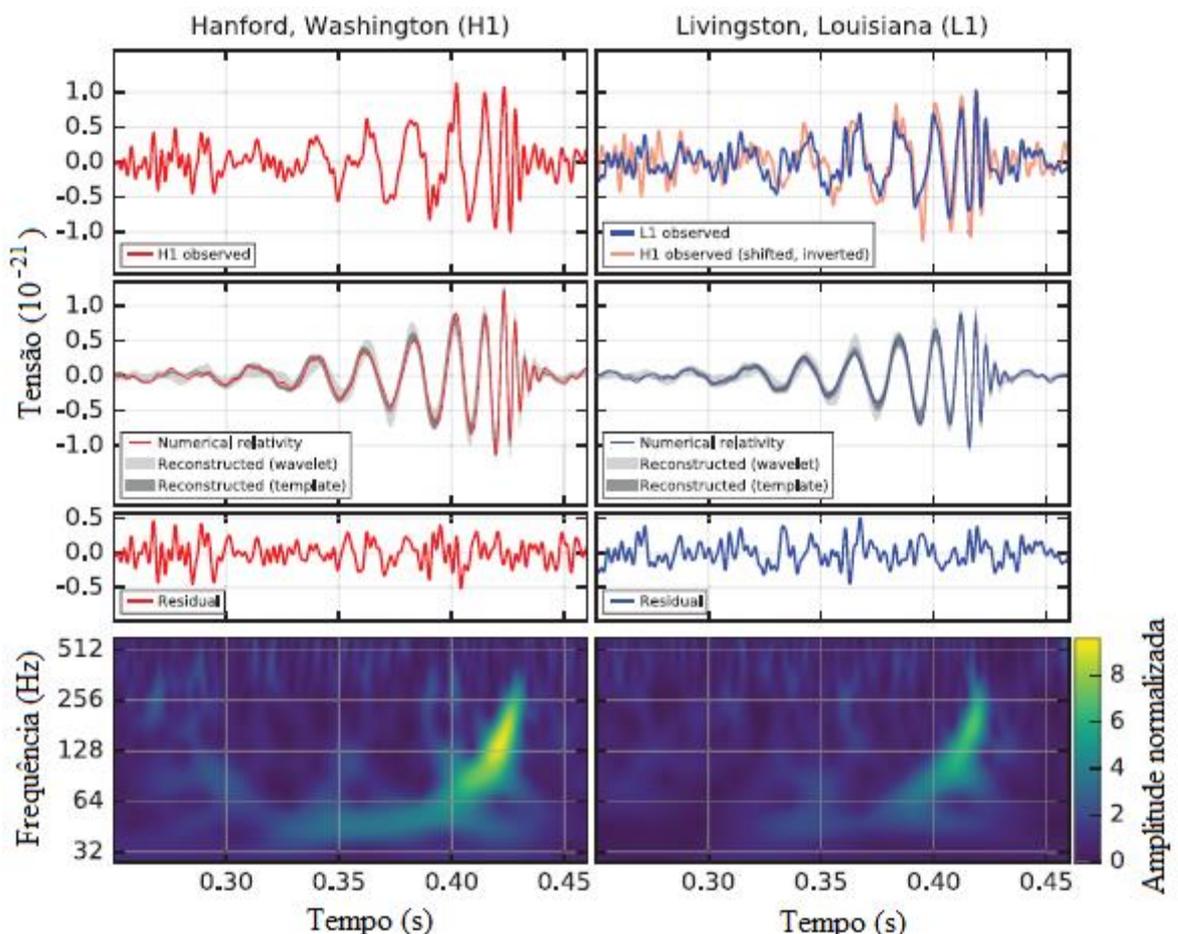


Figura 2.3: Evento de ondas gravitacionais GW150914 observada pelo aLIGO Hanford (H1, painéis da coluna da esquerda) e Livingston (L1, detectores de painéis de coluna da direita).

Fonte: Adaptado (ABBOTT et al., 2016)

Estima-se que a amplitude de tensão de onda gravitacional de GW150914, observado pelos detectores LIGO em Hanford (H1, Figura 2.3, painel esquerdo parte superior) e LIGO Livingston (L1, Figura 2.3, painel da direita, parte superior), mostram como a evolução da amplitude das ondas gravitacionais produzidas pelo evento em cada detector LIGO variou em função do tempo (em segundos) e frequência (em Hertz, ou ciclos de número de ondas por segundo).

A Figura 2.4 mostra a estimativa dos valores da amplitude de tensão da onda gravitacional GW150914, massas antes da fusão dos dois componentes de GW150914, projetados em H1 e largura completa das formas de banda da onda, sem a filtragem, bem como, as imagens de baixo-relevo mostrando os modelos de relatividade numérica e aglutinação dos buracos negros.

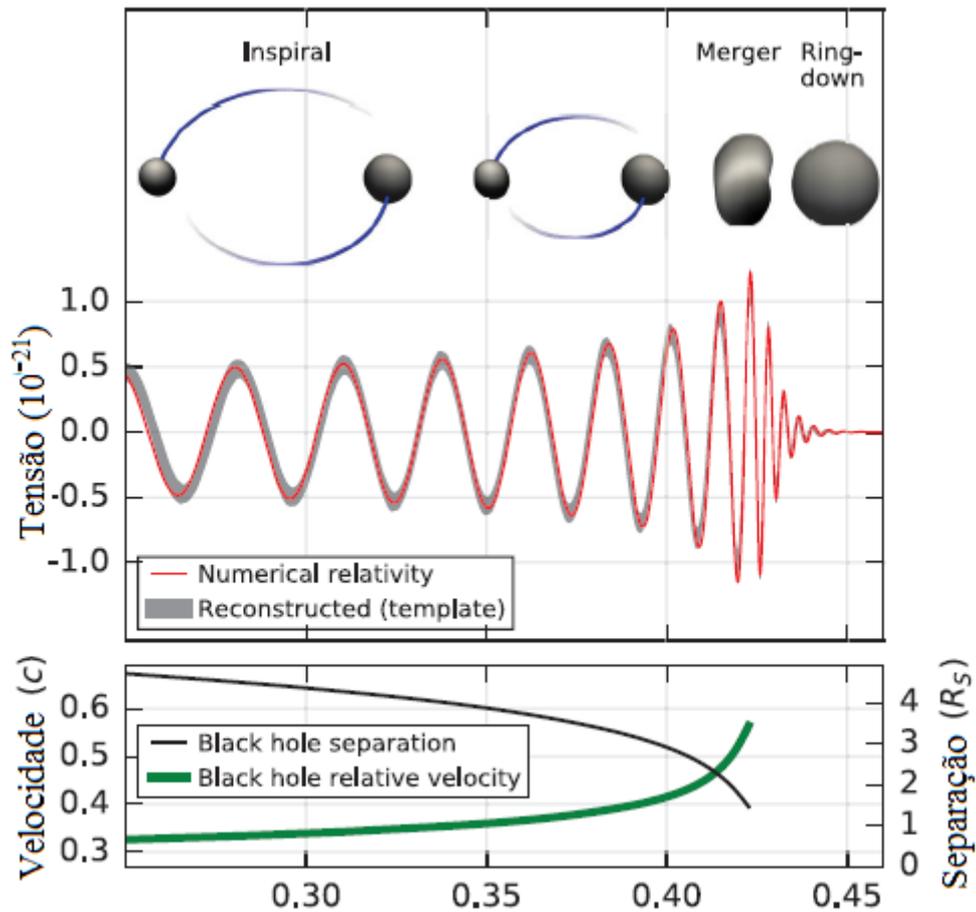


Figura 2.4: Estimativa da amplitude de tensão da onda gravitacional GW150914, projetada no H1 (Parte superior – Figura 2.4) e largura completa das formas de banda da onda, sem a filtragem. Imagens de baixo-relevo mostrando os modelos de relatividade numérica e aglutinação dos buracos negros (Parte inferior – Figura 2.4).

Fonte: Adaptado (ABBOTT et al., 2016)

Cada *site* do aLIGO opera com um único detector avançado aLIGO e um interferômetro de Michelson modificado, que mede a tensão de onda gravitacional, como uma diferença no comprimento dos seus braços ortogonais, mostrado na Figura 2.5. (AASI et al., 2015 apud ABBOTT et al., 2016)

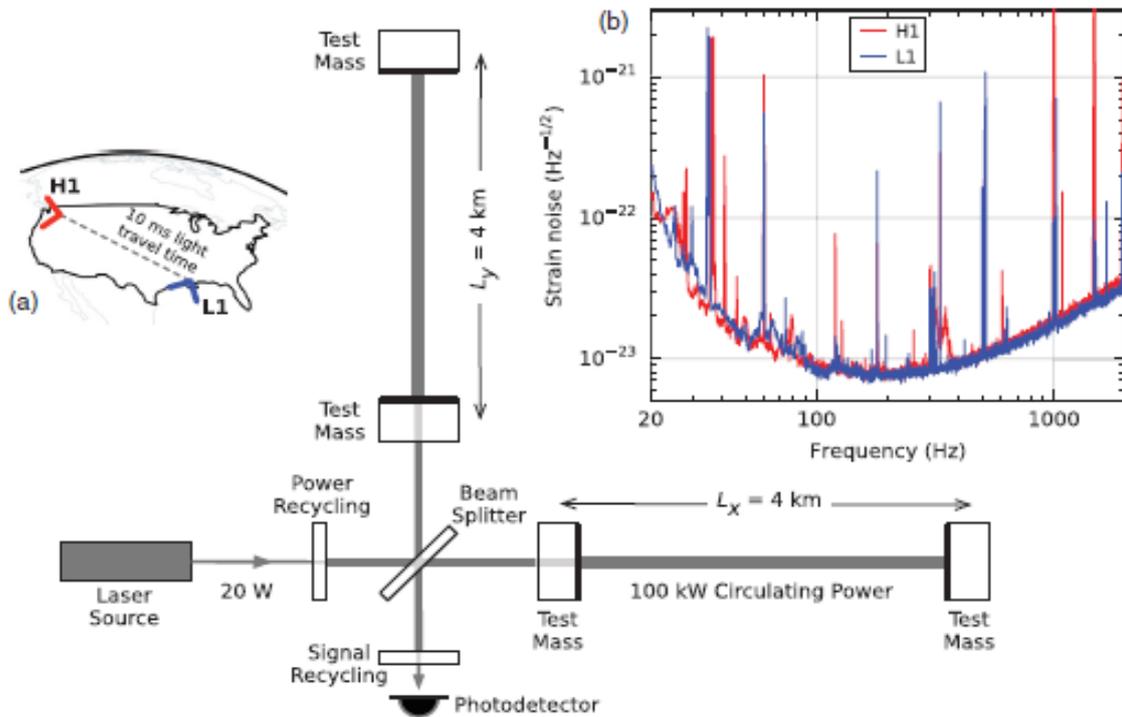


Figura 2.5: Diagrama simplificado do detector Advanced LIGO (fora de escala)

Fonte: (AASI et al., 2015 apud ABBOTT et al., 2016)

O sinal mais forte observado em ambos os detectores durante o período do evento GW150914 foi utilizado para realizar a análise estatística, para isso, uma série de deslocamentos de tempo entre os dados artificiais H1 e L1 foram aplicados para criar um conjunto de dados de maior duração para procurar sinais tão fortes, ou mais fortes, que GW150914. A astronomia das ondas gravitacionais explora de múltipla e ampla forma, o espalhamento dos detectores, no intuito de distinguir o ruído instrumental e ambiental do local, das ondas gravitacionais, para fornecer a localização de céu e origem, e para medir as polarizações de onda (ABBOTT et al., 2016).

A Figura 2.6 mostra o resultado da análise estatística, as curvas preta e azul representam propriedades estatísticas do ruído de fundo, as quais descrevem o número esperado de "eventos" de ruído capazes de imitar um sinal verdadeiro de determinada potência. A informação relevante extraída a partir figura, é o quão longe o evento GW150914 está das duas curvas em preto e azul; isto significa que um evento de ruído imitando GW150914 seria extremamente incomum, isto é, a pesquisa estima que a taxa de falso alarme seria menor do que a de um evento a cada 200.000 anos (ABBOTT et al., 2016).

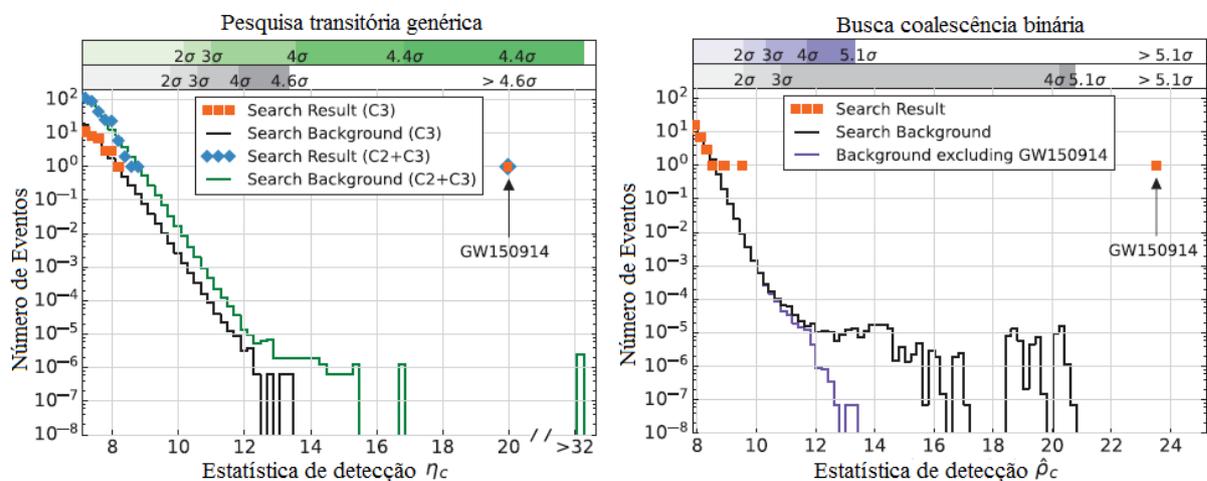


Figura 2.6: Histogramas que mostram o resultado da pesquisa genérica (à esquerda) e a busca de coalescência binária (à direita), número de eventos de candidato (marcadores laranja) e o número médio de eventos de fundo (linhas pretas) na busca da classe onde quantificando quão incomum é GW150914 em comparação com outros "eventos" falsos decorrentes de flutuações de ruído. Esta pesquisa concluiu que um evento de ruído imitando GW150914 seria extremamente raro - menos do que uma ocorrência em cerca de 200.000 anos.

Fonte: adaptado de (ABBOTT et al., 2016).

Segundo Abbott et al. (2016) os detectores LIGO observaram ondas gravitacionais da fusão de dois buracos negros de massa estelar. A forma de onda detectada (primeira detecção) coincide com as previsões da teoria da relatividade geral para a espiral e fusão de um par de buracos negros e o anel inferior do único buraco negro resultante. Essas observações demonstram a existência de sistemas binários de buracos negros de massa estelar.

### 2.4.1 Novas descobertas: Colisão de estrelas de nêutrons

Após relatarem a primeira detecção direta de ondas gravitacionais e a primeira observação de um sistema binário da fusão de buracos negros, pelos detectores LIGO e Virgo (ABBOTT et al., 2016), finalmente, após quase dois anos da primeira detecção, foram observadas as consequências de uma fusão de duas estrelas de nêutrons, tanto visualmente (luz da explosão/ Telescópios do Observatório Europeu do Sul (ESO)/ Chile), quanto por detectores de ondas gravitacionais.

A descoberta de um pulsar de rádio e estrelas binárias de nêutrons (HULSE; TAYLOR, 1975 apud ABBOTT et al., 2017 ) levou a um interesse renovado em estrelas binárias e astrofísica de objeto compacto, incluindo o desenvolvimento de um cenário para a formação de estrelas binárias de nêutrons e os primeiros estudos populacionais.

Em 17 de agosto de 2017 uma estrela binária de nêutrons, candidata a coalescência (designada GW170817), foi observada pelos detectores avançados de ondas gravitacionais LIGO e Virgo. O Monitor de Raios-gama de Fermi Burst detectou de forma independente uma explosão de raios gama (GRB170817A) com um atraso de tempo de 1,7 s em relação à fusão (ABBOTT et al., 2017). Este anúncio confirmou previsões até então, como o fato de que colisões de estrelas de nêutrons gerariam disparos curtos de raios gamas, os quais são umas das emissões mais intensas já vistas no Universo.

Uma extensa campanha de observação foi lançada em todo o espectro eletromagnético, que levou à descoberta de um transiente ótico brilhante, que foi detectado independentemente por várias equipes dentro de uma hora. A articulação e esforço global ao longo de horas, dias e semanas, levou à detecção de radiação gravitacional e eletromagnética de uma única fonte em todo o espectro eletromagnético e bandas de rádio. Estas observações suportam a hipótese de que GW170817 foi produzida pela fusão de duas estrelas de nêutrons em NGC4993, seguido por um sGRB e uma kilonova radioativa energizada pelo decaimento de núcleos de processos “*r*” sintetizados na ejeção (ABBOTT et al., 2017).

Explorando a diferença no tempo de chegada dos sinais em Fermi-GBM (NASA) e INTEGRAL SPI-ACS (SVINKIN et al. 2017 apud ABBOTT et. al, 2017) na área de localização de raios gama, obteve-se informações significativas, conforme mostra a Figura 2.7:

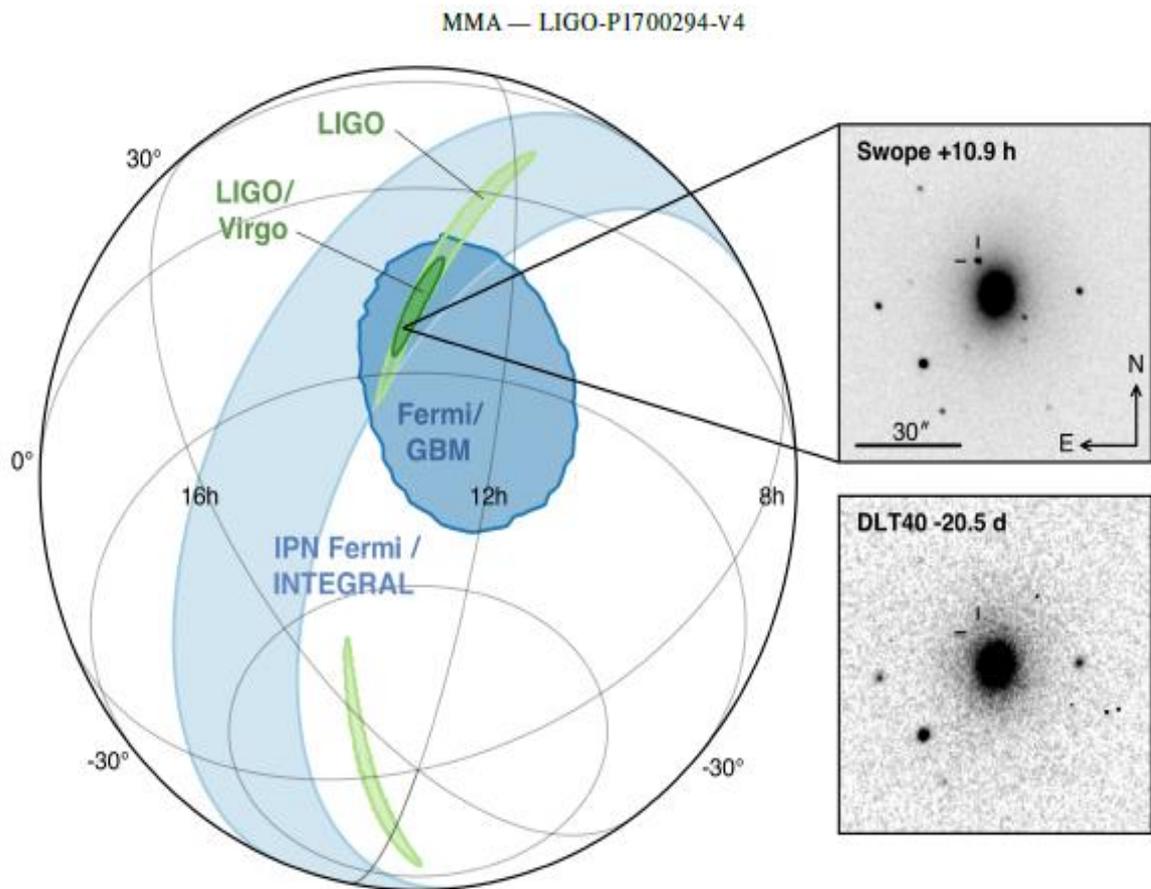


Figura 2.7: Localização da onda gravitacional, raios gama e sinais ópticos. O painel esquerdo mostra uma projeção ortográfica de 90% de regiões credíveis ao LIGO (190 graus<sup>2</sup>, luz verde), a localização inicial de LIGO-Virgo (31 graus<sup>2</sup>, verde escuro), triangulação IPN do intervalo de tempo entre Fermi e INTEGRAL (azul claro), e Fermi GBM (azul escuro). A inserção mostra a localização da aparente galáxia hospedeira NGC4993 na imagem de descoberta óptica Swope em 10, 9 horas após a fusão (superior direito) e a imagem DLT40 pré-descoberta de 20, 5 dias antes da fusão (direita inferior). A retícula marca a posição do transiente em ambas as imagens

Fonte: (ABBOTT et al., 2017)

A Figura 2.8 ilustra as imagens, tomadas por cinco equipes, do transiente da imagem 1M2H durante uma hora (antes do anúncio da SSS17a) usando diferentes estratégias de observação para pesquisar a localização de região de céu do LIGO-Virgo.

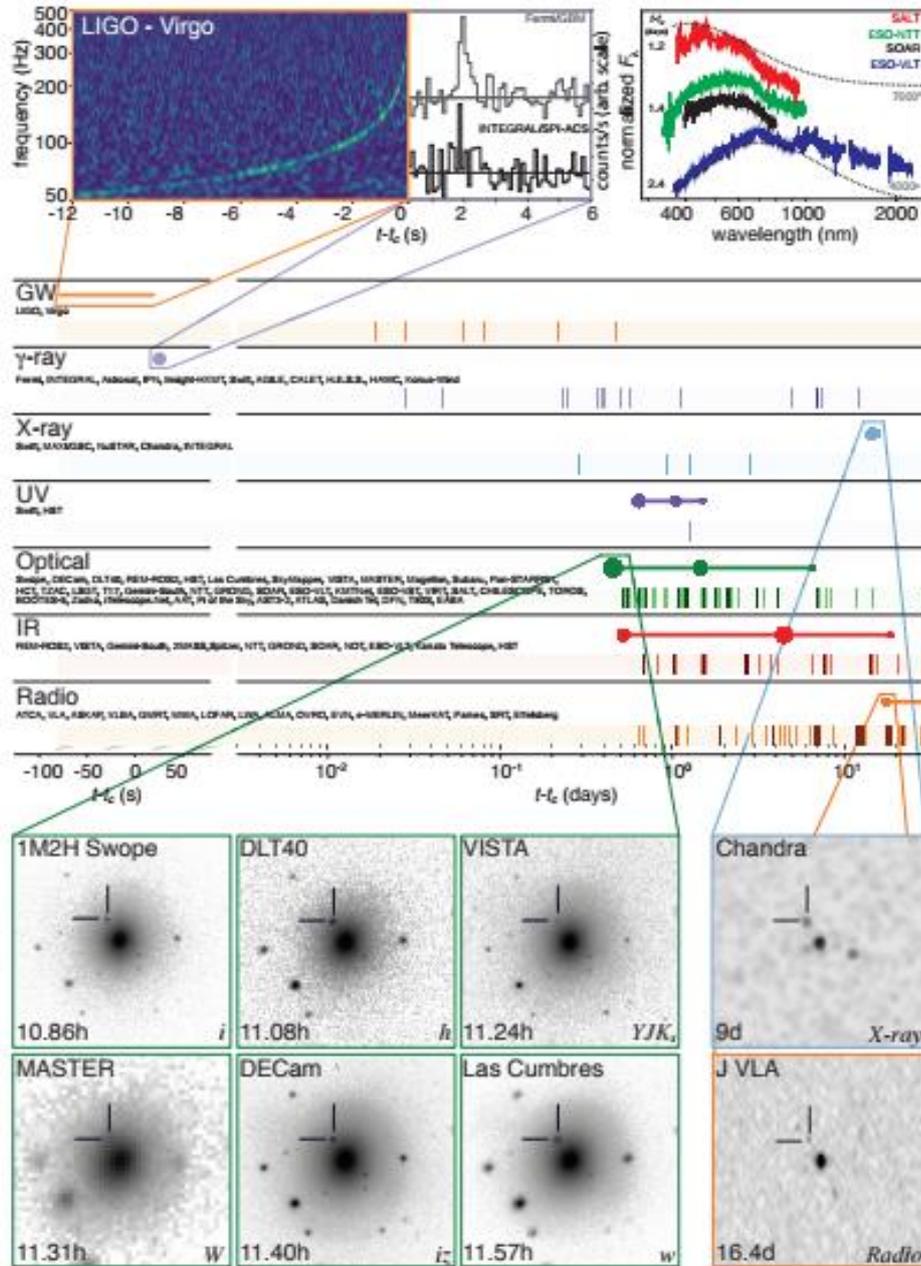


Figura 2.8: Cronograma da descoberta de GW170817, GRB170817A, SSS17a/ AT 2017gfo e as observações de seguimento mostradas por mensageira e comprimento de onda em relação ao tempo “ $t_c$ ” do evento de onda gravitacional. Dois tipos de informações são mostrados para cada banda/ mensageira. Primeiro, os traços sombreados representam os tempos em que as informações foram relatadas em uma circular GCN. Os nomes dos instrumentos relevantes, instalações ou observações das equipes que foram coletadas no início da linha. Segundo, observações representativas em cada banda são mostradas como círculos sólidos com suas áreas aproximadamente dimensionadas pelo brilho; as linhas sólidas indicam quando a fonte foi detectável por pelo menos um telescópio. As indefinições de ampliação dão uma imagem das primeiras detecções na onda gravitacional, raios gama, óptica, raios-X e bandas de rádio.

Fonte: (ABBOTT et al., 2017)

Segundo Abbott et al. (2017) os anúncios do Fermi-GBM e detecções LIGO-Virgo, em especial, a localização tridimensional LIGO-Virgo, desencadearam um momento revolucionário na astronomia. A detecção praticamente simultânea das ondas gravitacionais e dos raios gama permitiu delimitar a origem do sinal um pedaço de céu de aproximadamente o tamanho de cem luas cheias. Isto fez com que cientistas e astrônomos do mundo inteiro se organizassem para tentar observar o objeto. GW170817 localizado para o céu do Sul, definindo no início da noite para os telescópios do hemisfério norte, tornando-os assim inacessível à maioria deles.

A região de localização do LIGO-Virgo tornou-se observável para telescópios no Chile<sup>17</sup> cerca de 10 horas após a fusão com uma altitude acima do horizonte de cerca de 45 graus. (ABBOTT et. al, 2017)

É relevante sinalizar que a partir dessa descoberta inaugura-se a astronomia multimessageira, ou seja, um forma de se estudar os objetos astronômicos envolvendo mais de um método de recepção de informações sobre eles, que observa o fenômeno tanto por ondas gravitacionais como por luz. Essas observações têm implicações vastas, pois os cientistas têm uma ideia melhor do surgimento de elementos químicos pesados, cálculo do número de relevância astronômica e taxa de expansão do universo.

Vale salientar que a combinação da observação das ondas gravitacionais de um objeto e de sua luz associadas oferta um caminho independente e alternativo para estimar tanto a velocidade como a distância dele, bem como, a possibilidade do cálculo da constante de Hubble, valor que representa a taxa de expansão do universo. (ABBOTT et al., 2017).

Cientistas e astrônomos, em todo o mundo, têm a perspectiva de novas detecções similares, associadas ao aperfeiçoamento dos detectores existentes, que possam contribuir com a melhora e nível de precisão da medida e isto possibilite o esclarecimento da ação da energia escura e aceleração do ritmo de expansão do Universo.

---

<sup>17</sup> Esses possibilitaram descoberta do local onde estrelas de nêutrons se fundiram e o registro do brilho deste evento cósmico

## 2.5 DETECTORES DE ONDAS GRAVITACIONAIS

As duas principais técnicas de detecção de ondas gravitacionais são:

a) Interferométricas a laser - onde feixes de luz, que viajam ao longo de braços de grande extensão, são utilizados para monitorar alterações ínfimas entre a distância de espelhos, precisamente posicionadas nas extremidades destes braços, quando uma onda gravitacional passar por este tipo de detector (Figuras 2.9 e 2.10).



Figura 2.9: Observatório do Ligo, em Hanford, Washington - EUA

Fonte: [www.ligo.org](http://www.ligo.org) (acesso em março de 2018)



Figura 2.10: Observatório do Ligo, em Livingston, Louisiana- EUA

Fonte: <https://www.sciencenews.org/article/long-road-detecting-gravity-waves> (acesso em junho de 2018)

b) e por antenas ressonantes massivas<sup>18</sup>, que dentre outros países, possui uma proposta brasileira, o detector Mário Schenberg. Estes tipos de detectores consistem em pesadas antenas esferoidais de cobre-alumínio que operem a temperaturas entre 15 e 20 [mK] (em seu estágio mais avançado), isto é, poucos centésimos de grau acima do zero absoluto (-273,16°C). Nesta condição ocorre o cessamento de quase toda a agitação atômica e, por conseguinte, há uma ausência total de calor.

O detector de massa ressonante brasileiro (Figura 2.11), Mário Schenberg operará entre 3,0 e 3,4 [kHz]. A expectativa é que nessa faixa de frequências, o MS tenha a mesma sensibilidade dos interferômetros de laser, com maiores possibilidades de detecção e menor estimativa de custo.

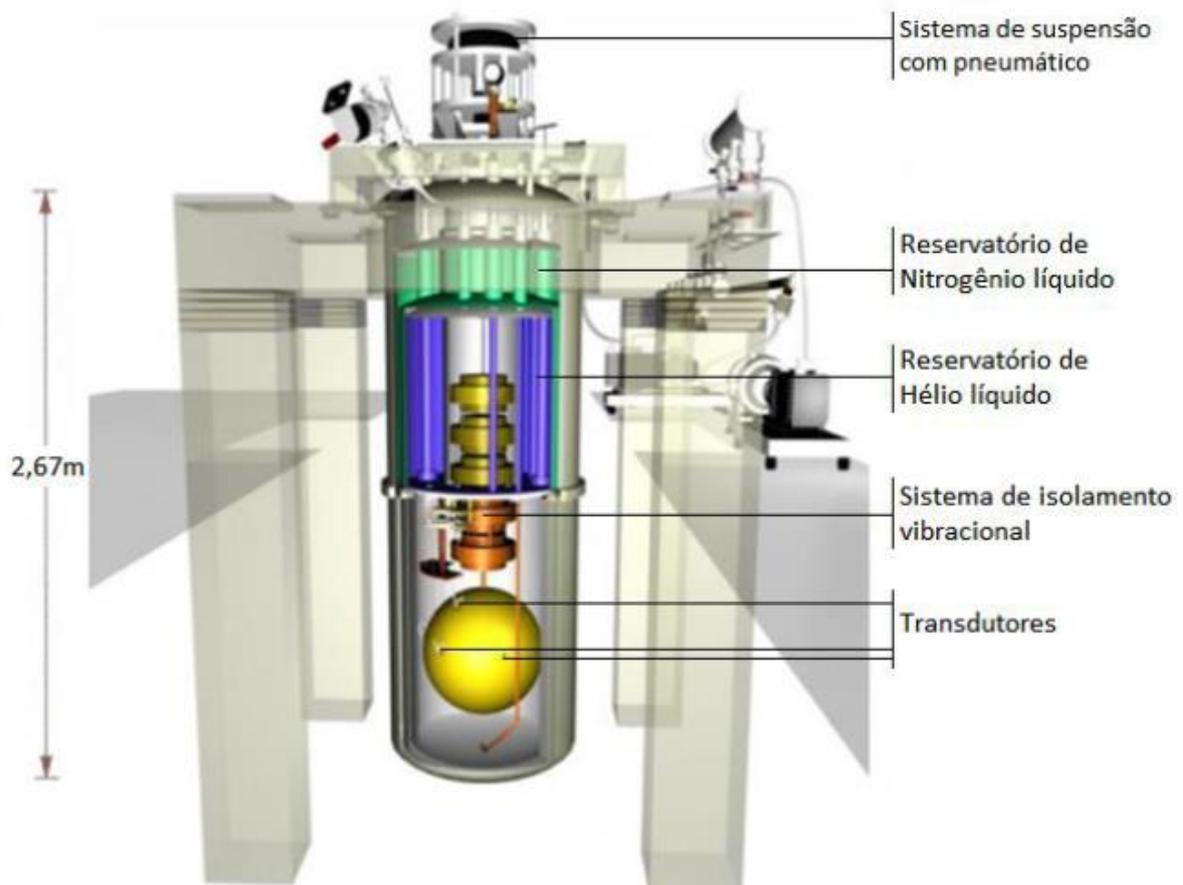


Figura 2.11: Detector por antenas ressonantes massivas - Mário Schenberg

Fonte: (GRATENS, 2012 apud PAULA, 2013)

<sup>18</sup> citando(FRAJUCA, 1996; AGUIAR, 2011; BORTOLI, 2011; RUIZ, 2014; FERNANDES, 2015).

As recentes descobertas da astronomia gravitacional, com a qual se poderá sondar fenômenos e eventos astrofísicos, que permanecem até agora longe de nossa observação, motivam novas pesquisas.

O Detector de Ondas Gravitacionais (OG) Mário Schenberg (MS) se encontra no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Pesquisas recentes, relacionadas ao MS, trazem estudos dos transdutores de monitoramento do movimento da vibração de sua antena ressonante. Estes transdutores paramétricos utilizam as micro-ondas transportadas por cabos coaxiais, os quais estão ligadas ao mundo externo e carregam ruídos sísmicos. Estes estudos fizeram a análise do sistema por modelamento com a utilização do método do elementos finitos, mostrando que a adição de massas ao longo dos cabos coaxiais podem diminuir este ruído, abaixo do ruído térmico do detector quando operando em 50 mK, Figura 2.12 (BORTOLI, FRAJUCA e AGUIAR, 2018).

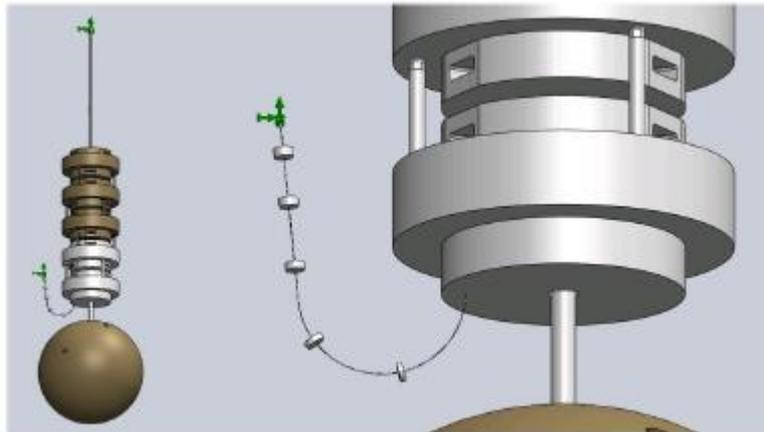


Figura 2.12: Modelo de cabeamento usando o melhor atenuador de cabo em massa (massa 5 está localizado na parte inferior da suspensão) e uma visão geral do suspensão com cabeamento

Fonte: (BORTOLI, FRAJUCA e AGUIAR, 2018)

### 2.5.1 Detectores de interferômetros laser

No detector interferométrico, um laser altamente potente e monocromático é enviado a um divisor de feixe, o qual direciona dois feixes que percorrem caminhos ópticos perpendiculares entre si. Ao final de cada caminho há um espelho preso a uma massa de teste. Ao ser refletido pelos

espelhos os feixes voltam novamente para o divisor onde são recombinados e detectados pelo foto-sensor (NAPOLEÃO, 2013).

A configuração mais simples deste tipo de detector, estudado inicialmente na década de 1970, se baseia no interferômetro de Michelson acrescido de cavidades de Fabry-Pêrot em cada um dos braços, se assemelhando ao experimento executado por Jaseja et al. em 1964 (TIPLER, 2014). Este tipo de detector é um instrumento que utiliza a característica ondulatória da luz para gerar um padrão de interferência. Ele pode ser utilizado para medir comprimentos de onda com grande precisão. A Figura 2.13 mostra esquematicamente, a montagem do interferômetro de Michelson com arranjo experimental de Jaseja et al.:

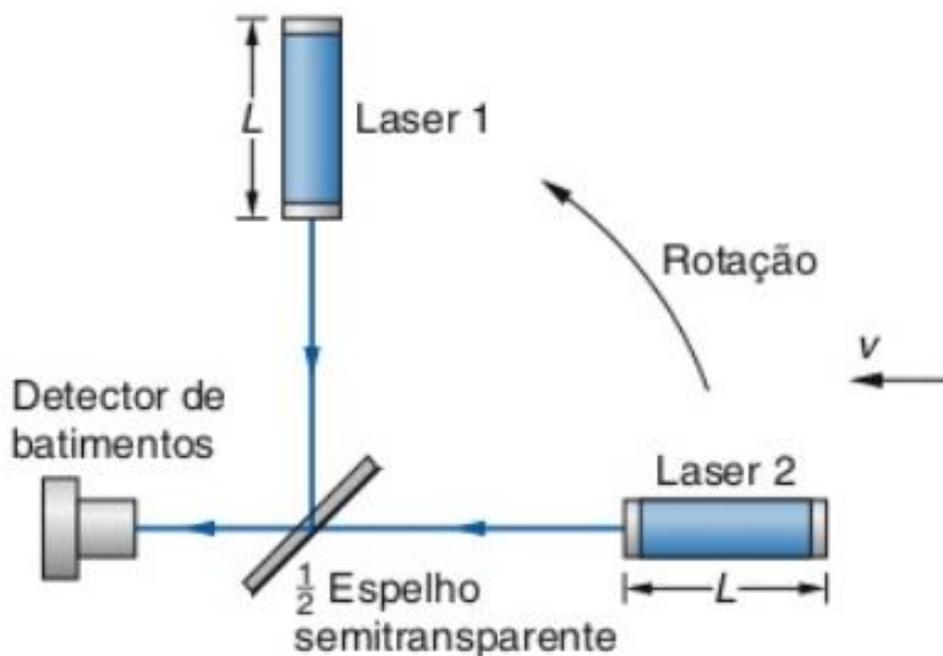


Figura 2.13: Arranjo experimental de Jaseja et al. Para a versão do experimento de Michelson usando lasers

Fonte: Tipler (2014)

Os detectores interferométricos, comparados com os detectores de massa ressonantes esférica, apresentam a vantagem de poder varrer uma grande faixa de frequências, pois possuem uma banda larga de detecção, no entanto, apresentam também desvantagens (BORTOLLI, 2011):

- a) São “cegos” para certas direções e polarizações das OG, quando comparados aos detectores ressonantes de massa esférica;
- b) Não podem responder sobre a quantização das ondas gravitacionais;
- c) Apresentam limitações quanto ao tamanho dos braços devido à curvatura da Terra;
- d) São bem mais caros que os detectores de massa ressonante.

Detectores interferométricos com braços de alguns quilômetros de comprimento encontram-se em operação e em constante desenvolvimento ao redor do mundo. Na Tabela 2.2 estão relacionados os detectores de OG interferométricos com suas principais características (BORTOLLI, 2011; ABBOTT et al., 2016):

Tabela 2.2: Detectores de OG interferométricos e características

Detector e Localização	Tamanho dos Braços (m)	Banda (Hz)	Status	$h$ (Hz) <sup>-1/2</sup>
<b>LIGO I : Advanced LIGO</b> (Hanford, Washington, USA)	4000	40 – 6000	Em modernização	$\sim 6 \times 10^{-22}$
<b>LIGO II : Advanced LIGO</b> (Hanford, Washington, USA)	2000	40 – 6000	Está sendo desmontado	---
<b>LIGO III : Advanced LIGO</b> (Livingston, Louisiana, USA)	4000	40 – 6000	Em modernização	$\sim 5 \times 10^{-23}$
<b>VIRGO : Advanced VIRGO</b> (Piza, Itália)	3000	$10^0 - 10^4$	Em modernização	$\sim 6 \times 10^{-23}$
<b>TAMA</b> (Mitaka, Tokyo, Japão)	300	$10^1 - 10^4$	Em modernização	$\sim 8 \times 10^{-22}$
<b>GEO 600 : GEO HF</b> (Hannover, Alemanha)	600	$10^0 - 10^4$	Em modernização	$\sim 1 \times 10^{-22}$
<b>AIGO</b> (Perth, Austrália)	80 a 4000	---	Em planejamento	---
<b>INDICO</b> (Índia)	---	---	Em estudo de possibilidade	---
<b>LCGT</b> (Japão)	---	---	Telescópio criogênico de grande escala	---
<b>ET (Einstein Telescope)</b> (European Commission, FP7)	---	< 10	2008 início Projeto 2017 início preparação do local	---
LISA Pathfinder (Espacial, ESA)	---	---	Lançado em 2015	---
<b>LISA</b> (Espacial, ESA)	$\sim 5 \times 10^9$	$3 \times 10^{-5} - 0,1$	Entre 2014 e 2020	$< 10^{-23}$

Fonte: (FURTADO, S. – INPE, 2009, ABBOTT et al., 2016)

### 2.5.2 Detectores de antenas ressonante massivas

Os detectores de massa ressonante são constituídos por um corpo metálico massivo (antenas ressonantes massivas), onde os modos fundamentais de vibração são excitados na incidência de um pulso de OG com frequência característica próxima da frequência de oscilação da antena, isto é, as posições relativas das partículas que constituem a massa ressonante sofrem alterações (FRAJUCA, 1996; NAPOLEÃO, 2013).

Segundo Ribeiro (2003), na década de 1960, Joseph Weber construiu um detector que consistia em um cilindro metálico massivo, constituído por uma liga de Alumínio 5056 (AGUIAR; OLIVEIRA JR, 2011-2012), mantido a temperatura ambiente, com isolamento vibracional em uma câmara de vácuo, monitorado por sensores piezoelétricos e cuja frequência longitudinal era de 1,6 Hz.

Foi classificado como a primeira geração detector de OG, utilizando como método de detecção uma massa ressonante, conforme é mostrado na Figura 2.14, abaixo:



Figura 2.14: Detector de massa ressonante de primeira geração de Joseph Weber.  
Fonte: (FURTADO, S., 2009)

De certo, a partir dos trabalhos de Weber e com o objetivo de aumentar a sensibilidade dos detectores de massa ressonante foram

desenvolvidas diversas pesquisas ao redor do mundo, que resultou no surgimento de outras gerações deste tipo de detector (FURTADO, 2009; BORTOLI, 2011):

a) **Detectores de segunda geração:** este tipo de detector foi idealizado e entrou em operação na década de 1980 e sua massa ressonante (cilíndrica sob vácuo) é resfriada a uma temperatura de cerca de 4K (criogênica), utilizando hélio líquido. A partir do procedimento de resfriamento, desenvolvimento de amplificadores de amplitude mecânica, melhorias no sistema vibracional e transdutores mais sofisticados, houve um aumento de sensibilidade dos detectores de segunda geração da ordem de dez mil vezes em relação aos de primeira geração.

b) **Detectores de terceira geração:** eles se distinguem por terem suas massas ressonantes (cilíndrica sob vácuo) resfriadas a temperaturas ultracriogênicas, ou seja, abaixo de 1K (próximas ao zero absoluto). Isto foi possível em razão da utilização da tecnologia de refrigeração por diluição, fazendo com que os mesmos possam atingir a sensibilidade de  $10^{-20} - 10^{-21}$  ( $\text{Hz}^{-1/2}$ ).

c) **Detectores de quarta geração:** surgiram na década de 1990, os mesmos possuem a mesma tecnologia dos de terceira geração, no entanto, se diferenciam por utilizarem massa ressonante esférica (sob vácuo). Neste tipo de detector de OG enquadra-se o Mario Schenberg (Brasil).

Segundo Bortoli (2011) podemos classificar os detectores de massa ressonante conforme a geração, tipo de ambiente e temperatura de trabalho, mostrados na Tabela 2.3:

Tabela 2.3: Classificação dos detectores de massa ressonante.

Geração	Massa Ressonante / Vácuo	Temperatura
Primeira	Cilíndrica	Ambiente
Segunda	Cilíndrica sob vácuo	4 K
Terceira	Cilíndrica sob vácuo	Menor que 0,1 K
Quarta	Esférica sob vácuo	Menor que 0,1 K

Fonte: (BORTOLI, 2011)

A Tabela 2.4, a seguir, relaciona os detectores de massa ressonante existentes com suas características mais relevantes (BORTOLI, 2011):

Tabela 2.4: Características relevantes dos detectores de (OG) de massa ressonante.

Detector, Localização e Classificação (Geração)	Material	Massa (ton.)	Comp. ou Diâmetro (m)	Temp. (K)	Temp. de Ruído( mK)	Transdutor	Frequência (Hz)	Situação Operacional	H ( $10^{-20}\text{Hz}^{-1/2}$ )
<b>ALLEGRO</b> (LSU, Baton Rouge, Louisiana, EUA) 2ª Geração	Al 5056	2,30	3,0	4,2	6	Ressonante Indutivo	900	Inativo	1 - 0,1
<b>EXPLORER</b> (CERN, Genebra, Suíça) 2ª Geração	Al 5056	2,30	3,0	2,0	6	Ressonante Capacitivo	900	Inativo	1 - 0,1
<b>NIOBE</b> (UWA, Perth, Austrália) 2ª Geração	N.B.	1,50	2,50	5,00	1	Ressonante Paramétrico Micro-onda	700	Inativo	50
<b>NAUTILUS</b> (INFN, Frascati, Itália) 3ª Geração	Al 5056	2,50	3,00	0,90	4	Ressonante Capacitivo	900	Ativo	1 - 0,1
<b>AURIGA</b> (Legnaro, Itália) 4ª Geração	Al 5056	2,50	3,00	0,90	1	Ressonante Capacitivo	900	Ativo	1 - 0,1
<b>MARIO SCHENBERG</b> (IPEN, São Paulo, Brasil) 4ª Geração	Cu (94%) e Al (6%)	1,15	0,65	4,20		Ressonante Micro-onda	3200	Teste transdutores e refrigerador por diluição	---
<b>MINI-GRAIL</b> (Laiden, Holanda) 4ª Geração	Cu (94%) e Al (6%)	1,15	0,68	0,05		Ressonante Capacitivo	2900	Teste	---

Fonte: Adaptação (BORTOLI, 2011).

As Figuras 2.15 e 2.16 mostram as imagens dos principais detectores de massa ressonante ao redor do mundo.



Figura 2.15: AURIGA, Itália - Detector de massa de ressonantes do tipo barra (3ª geração)  
Fonte: [http://vintage.portaldoastronomo.org/tema\\_20\\_4.php](http://vintage.portaldoastronomo.org/tema_20_4.php)



Figura 2.16: EXPLORE, Suíça - Detector de massa de ressonantes do tipo barra (3ª geração)  
Fonte: [http://members.ift.uam-csic.es/bellido/gravitacion/exp/GW\\_en.html](http://members.ift.uam-csic.es/bellido/gravitacion/exp/GW_en.html)

As Figuras 2.17 e 2.18 ilustram as imagens alguns dos principais detectores de massa do tipo esfera ressonante ao redor do mundo



Figura 2.17: MINIGRAIL, Holanda - Detector de massa de ressonante do tipo esférico (4ª geração).

Fonte: [http://members.ift.uam-csic.es/bellido/gravitacion/exp/GW\\_en.html](http://members.ift.uam-csic.es/bellido/gravitacion/exp/GW_en.html)



Figura 2.18: MÁRIO SCHENBERG, Brasil - Detector de massa de ressonante do tipo esférico (4ª geração).

Fonte: [http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod\\_Noticia=808](http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=808)

A recente descoberta do aLIGO trouxe um novo impulso para continuidade e modernização e aprimoramento em pesquisas com detectores de ondas gravitacionais e o detector Mário Schenberg, que utiliza uma antena esférica de massa ressonante, comparados com os atuais detectores de interferômetros laser convencionais e os de barra, possui grandes vantagens (FRAJUCA, BORTOLI, e AGUIAR, 2018).

Os detectores de ondas gravitacionais são gravímetros altamente precisos.

Nesta perspectiva, Frajuca e Fernandes (2015) enfatizam a importância da longa experiência obtida em detectores de antena esférica/ massa ressonante ao redor do mundo, tais como os grupos: do INFN em Padova e Roma, na Itália; da *University of Western Australia* (UWA) em Perth, na Austrália; da *Louisiana State University* (LSU), nos EU; e a antena gravitacional super-resfriada Mario Schenberg, abrigada no LESBT/USP desde a década de 90, do projeto GRÀVITON liderado no Brasil por O. D. Aguiar (INPE, 2012), atualmente no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

## 2.6 DETECTOR MÁRIO SCHENBERG

O grupo GRAVITON formado por colaboradores de várias instituições brasileiras (INPE, USP, IFSP, ITA e UNICAMP) e, por algumas instituições internacionais (*Leiden University* e UWA) foi responsável pelo projeto e construção do primeiro detector de (OG) brasileiro, nomeado como Mario Schenberg<sup>19</sup>.

Ressalta-se, que Mario Schenberg é um detector de massa ressonante esférico de quarta geração, sua massa (ou antena) esférica possui 1,15 toneladas e 65 cm de diâmetro e é constituída por uma liga de cobre-alumínio com 94% de cobre e 6% de alumínio (BORTOLI, 2011), o mesmo deverá atingir a sensibilidade  $h \sim 10^{-22}$  ( $h = 2\delta l/l$ ) em uma banda passante de 50 Hz, em torno de 3200 Hz, quando estiver operando a temperaturas da ordem de 0,05 K (SOUZA, S. T., 2012).

No Laboratório de Estado Sólido e Baixas Temperaturas do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (LESBT/IFUSP) é possível obter uma visão geral do

---

<sup>19</sup> Atualmente, o projeto é financiado pela FAPESP, CAPES, CNPq e MCT (AGUIAR (2012)). O nome do detector foi escolhido em homenagem ao físico e ex-professor do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP), o brasileiro Mario Schenberg (1914-1990), um dos pioneiros da física teórica e da astrofísica moderna no Brasil (NAPOLEÃO, 2013).

detector de OG Mario Schenberg<sup>20</sup> e algumas de suas partes em 3D e imagem real do mesmo, conforme Figuras 2.19 e 2.20.

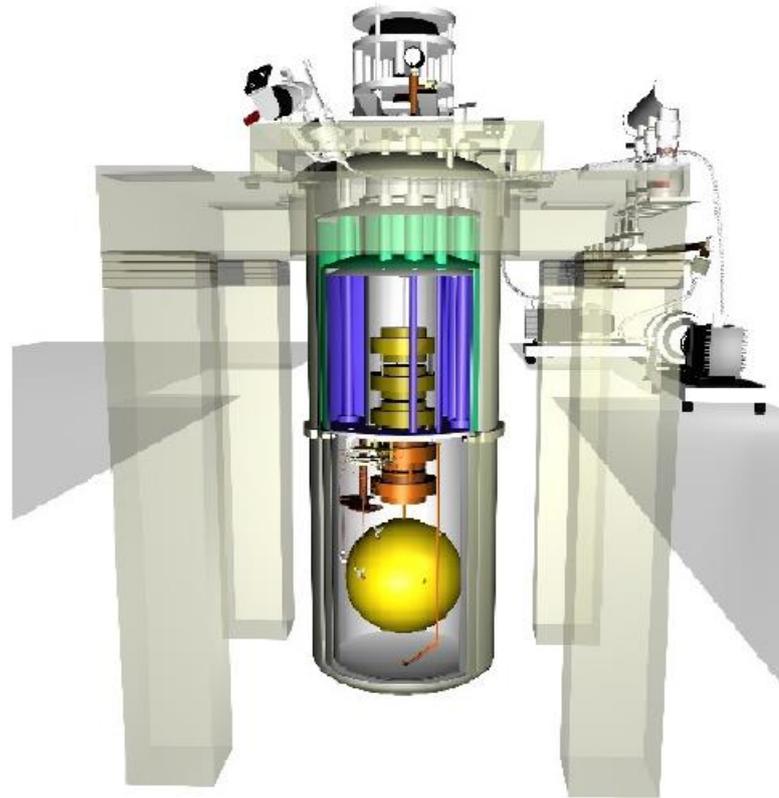


Figura 2.19: Visão geral do detector de Ondas Gravitacionais Mario Schenberg com algumas de suas partes.  
Fonte: (BORTOLI, 2011)



Figura 2.20: Detector de OG Mário Schenberg no LESBT/IFUSP.  
Fonte: (SOUZA, 2012)

<sup>20</sup>O Detector de Ondas Gravitacionais (OG) Mário Schenberg se encontra atualmente no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (OLIVEIRA, Nei F.; AGUIAR, Odylio D., 2016).

## 2.7 ANCESTRALIDADE: PROTÓTIPOS DE CALIBRADORES DE GRAVÍMETROS

Protótipos construídos anteriormente, nesta mesma linha de pesquisa, atingiram velocidades menores do que a esperada, pois apresentaram problemas com ajustes e excentricidade - atribuídos a imprecisões de fabricação e montagem, e desbalanceamento e instabilidade - em razão de vibrações (FERNANDES, 2015).

Fernandes (2015) acredita que a construção de um dispositivo que produza sinais de ondas gravitacionais em escala laboratorial/ experimental, se enquadre na classe das máquinas de alta velocidade (MAV). Nesta perspectiva foi proposto por Fernandes (2015) diretrizes para o projeto do calibrador do detector Mário Schenberg, embora o protótipo do mesmo tenha obtido nos experimentos velocidades limitadas a 12.000 RPM, as diretrizes propostas foram parcialmente validadas.

Com base nas informações iniciais e sugestões para trabalhos futuros de Fernandes (2015), o objetivo/desafio motivacional deste trabalho é projetar e construir um protótipo de dispositivo para calibração de gravímetros modular (PDCG-M) que tenha a eficácia de girar a rotações próximas de 10.000 RPM (167 Hz) e com o desenvolvimento contínuo do protótipo possa alcançar rotações de 96.000 RPM (1600 Hz), com o propósito de gerar sinais gravitacionais em proporcionalidade laboratorial conhecida, possibilitando a calibração de detectores de massa ressonante, principalmente o detector brasileiro, Mário Schenberg e a medição da velocidade de interação gravitacional por antenas ressonantes massivas.

O dispositivo consiste em um MAV com duas massas girantes em alta frequência, que irá trabalhar no vácuo e posteriormente em conjunto com o projeto de detecção de ondas gravitacionais do Brasil, Mário Schenberg. O objetivo é obter uma rotação próxima de 100.000 RPM (1667 Hz ou ciclos por segundos) para essas duas massas girantes.

A construção de um dispositivo de alta rotação para produção de sinais gravitacionais em escala experimental requer conhecimento tecnológico avançado, especialmente nos aspectos da física moderna e tecnologia de mecânica de precisão.

Estas necessidades vêm de encontro das afirmações de Fernandes (2015) que verificou nos experimentos de seu protótipo, problemas com ajustes e folgas,

excentricidade, atrito, vibrações e desbalanceamento, atribuídos a imprecisões de fabricação (MIRSHAWSKA, 1941) e montagem. Fernandes (2015) obteve nos seus experimentos velocidades limitadas a 12.000 RPM, parcialmente validadas, propondo diretrizes para futuras pesquisas.

Padovani (2012) propôs um modelo e estrutura mecânica, para um protótipo de calibração de gravímetros, conforme mostra a Figura 2.21:

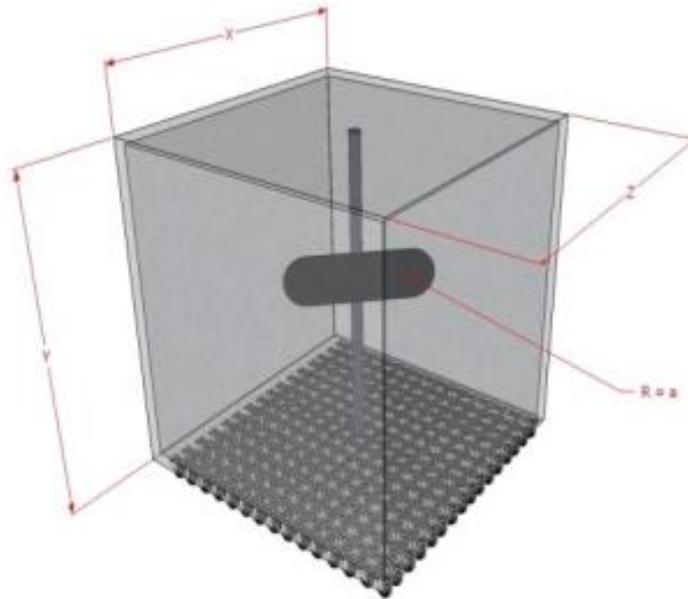


Figura 2.21: Desenho esquemático da estrutura mecânica do protótipo.

Fonte: (PADOVANI, IFSP - 2012)

Padovani (2012) descreve o seguinte:

“Esta estrutura será o protótipo responsável pela geração de um sinal gravitacional de maré periódico, que produzirá um sinal para ser detectado pelo detector brasileiro, a pá central que girará em torno do próprio eixo com uma frequência de 15 Hz.”

Para o cálculo das dimensões desta estrutura utiliza-se a fórmula a seguir, Equação 2.3:

$$R^2 \cdot \omega^2 = 2 \cdot \frac{\sigma}{\rho} \quad (2.3)$$

Em que:

$R \rightarrow$  é o raio de giro [m]

$\omega \rightarrow$  é a velocidade angular [rad./s],

$\sigma \rightarrow$  é a tensão de ruptura do material [Pa] e

$\rho \rightarrow$  é a massa específica do material [kg/m<sup>3</sup>].

Considerando o protótipo, onde dois corpos de massas  $M$  giram fixos a um raio ( $a$ ) em torno de um eixo deslocado de uma distância ( $r$ ) de um sistema de detecção tal como ilustrado na Figura 2.22:

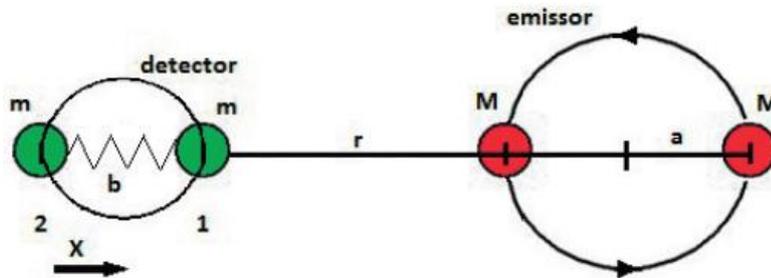


Figura 2.22: Sistema formado por duas massas girantes e o detector formado por duas massas  
Fonte: (RUIZ et al., IFSP - 2014)

Analisando a Equação 2.7, segundo Ruiz (2014) e considerando o balanceamento do sistema, conclui-se que se este protótipo, pode operar com alta velocidade angular, gerando um sinal de menor comprimento de onda, com o detector posicionado a uma distância “ $r$ ”, possibilitando assim a calibração do detector.

Frajuca e Ruiz (2014) descrevem como avaliar o sinal newtoniano gerado a partir das excitações causadas pelo giro das massas  $M$  do gerador sobre a massa  $m_1$  e  $m_2$  (Figura 2.22), temos as forças de interação (Força de maré) sobre as massas  $m_1$  e  $m_2$  dadas respectivamente por (Equações 2.4 e 2.5):

$$F_{1x} = -GMm \left( \frac{1}{[r - a \cos(\omega t)]^2} + \frac{1}{[r + a \cos(\omega t)]^2} \right) \quad (2.4)$$

$$F_{2x} = -GMm \left( \frac{1}{[r - b - a \cos(\omega t)]^2} + \frac{1}{[r - b + a \cos(\omega t)]^2} \right) \quad (2.5)$$

Em que:

- $G$  → constante gravitacional de Newton;
- $M$  → massa da esfera girante;
- $m$  → massa efetiva do detector;
- $\omega$  → velocidade angular de rotação da massa;
- $a$  → raio de rotação da esfera girante;
- $r$  → distância entre o detector e a massa girante;
- $b$  → comprimento efetivo do detector;

Após aproximações e associando as forças de interação sobre o sistema (LINARES, 2016), temos o sinal de entrada variante no tempo, aplicado ao sistema oscilador dado por (Equação 2.6):

$$F_{1x} - F_{2x} \approx - \frac{GMm 32 ba^2 \cos^2(wt)}{r^5} \quad (2.6)$$

Dessa forma, aplicando esse sinal ao detector, considerando ele um oscilador harmônico com excitação forçada, tem a expressão para o sinal de saída (LINARES, 2016) dado por (Equação 2.7):

$$\frac{\Delta b}{b} \approx h \approx QGM \left( \frac{16 a^2 b^2}{r^5 w^2} \right) \cos^2(wt) \quad (2.7)$$

Em que:

Q → Representa o fator de qualidade mecânico apresentado pela matéria do detector;

De acordo com Fernandes (2015), o Dispositivo de Calibração Mário Schenberg (DCMS) enquadra-se na classe de Máquinas Rotativas de Alta Velocidade<sup>1</sup> (MAV). O projeto e a fabricação de uma MAV trazem importantes desafios e o envolvimento de diversas áreas do conhecimento e das engenharias, bem como, a busca de soluções para problemas de perdas mecânicas, elétricas e magnéticas, e tensões mecânicas extremas oriundas das altas forças centrífugas.

Fernandes (2015) apresenta em seu trabalho amplo estudo e diretrizes para o projeto do DCMS abordando propostas em função dos principais desafios a serem vencidos para a construção de tal dispositivo (Figura 2.23), tais como:

a) Estrutura de proteção/ blindagem com materiais balísticos: garantia contra riscos inerentes às altas velocidades, eliminação da resistência aerodinâmica e para operação do DCMS dentro de uma câmara de vácuo;

b) Modelo de mancal: tipo magnético passivo híbrido de ímãs permanentes desenvolvido em Pavani (2014);

c) Projeto do rotor (reforçado): sistema de acinturamento dos objetos girantes com fibra de carbono, suportados por uma estrutura em forma de disco feita de um compósito de fibra de carbono em resina epoxídica, para suportar elevada carga centrífuga advinda das altas rotações;

d) Acionamento: direto do rotor (*direct drive*) com um motor de relutância variável (MRV) controlado por um sistema eletrônico e algoritmo de controle avançados;

e) Dinâmica do rotor: evitar, ou pelo menos atenuar, as vibrações que causam instabilidades no rotor e frequentemente impedem o atingimento de altas velocidades.

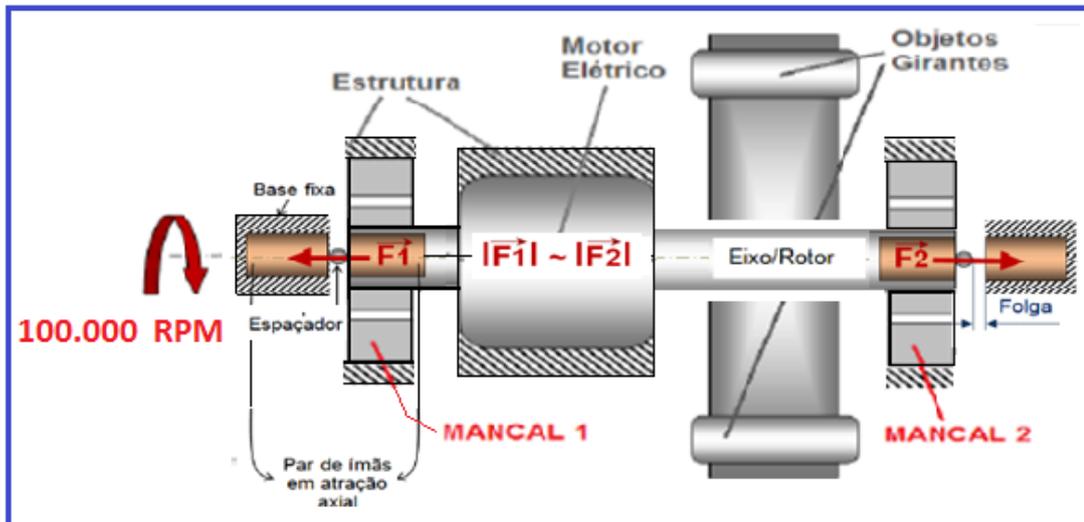


Figura 2.23: Adaptação - Esboço esquemático do DCMS.  
Fonte: (FERNANDES, 2015)

Nesta mesma perspectiva Linares (2016) propôs uma Suspensão Magnética com Motorização para Medição da Velocidade da Interação Gravitacional, sugerindo algumas modificações no projeto, conforme Figura 2.24:

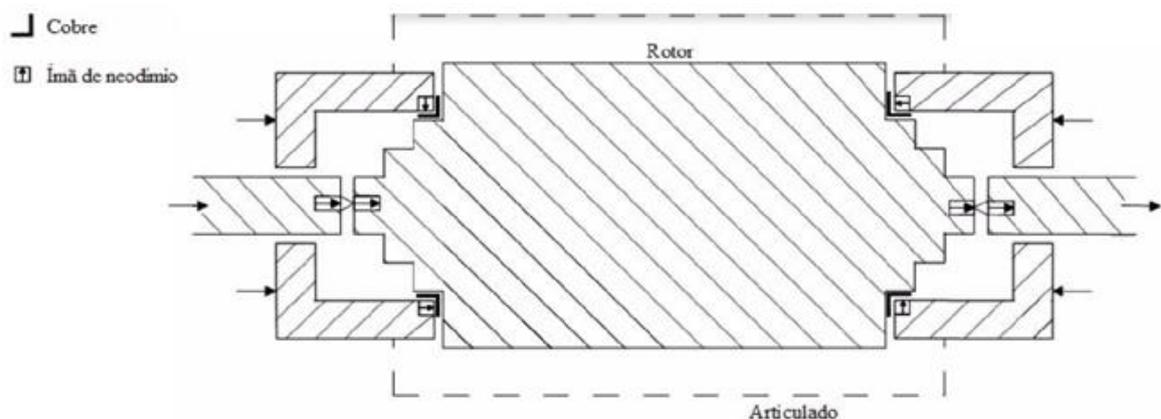


Figura 2.24: Adaptação - Esboço esquemático da suspensão magnética com motorização para medição da velocidade da interação gravitacional

Fonte: (LINARES, 2016)

## 2.8 ANÁLISE VIBRACIONAL

A base da análise vibracional tem como princípio a ideia de que as estruturas das máquinas apresentam modos normais de vibração, provenientes da excitação dos esforços dinâmicos, cuja frequência é idêntica àquela dos esforços que o tenham provocado, isto é, ressonância, (MIRSHAWKA, 1941; MEIROVITCH, 2001) e a soma das respostas vibratórias da estrutura corresponde à medida global dos esforços excitadores tomada em algum ponto.

Segundo Mirshawka (1941) são múltiplos os parâmetros que se podem contribuir na medida de uma vibração transmitida por uma estrutura sob o efeito de esforços dinâmicos, que podemos separar em três grupos:

**1º Grupo:** características da estrutura e fixação de equipamentos que exercem respectivamente a “Função de Transferência” (massa, rigidez e coeficiente de amortecimento) e que modifica a intensidade (oposição às vibrações);

**2º Grupo:** diz respeito às características da “cadeia de medida” (invariáveis de uma medida para outra), instrumentos (sensores) de análise de sinais (posição e fixação do transdutor sobre a máquina) e desempenho dos equipamentos ou aparelhos analisados;

**3º Grupo:** elementos diretamente ligados à intensidade dos esforços dinâmicos que fazem nascer à vibração (velocidade de rotação e potência absorvida); e estado das ligações da cadeia cinemática (mancais, rolamentos, alinhamento, desbalanceamento etc.).

Ainda segundo Mirshawka (1941) a natureza das vibrações mecânicas, embasado no conhecimento teórico da Física (MEIROVITCH, 2001; TIPLER, 2014), podem ser estudadas por diversos métodos, utilização de equipamentos de análise sofisticados e níveis diferenciados de conhecimento, onde podemos destacar: a técnica de ressonância, a análise espectral e a medida global.

A técnica de análise vibracional (MIRSHAWKA, 1941) progrediu a partir do destaque de parte destes estudos, ou seja:

a) **Estudo da medida do valor global:** que é um método de análise temporal aproximado do sinal, mensurando a amplitude avaliada de diversas formas e fazendo abstração do parâmetro frequencial;

b) **Estudo da análise espectral:** onde as medidas vibracionais são trabalhadas no domínio frequencial.

Na Figura 2.25 são mostrados os gráficos das amplitudes de sinais simples e complexa no domínio espaço tempo.

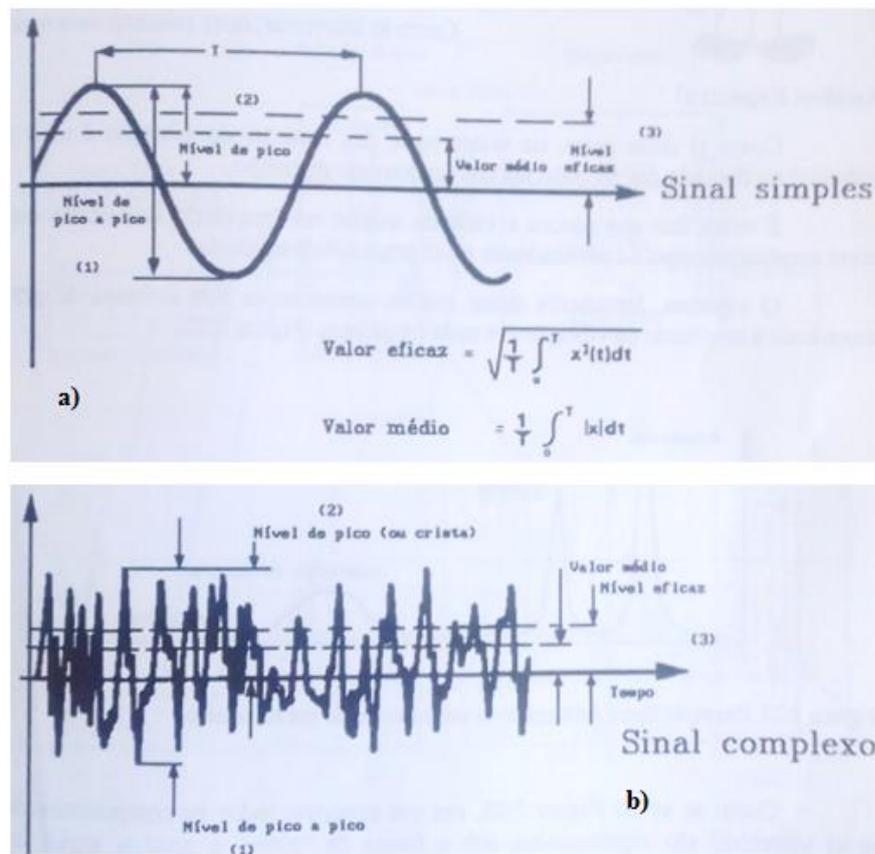


Figura 2.25: Amplitudes de sinais de onda a) simples e b) complexa no domínio espaço tempo

Fonte: Mirshawka (1941)

Importam dessa maneira, segundo Mirshawka (1941), Meirovitch (2001), Kardec e Nascif (2013):

a) O **valor pico a pico**, ou seja, mede-se a amplitude máxima da onda fundamental, que é útil;

b) O **valor de crista** (ou de pico), importante para indicar, por exemplo, o nível de um choque de curta duração;

c) O **valor eficaz**, medida que leva em conta a avaliação do valor das componentes harmônicas diretamente relacionadas ao conteúdo energético da vibração.

Os analisadores de frequência, que utilizam a Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* – FFT), que efetuam uma transformação sincronizada do

tempo e calculam a média das amplitudes, processam a filtragem de sinais digitais do domínio tempo para o domínio frequência (MIRSHAWKA, 1941; MEIROVITCH, 2001).

Nesta mesma perspectiva, Kardec e Nascif (2013) afirmam que análise vibracional é uma técnica preditiva que, "*monitorando as principais variáveis dos equipamentos, indica se é necessária a atuação, a qual só é realizada com base na modificação de parâmetros de condição ou desempenho*".

Analisadores de vibração de campo, utilizam a **análise espectral**, onde o nível **amplitude/ tempo** é convertido em nível **amplitude/ frequência** ( *o espectro é apresentado na forma de gráficos*), Figura 2.26.



Figura 2.26: Espectro da Análise e geração de Gráfico pela FFT

Fonte: [www.mat.ufmg.br](http://www.mat.ufmg.br) (acesso em outubro de 2016)

Os analisadores de vibração de campo medem deslocamento [ $\mu\text{m}$ ], velocidade [ $\text{m/s}$ ], aceleração [ $\text{m/s}^2$ ], onde segundo a Teoria de Análise Vibracional (MIRSHAWKA, 1941), as interpretações dos espectros de frequência, são analisados da seguinte forma: na primeira harmônica (1ª HSM) significa **desbalanceamento**, na 2ª HSM revela **empenamento** (\*deflexão) e na 3ª HSM implica em **falta de rigidez**, e se tivermos mescladas 1ª + 2ª HSM significam **desalinhamento**.

A Figura 2.27 ilustra um analisador de vibração de campo



Figura 2.27: Analisador de Vibração de Campo Vaibro®

Fonte: <http://www.vaibro.com.br/home/produtos/analise-vibracoes/vaibroSmart-ch1.html>

A medição da vibração geralmente significa um levantamento do espectro de frequência para determinar se uma falha está emergindo, por exemplo (Figura 2.28), nos rolamentos, em engrenagens ou da lubrificação (DESIMONE, 2015).

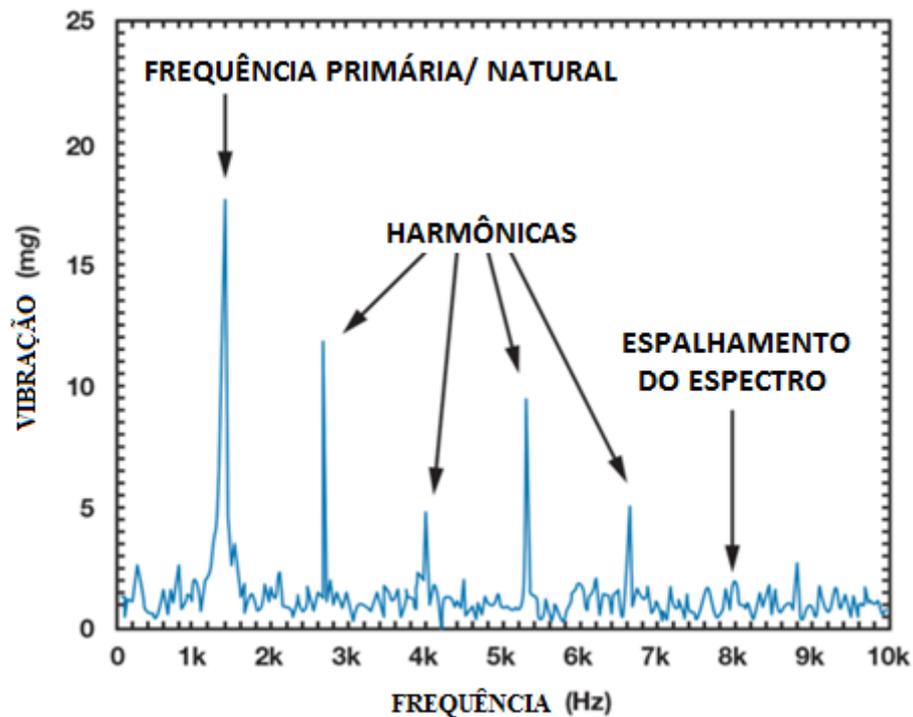


Figura 2.28: Espectro de Frequência de um Rolamento

Fonte: Adaptado de Desimone (2015)

Ainda segundo Desimone (2015), um analisador de vibração deve possuir um sensor (piezoelétrico) com requisitos de desempenho capaz de captar ruídos ultra

baixos, maior operação de frequência (“ver” o ruído do equipamento além de outros artefatos) e RMS (Root Mean Square) superior, ou seja, valor médio quadrático ponderado em frequência de aceleração ao qual estão expostos os membros superiores. A Figura 2.29 apresenta o fluxograma de funcionamento de um analisador de vibração.

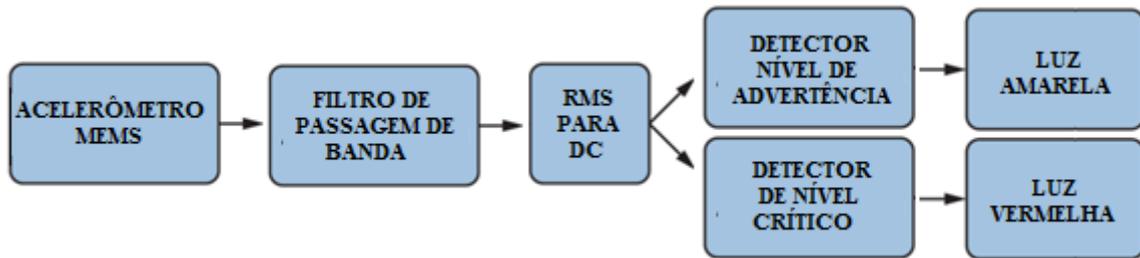


Figura 2.29: fluxograma de funcionamento de um analisador de vibração

Fonte: Adaptado de Desimone (2015)

A aceleração é proporcional ao quadrado da frequência para um deslocamento dado, ou seja, a vibração de alta frequência produz muita aceleração (Equação 2.8):

$$A_{p-p} = D_{p-p} \times \omega^2 \quad (2.8)$$

A classificação adotada para a severidade vibratória (NORTON, M., KARCZUB, D., 2003) é feita em função da potência do acionamento, da velocidade de rotação do protótipo em estudo, bem como do nível de criticidade vibratória (Tabelas 2.5, 2.6 e 2.7). Referências: VDI 2056, ISO 10816-3 (antiga 2372), ISO 2373, DIN 45665.

Tabela 2.5: Classificação de severidade conforme potência do motor da máquina

Classes	Faixas de Potências do Motor (kW)
I	0 a 15
II	15 a 75
III	75 a 300
IV	acima de 300

Tabela 2.6: Níveis de criticidade vibratórias

Classe	(N) Normal [mm/s]	(P) Permissível [mm/s]	(A) Alerta [mm/s]	(C) Crítico [mm/s]
I	0,18 a 0,71	0,71 a 1,80	1,80 a 4,50	acima 4,50
II	0,18 a 1,10	1,10 a 2,80	2,80 a 7,10	acima 7,10
III	0,18 a 1,80	1,80 a 4,50	4,50 a 11,2	acima 11,2
IV	0,18 a 2,80	2,80 a 7,10	7,10 a 18,0	acima 18,0
Código				

Tabela 2.7: Níveis de criticidade vibratórias – ISO 10816-3

**ISO 10816-3 Lista Severidade nas medições de Vibrações**

								VELOCIDADE	
								11	0,43
								7.1	0,28
								4.5	0,18
								3.5	0,14
								2.8	0,11
								2.3	0,09
								1.4	0,06
								0.71	0,03
								mm/s rms	cm/s rms
Rígida	Flexível	Rígida	Flexível	Rígida	Flexível	Rígida	Flexível	Tipo de Fixação	
Bombas > 15 KW Radial, Axial				Maquinas 15 KW<300KW		Maqui. Grand 300 KW<P<50MV		Classificação de Maquinas	
Motor Integrado		Motor Exterior		Motor 100mm<H<315		Motor 315mm=<H			
Grupo 4		Grupo 3		Grupo 2		Grupo 1			
A	Vibrações de máquinas novas durante sua recepção						C	As máquinas podem ser utilizadas durante um período de tempo limitado	
B	As máquinas podem ser utilizadas sem restrição						D	As vibrações são perigosas podendo ter consequências negativas para as máquinas	

Entre os fenômenos que podem provocar picos de vibração, cujas frequências estão ligadas àquela do rotor, pode se citar o desbalanceamento, o desalinhamento, o mau ajuste mecânico, avarias etc. O fenômeno de desbalanceamento é a causa mais comum destas vibrações. Por exemplo, na construção de um rotor é impossível “equilibrá-lo” completamente, apesar do cuidado com que é construído, haverá sempre uma vibração na frequência de rotação cuja amplitude é diretamente

proporcional à grandeza de desbalanceamento e ao quadrado da grandeza de rotação (MIRSHAWKA, 1941; KARDEC e NASCIF, 2013).

## 2.9 ARDUÍNO: BREVE INTRODUÇÃO SOBRE A PLATAFORMA

O Arduino é uma plataforma de *hardware* e *software open source* (fonte aberta que pode ser copiada, modificada e comercializada), programável, que trabalha com linguagem de programação compatível com a linguagem "C" e "C++" em um ambiente de desenvolvimento integrado (RAMOS et. al, 2014), que permite interagir com o mundo físico (luzes, motores etc.), tanto com programas residentes no próprio Arduino, quanto utilizando este como interface entre o mundo físico e um computador ou com outras plataformas de desenvolvimento. O Arduino é uma plataforma de baixo custo comparado a outras plataformas de desenvolvimento e os originais italianos que mais se destacam são: Uno, Mega e o Leonardo.

Para ilustrar, a seguir as duas placas mais utilizadas, Figuras 2.30 e 2.31:



Figura 2.30: Placa de Arduino UNO

Fonte: (www.EADuino.com.br) acesso em dezembro 2017



Figura 2.31: Placa de Arduino LEONARDO

Fonte: (www.EADuino.com.br) acesso em dezembro 2017

Segundo (RAMOS et al, 2014), o ambiente de desenvolvimento Arduíno, responsável pela transformação do código escrito em algo que o microcontrolador possa entender, é um software que contém um editor de texto com os recursos necessários para escrever um programa, compilá-lo e transferi-lo para a placa Arduíno. Este software também possui uma área de mensagens, uma barra com botões para funções mais comuns e uma série de menus. A transferência do programa para a placa se dá através de um cabo USB, conectando o seu computador com a placa Arduíno. Os programas ou *scripts* escritos para Arduíno são chamados de *sketches* (esboços).

A ilustração a seguir mostra o ciclo de desenvolvimento do programa, Figuras 2.32:

:

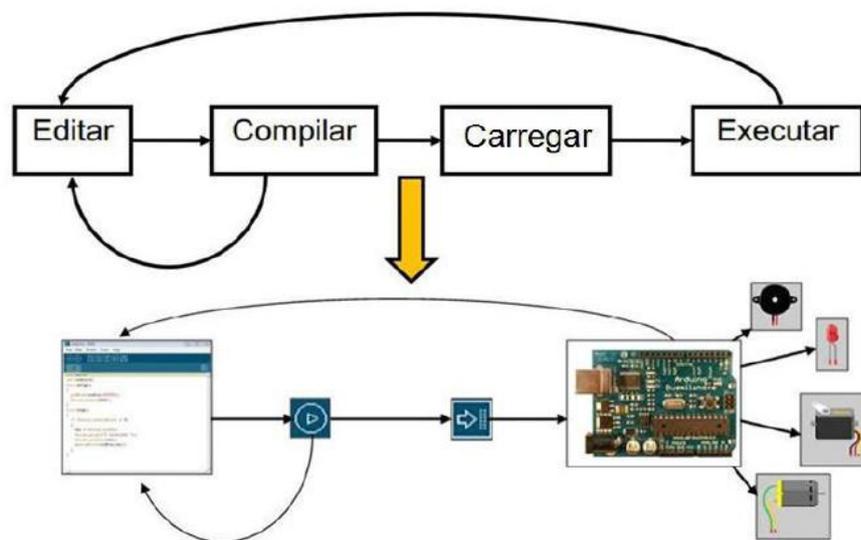


Figura 2.32: Ciclo de desenvolvimento do programa no Arduíno  
Fonte: (RAMOS et. al, 2014)

Podemos também acoplar ao Arduíno *Shields* e *Bricks*, que são placas que ampliam e estendem as funcionalidades da placa base (RAMOS et al., 2014), conforme ilustra a Figura 2.33.

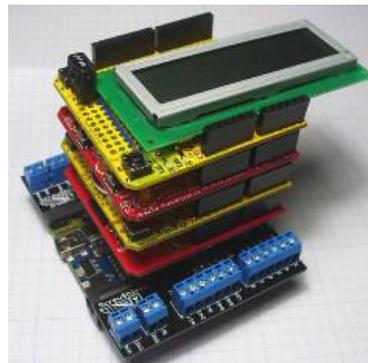


Figura 2.33: Ilustração de Shields de extensão de funcionalidade do Arduíno  
Fonte: (www.shieldlist.org) acesso em dezembro 2017

## 2.10 LEI DE LENZ

A lei de indução de Faraday diz que uma força eletromotriz (FEM) e uma corrente elétrica podem ser induzidas em uma espira quando o número de linhas de campo magnético que atravessam a espira varia (HALLIDAY e RESNICK, 2013). Em complemento à lei de Faraday, a lei de Lenz diz que, um sistema como um espira ou conjunto de espiras reage à variação do fluxo de campo magnético no sentido de anular a causa dessa variação (TELLES; NETTO, 2015). A lei de Lenz determina o sentido da corrente induzida em uma espira (Figura 2.34), conforme enunciado a seguir:

“A corrente induzida em uma espira tem um sentido tal que o campo magnético produzido pela corrente se opõe ao campo magnético que induz a corrente” (HALLIDAY e RESNICK, 2013).



Figura 2.34: Aplicação da lei de Lenz  
Fonte: (HALLIDAY e RESNICK, 2013)

Segundo Serway e Jewett Jr (2011) um fluxo magnético variável induz uma *fem* e uma corrente numa espira condutora, que por sua vez cria um campo elétrico induzido. Esse campo elétrico que aplica uma força sobre as cargas para fazer que se desloquem. Conforme descrito na Lei de Indução Eletromagnética de Faraday, uma corrente elétrica pode ser produzida por um campo magnético que varia no tempo, ou seja, a lei da indução eletromagnética pode ser interpretada da seguinte maneira: um campo elétrico é sempre gerado por um fluxo magnético variável, mesmo no vácuo onde nenhuma carga está presente.

Utilizando os princípios da Lei de Lenz podemos obter uma levitação ou suspensão magnética, conforme perspectiva do trabalho de Linares (2016) que propôs uma

Suspensão Magnética com Motorização para Medição da Velocidade da Interação Gravitacional. A Lei de Lenz foi demonstrada em um experimento por Furukawa (2014), onde o mesmo utilizou uma bateria, um disco de alumínio acoplado a um motor elétrico e uma haste com um ímã de neodímio preso na extremidade, conforme Figura 2.35.

O disco de alumínio é um material condutor, isto é, possui elétrons livres. São estes elétrons que gerarão as correntes no disco. Outra propriedade do alumínio é que o mesmo é paramagnético, ou seja, não apresenta propriedades ferromagnéticas.

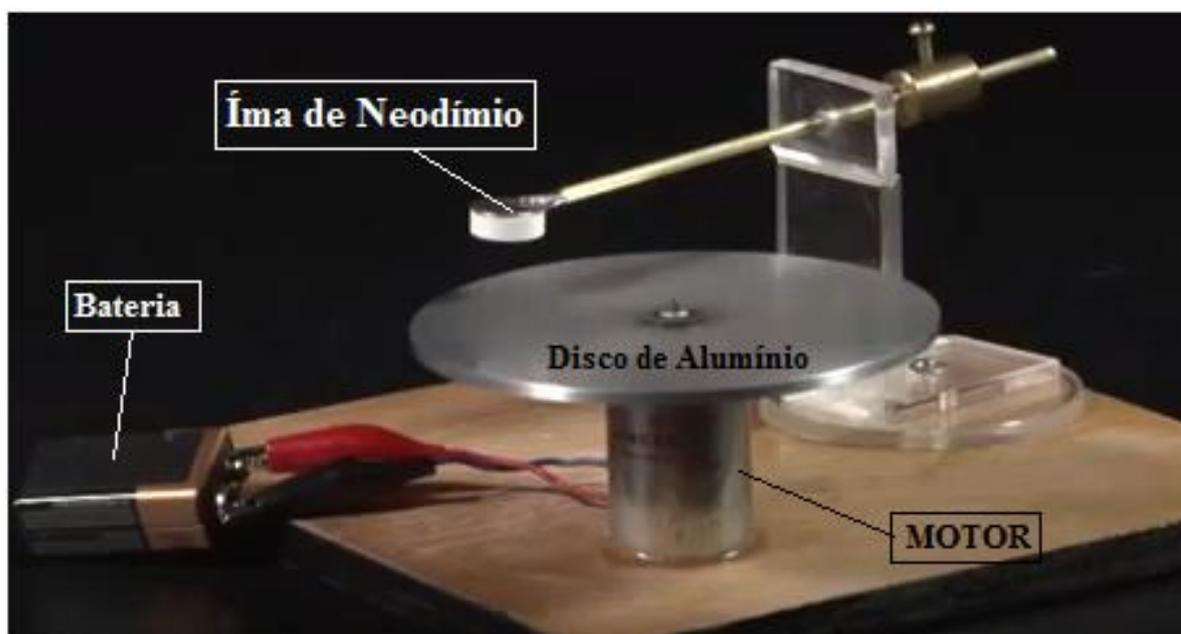


Figura 2.35: Arranjo experimental para demonstração de levitação magnética

Fonte: Adaptado do experimento de Furukawa (2014) disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=uZj67ghKJbo>>

Neste experimento a haste foi posicionada de forma que o ímã de neodímio ficasse sobre o disco de alumínio, e ao acionar o motor, o disco de alumínio começa a girar e prontamente o Ímã começa a levantar em razão de uma força que equilibra o próprio peso do Ímã. Ao desenergizar o motor essa interação diminui e cessa-se a levitação do ímã. Quando o motor está ligado e o disco de alumínio está em movimento, a variação do campo do fluxo magnético que atravessa o mesmo induz um campo elétrico que gera uma corrente elétrica no disco. Esta corrente elétrica consequentemente cria um campo magnético que interage com o campo do Ímã de neodímio, provocando a levitação do mesmo.

## 2.11 ‘ MATERIAIS DE FABRICAÇÃO

Os materiais de engenharia podem ser classificados em uma das três categorias básicas: metais, cerâmicas, polímeros. Suas composições químicas e processos de fabricação e obtenção conferem aos mesmos, propriedades físicas e mecânicas diferentes. Na dependência das três categorias básicas, existem os compósitos, que são misturas heterogêneas dos três tipos de materiais básicos, vistos anteriormente. (GROOVER, 2017).

O objetivo do projeto de um material composto é conseguir uma combinação de propriedades que não são exibidos por qualquer único material e também para incorporar as melhores características de cada um dos materiais do componente. Alguns materiais são naturalmente considerados compósitos (madeira e osso), no entanto, as considerações e discussões aceitas, são os compósitos não-naturais (ou sintéticos) (CALLISTER e RETHWISCH, 2015).

### 2.11.1 Materiais compósitos

Segundo Hull e Clyne (1996), uma compreensão sobre materiais compósitos, aspectos teóricos e práticos de sua produção, propriedades e uso, compreende as fronteiras de áreas como mecânica, física e química entre outras. Acrescente-se o conhecimento de engenharia e ciência dos materiais, a respeito de matrizes poliméricas, metálicas e cerâmicas e reforço na forma de partículas, fibras curtas e fibras longas.

Nesta perspectiva, conhecer tópicos como fibras, matrizes, laminados e interfaces, propriedades e fundamentos sobre: deformação elástica, fadiga e tensão, força, propagação de trinca de fadiga e resistência à fluência; dureza e propriedades térmicas; fadiga e deterioração nas condições ambientais; fabricação e aplicações se fazem necessários para seleção dos materiais compósitos de alta resistência.

Enquanto em uso, as fibras podem ser sujeitas a uma variedade de deformações mecânicas - alongamento, torção, cisalhamento e abrasão. Conseqüentemente, eles devem ter uma alta resistência à tração (em uma faixa de temperatura relativamente larga) e um alto módulo de elasticidade, bem como a resistência à abrasão. Essas

propriedades são regidas pela química das cadeias de polímero e também pelo processo de desenho de fibra (CALLISTER e RETHWISCH, 2015)

As fibras de carbono, segundo Moura et al. (2005), são de dois tipos: as de fibras de carbono (propriamente ditas) –concentração de carbono entre 80 e 95%, e as fibras de grafite – concentração que pode chegar a 95%. As mesmas são aplicadas em compósitos de elevadas solicitações mecânicas, em áreas como as indústrias aeronáutica e espacial. A produção de fibras de carbono, na tecnologia mais recente, centra-se na decomposição térmica de basicamente três precursores orgânicos, tais como: a celulose (*rayon fibers*), o alcatrão (*pitch*) e o poliacrilonitrila (PAN).

### **2.11.2 Materiais para construção do Protótipo de Dispositivo de Calibração de Gravímetros - Modular (PDCG-M)**

A escolha dos materiais para construção do Protótipo de Dispositivo de Calibração de Gravímetro- Modular (PDCG-M), que garanta ao conjunto mecânico integridade, estabilidade dimensional e segurança são pautadas nas diretrizes propostas no trabalho de Fernandes (2015):

a) Estrutura do PDCG-M deve ser compacta e robusta para que suporte os componentes acoplados e cargas estáticas e dinâmicas do rotor; igualmente deve ter base rígida, em vista de absorver energias (vibrações) e possa garantir a manutenção de posicionamentos dos componentes; prima-se também, pela facilidade de montagem, desmontagem e eventuais ajustes dos componentes acoplados; e que seja de fácil manutenção e tenha blindagem balística;

b) Conjunto do rotor: geometricamente simétrico e balanceado - para suportar as cargas dinâmicas sobre a estrutura e eliminação de vibrações, eventualmente transmitidas aos elementos rotativos;

c) Sistema de amortecimento: uso de algum tipo de isolamento para atenuar possíveis perturbações (vibrações) externas vindas do solo (elastômeros, sistemas hidráulicos ou eletroeletrônicos);

d) Geometria: precisão dimensional e de posição que garanta a montagem dos componentes dentro das tolerâncias previstas;

e) Mancais: híbridos - magnético passivo de ímãs permanentes combinado com mancal de escora com esferas (de emergência). Como o PDCG-M deve

funcionar no vácuo, os rolamentos deverão ser lubrificados com lubrificantes adequados para rolamentos que operam em ambientes de vácuo;

f) A blindagem do PDCG-M (balísticas, mistas e transparentes): com materiais de alta resistência mecânica (metais, cerâmicas e compósitos) que suportem perdas devido à resistência aerodinâmica, riscos inerentes às altas velocidades e segurança contra acidentes.

## 2.12 MATERIAIS: PROPRIEDADES MAGNÉTICAS

Os mecanismos e os princípios fundamentais que explicam o fenômeno magnético são sutis e complexos. O estado magnético de um material não é constante e pode ser alterado de diversas maneiras. Ademais, o fato de materiais atraírem-se ou repelirem-se não quer dizer que eles sejam magnéticos. Por exemplo, a força entre eles podem ser de caráter eletrostático. Uma diversidade de dispositivos tecnológicos e modernos dependem de materiais magnéticos e do magnetismo, tais como, geradores e transformadores, computadores e motores elétricos (PADILHA, 2000; CALLISTER e RETHWISCH, 2015).

Em conformidade com Padilha (2000), alguns aços, o ferro e a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) são exemplos de materiais comuns que apresentam magnetismo. Outrossim, existem outros materiais, raros, tais como as ligas de neodímio, ferro e boro, assim como, compostos intermetálicos de samário e cobalto.

Os materiais magnéticos podem ser classificados de acordo com o seu comportamento em relação ao campo externo aplicado. As grandezas que classificam esse comportamento são chamadas de suscetibilidade magnética e permeabilidade magnética. A primeira mensura a capacidade que um material possui em magnetizar-se e a segunda mensura o campo magnético no interior do material. (CALLISTER e RETHWISCH, 2015).

Os materiais magnéticos duros, tais como as ligas de  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ , cujo movimento das paredes dos domínios é mais difícil, em razão da sua microestrutura final, tem maiores ciclos de histerese durante a magnetização e desmagnetização. Esses materiais, em razão da necessidade de maiores campos para desmagnetização, possuem magnetização permanente (ou remanescência) (CALLISTER e RETHWISCH, 2015).

### 2.12.1 Conceitos básicos: Magnetismo

Segundo Callister e Rethwisch (2015), as forças magnéticas são geradas pelo movimento de partículas carregadas eletricamente e essas forças magnéticas são aditivas a quaisquer forças eletrostáticas que possam prevalecer. As distribuições do campo magnético, como indicadas pelas linhas de força, para uma corrente circular e também para um ímã, são mostradas na Figura 2.36.

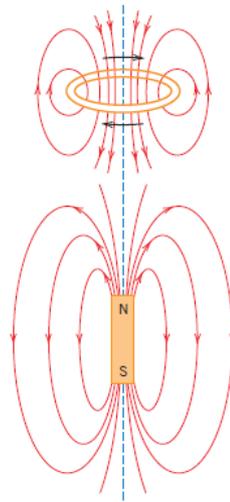


Figura 2.36: Linhas de força de um campo magnético ao redor de uma corrente circular e de um ímã

Fonte: (CALLISTER e RETHWISCH, 2015).

Nos materiais magnéticos encontramos os dipolos magnéticos, os quais, são análogos aos dipolos elétricos em alguns aspectos. Os dipolos magnéticos podem ser considerados como pequenos ímãs compostos por um polo sul e um polo norte, em vez de cargas elétricas negativas e positivas. Os dipolos magnéticos são influenciados por campos magnéticos de forma análoga à maneira como os polos elétricos são afetados pelos campos elétricos e podem ser pensados como pequenas barras compostas de polos norte e sul (PADILHA, 2000; CALLISTER e RETHWISCH, 2015).

De acordo com Padilha (2000) e Callister & Rethwisch, (2015), a origem dos momentos nos materiais sólidos descrevem o comportamento em termos de vários vetores de campo, conforme segue:

O *campo magnético* ou *intensidade do campo magnético*, aplicado externamente, é designado por ( $H$ ), Equação 2.9. Se o campo magnético for gerado

por um solenóide (ou bobina cilíndrica), formada por ( $N$ ) espiras de espaçamento compacto, com comprimento ( $l$ ) e que conduz uma corrente com magnitude ( $I$ ), logo,

$$H = \frac{NI}{l} \quad (2.9)$$

As relações entre o campo magnético aplicado ( $H$ ) e a densidade de fluxo magnético ou intensidade do campo magnético induzido ( $B$ ) serão abordadas com base no arranjo esquemático da Figura 2.37. Acrescente-se que ( $B$ ) também é denominado *indução magnética* ou *densidade do fluxo magnético*.

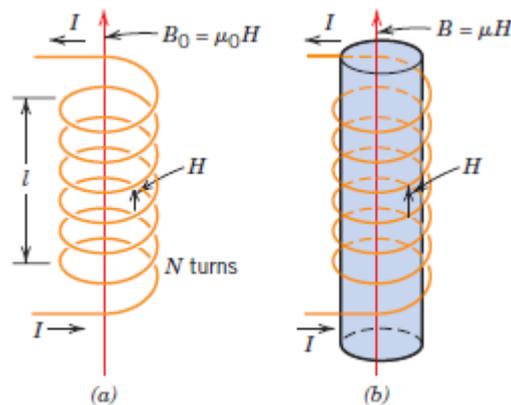


Figura 2.37: Relações entre ( $H$ ) e ( $B$ ) em: a) uma espira condutora no vácuo e b) no interior de um material

Fonte: Adaptado (GUY, A. G., 1976 apud CALLISTER e RETHWISCH, 2015)

A densidade do fluxo ( $B$ ), Equação 2.10, no interior de um material sólido é igual a ( $\mu H$ ), em que, ( $\mu$ ) é a permeabilidade do material sólido, conforme está ilustrado na (Figura 2.37b).

Então,

$$B = \mu H \quad (2.10)$$

A variável ( $\mu$ ) é chamada de permeabilidade, uma propriedade do meio específico onde ( $B$ ) é medido e por meio do qual o campo ( $H$ ) passa, conforme está demonstrado na Figura 2.37b. A permeabilidade tem dimensões de henry por metro (H/m) ou weber por ampere-metro (Wb/A.m).

A densidade do fluxo magnético ( $B_0$ ), Equação 2.11, na presença do vácuo é igual a ( $\mu_0 H$ ), onde ( $\mu_0$ ) é a permeabilidade no vácuo,  $4\pi \times 10^{-7}$  ( $1,257 \times 10^{-6}$ ) H/m. como está ilustrado na Figura 2.37a.

Sendo assim,

$$B_o = \mu_o H \quad (2.11)$$

Na descrição das propriedades magnéticas dos sólidos vários parâmetros podem ser empregados, por exemplo, a razão entre a permeabilidade em um material e a permeabilidade no vácuo, Equação 2.12, isto é

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_o} \quad (2.12)$$

em que,  $(\mu_r)$  é denominada de *permeabilidade relativa* e é um parâmetro adimensional. A medida do grau por meio do qual um material pode ser magnetizado é a permeabilidade ou permeabilidade relativa de um material, ou da facilidade pela qual um campo ( $B$ ), Equação 2.13, na presença de um campo externo ( $H$ ), pode ser induzido.

Outra grandeza de campo, ( $M$ ), chamada *magnetização* do sólido, Equação 2.13, é determinada pela expressão

$$B = \mu_o H + \mu_o M \quad (2.13)$$

Os momentos magnéticos no interior de um material, na presença de um campo ( $H$ ), propendem a ficar alinhados com o campo e a reforçá-lo em virtude de seus campos magnéticos.

A magnetização ( $M$ ) é proporcional ao campo aplicado da seguinte forma, Equação 2.14:

$$M = \chi_m H \quad (2.14)$$

e  $(\chi_m)$  é chamado de *suscetibilidade magnética*, o qual é adimensional. A permeabilidade relativa e a suscetibilidade magnética estão relacionadas da seguinte maneira, Equação 2.15:

$$\chi_m = \mu_r - 1 \quad (2.15)$$

Sob ação de um campo externo ( $H$ ), as permeabilidades ( $\mu$ ) e ( $\mu_r$ ) medem a predisposição com que um campo magnético ( $B$ ) pode ser inserido em um material.

### 2.12.2 Diamagnetismo, Paramagnetismo, Ferromagnetismo, Ferrimagnetismo e Antiferromagnetismo

#### a) Diamagnetismo

Segundo Padilha (2000), Callister & Rethwisch, (2015) e Silva (2017) o *Diamagnetismo* é uma forma fraca e não permanente de magnetismo, presente em todos os materiais que não possuem outro tipo de magnetismo, e que têm valores pequenos e negativos de suscetibilidade ( $\chi_m$  na faixa de  $-10^{-6}$  a  $-10^{-5}$ ), a qual não varia com a temperatura, e que somente enquanto um campo magnético externo estiver sendo aplicado, o mesmo persiste. Nos materiais diamagnéticos, cada orbital tem elétrons circulando em direções contrárias, isto é, não apresentam campo magnético externo (Figura 2.38) e, portanto, o momento magnético não é criado. A magnitude do momento magnético induzido pelo campo externo tem direção oposta à direção do campo aplicado. O diamagnetismo está presente em um grande número de materiais a saber: metais, elementos não metálicos, gases inertes, moléculas diatômicas, compostos orgânicos, água etc.

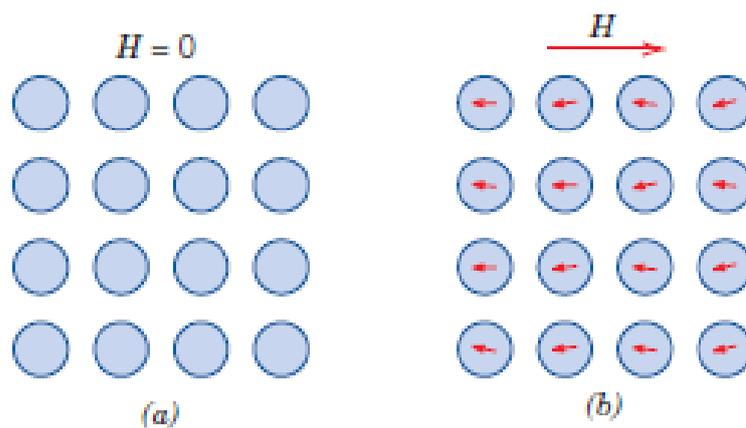


Figura 2.38: Ilustração esquemática da configuração de dipolos atômicos em um material diamagnético: a) na ausência de campo externo; b) com campo externo aplicado

Fonte: Adaptado (CALLISTER e RETHWISCH, 2015)

## b) Paramagnetismo

Os materiais paramagnéticos, sujeitos à presença de um campo externo, magnetizam-se fracamente e geram um campo próprio, com orientação dos dipolos podendo ser alinhados na direção do campo aplicado (Figura 2.39). A inexistência de um campo magnético externo provoca a aleatoriedade das orientações dos momentos magnéticos atômicos, de forma que esses materiais não apresentem qualquer magnetização macroscópica resultante fazendo com que os dipolos atômicos fiquem livres para girar. O resultado desta rotação provoca o alinhamento dos dipolos, de forma preferencial, com um campo externo, resultando no fenômeno do *paramagnetismo*. Os materiais paramagnéticos têm valores de suscetibilidade magnética pequenos e positivos ( $\chi_m$  na faixa de  $10^{-3}$  a  $10^{-5}$ ). A suscetibilidade magnética ( $\chi_m$ ) dos materiais paramagnéticos diminui com o aumento da temperatura, Equação 2.16 (PADILHA, 2000; CALLISTER & RETHWISCH, 2015; e SILVA, 2017) segundo a relação,

$$\chi_m = \frac{C}{T} \quad (2.16)$$

em que,

$C$  = uma constante

$T$  = a temperatura.

O paramagnetismo pode ser observado em um grande número de materiais a saber: metais, íons de metais de transição, terras raras e seus sais e óxidos de terras raras, e alguns gases diatômicos etc.

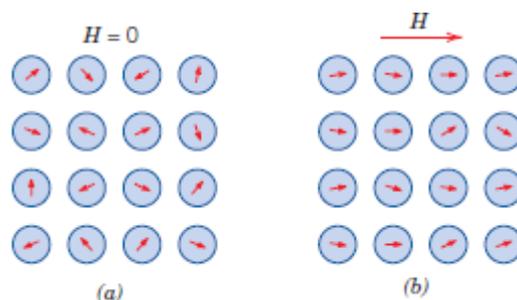


Figura 2.39: Ilustração esquemática da configuração de dipolos atômicos em um material paramagnético: a) na ausência de campo externo; b) com campo externo aplicado

Fonte: Adaptado (CALLISTER e RETHWISCH, 2015)

A Tabela 2.8 apresenta a suscetibilidade magnética à temperatura ambiente para materiais diamagnéticos e paramagnéticos.

Tabela 2.8: Suscetibilidade Magnética à Temperatura Ambiente para Materiais Diamagnéticos e Paramagnéticos

Diamagnéticos		Paramagnéticos	
Material	Suscetibilidade $\chi_m$ (volumétrica) [SI]	Material	Suscetibilidade $\chi_m$ (volumétrica) [SI]
Cloreto de Sódio	- 1,41 x 10 <sup>-5</sup>	Alumínio	2,07 x 10 <sup>-5</sup>
Cobre	- 0,96 x 10 <sup>-5</sup>	Cloreto de Crômio	1,51 x 10 <sup>-3</sup>
Mercúrio	- 2,85 x 10 <sup>-5</sup>	Crômio	3,13 x 10 <sup>-4</sup>
Ouro	- 3,44 x 10 <sup>-5</sup>	Molibdênio	1,19 x 10 <sup>-4</sup>
Óxido de Alumínio	- 1,81 x 10 <sup>-5</sup>	Sódio	8,48 x 10 <sup>-6</sup>
Prata	- 2,38 x 10 <sup>-5</sup>	Sulfato de manganês	3,70 x 10 <sup>-3</sup>
Silício	- 0,41 x 10 <sup>-5</sup>	Titânio	1,81 x 10 <sup>-4</sup>
Zinco	- 1,56 x 10 <sup>-5</sup>	Zircônio	1,09 x 10 <sup>-4</sup>

Fonte: (CALLISTER & RETHWISCH, 2015)

### c) Ferromagnetismo

De acordo com Padilha (2000), Callister & Rethwisch, (2015) e Silva (2017, *ferromagnetismo* é a propriedade ou característica que alguns materiais metálicos, especialmente em metais de transição de ferro (como a ferrita  $\alpha$  CCC), têm de apresentar momento magnético permanente e magnetização elevada permanente, mesmo na ausência de um campo magnético externo (Figura 2.40). São exemplos de materiais ferromagnéticos cobalto, níquel e algumas terras raras, assim como o gadolínio (*Gd*). Esses materiais possuem suscetibilidades elevadas e positivas ( $\chi_m \gg 1$ ). Por conseguinte, ( $H$ )  $\ll$  ( $M$ ) e, a relação entre a densidade do fluxo magnético é dada por, Equação 2.17:

$$B_o \cong \mu_o H \quad (2.17)$$

A susceptibilidade magnética dos materiais ferromagnéticos diminui com o aumento da temperatura ( $T$ ) segundo a lei de Curie-Weiss, Equação 2.18:

$$\chi_m = \frac{C}{T - \theta} \quad (2.18)$$

em que,

$C$  = uma constante e

$\theta$  é aproximadamente igual a  $\theta_c$

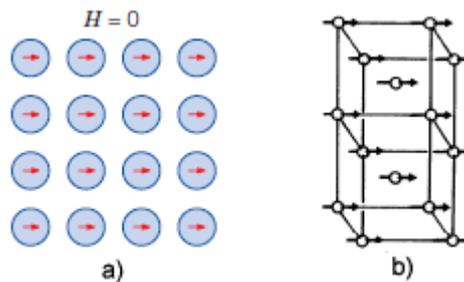


Figura 2.40: Ilustração esquemática do alinhamento de dipolos atômicos em um material ferromagnético: a) na ausência de campo externo aplicado e b) configuração de dipolos no ferro  $\alpha$ .

Fonte: a) (CALLISTER e RETHWISCH, 2015) b) (PADILHA, 2000)

#### d) Ferrimagnetismo

O *ferrimagnetismo* é um tipo forte de magnetização permanente, presente em alguns materiais cerâmicos, que se deve a um alinhamento antiparalelo desigual de momentos magnéticos vizinhos. Esses materiais são conhecidos como ferritas cúbicas (não deve ser confundida com a fase  $\alpha$  do ferro, de estrutura CCC, também denominada ferrita), as mesmas podem ser representadas pela fórmula geral  $MFe_2O_4$  (Figura 2.41), onde (M) é um elemento metálico. As propriedades magnéticas macroscópicas dos ferromagnetos e dos ferrimagnetos são análogas, a diferenciação está nos seus momentos magnéticos resultantes, ou íons magnéticos. Por terem momentos magnéticos diferentes a resultante magnética dos materiais ferrimagnéticos não é nula. Assim como os materiais ferromagnéticos, os ferrimagnéticos também possuem temperatura crítica, igualmente denominada temperatura de Curie ( $\theta_c$ ). A susceptibilidade dos materiais ferrimagnéticos diminui com o aumento da temperatura ( $T$ ), na

mesma ordem de grandeza dos materiais ferromagnéticos, Equação 2.19 (PADILHA, 2000; CALLISTER & RETHWISCH, 2015; e SILVA, 2017):

$$\chi_m \approx \frac{C}{T \pm \theta} \quad (2.19)$$

em que,

$C$  = uma constante e

$\theta$  é diferente de  $\theta_c$

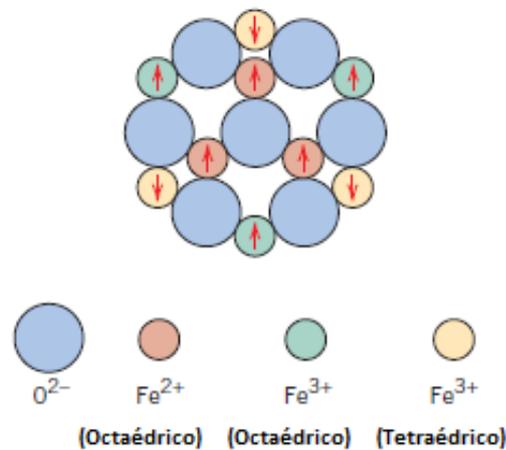


Figura 2.41: Diagrama esquemático mostrando a configuração de momentos magnéticos para íons de  $Fe^{2+}$  e  $Fe^{3+}$  no  $Fe_3O_4$  (magnetita)

Fonte: (FLINN e TROJAN, 1990 apud CALLISTER e RETHWISCH, 2015)

### e) Antiferromagnetismo

Segundo Padilha (2000), Callister & Rethwisch, (2015) e Silva (2017) o antiferromagnetismo é o fenômeno de conexão do momento magnético entre átomos ou íons adjacentes que ocorre em materiais que não são ferromagnéticos. O ordenamento magnético de todos os momentos magnéticos adquire direção antiparalela e sentido inverso, em razão das interações de troca com os átomos adjacentes (Figura 2.42). Diversos compostos de metais de transição exibem comportamento antiferromagnético:  $CoO$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $CuCl_2$ ,  $MnO$ ,  $MnS$ ,  $MnSe$  e  $NiO$ . Os materiais antiferromagnéticos possuem temperatura crítica, chamada temperatura de Néel ( $\theta_n$ ). A suscetibilidade dos materiais antiferromagnéticos diminui com o aumento da temperatura ( $T$ ), na mesma ordem de grandeza dos materiais paramagnéticos

(anteriormente os materiais antiferromagnéticos eram classificados como paramagnéticos anômalos), Equação 2.20:

$$\chi_m \approx \frac{C}{T \pm \theta} \quad (2.20)$$

em que,

$C$  = uma constante e

$\theta$  é diferente de  $\theta_n$

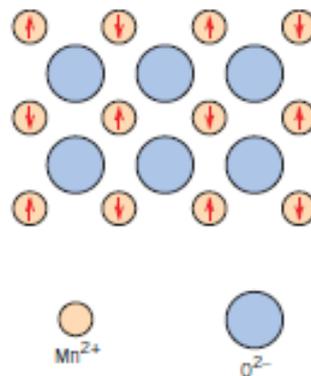


Figura 2.42: Diagrama da representação esquemática do alinhamento antiparalelo de momentos magnéticos no MnO (óxido de manganês) antiferromagnético

Fonte: (CALLISTER e RETHWISCH, 2015)

### 2.12.3 Ímãs de neodímio

Os ímãs de neodímio (também chamados de ímãs de terras raras) são feitos a partir da liga de neodímio, ferro e boro ( $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ) e são materiais magnéticos permanentes duros de alta energia. Esses ímãs são fabricados a partir de compostos intermetálicos e possuem excelentes propriedades magnéticas. As ligas de  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  são amplamente utilizadas para uma enorme gama de aplicações que requerem o uso de materiais magnéticos duros, tais como dispositivos tecnológicos de diferentes áreas e em motores, a Tabela 2.9 apresenta as propriedades típicas de dois dos materiais magnéticos duros mais explorados comercialmente, o  $\text{SmO}_3$  (samário-cobalto) e  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  (CALLISTER e RETHWISCH, 2015).

Tabela 2.9: Propriedades típicas dos materiais magnéticos duros  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  (samário-cobalto) e  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  (Neodímio-ferro-boro)

Material	Composição (%)	Remanência, Br [Tesla (gauss)]	Coercividade, H [camp-spiral/m]	(BH) máx [kJ/m <sup>3</sup> (MGOe)]	Temperatura de Curie Tc [C° (°F)]	Resistividade, ρ (Ω.m)
Terra-rara de Samário - cobalto 1	$\text{Sm}_2\text{O}_3$	0,92 (9200)	720.000 (9000)	170 (21)	725 (1340)	$5,0 \times 10^{-7}$
Neodímio-ferro-boro sinterizado	$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	1,16 (11200)	848.000 (10.600)	255 (32)	310 (590)	$1,6 \times 10^{-7}$

Fonte: Adaptada de (ASM Handbook, 1990 apud CALLISTER e RETHWISCH, 2015).

A Figura 2.43 a seguir ilustra o gráfico do aumento da eficiência (energia magnética máxima) dos materiais magnéticos permanentes duros no século XX (PADILHA, 2000).

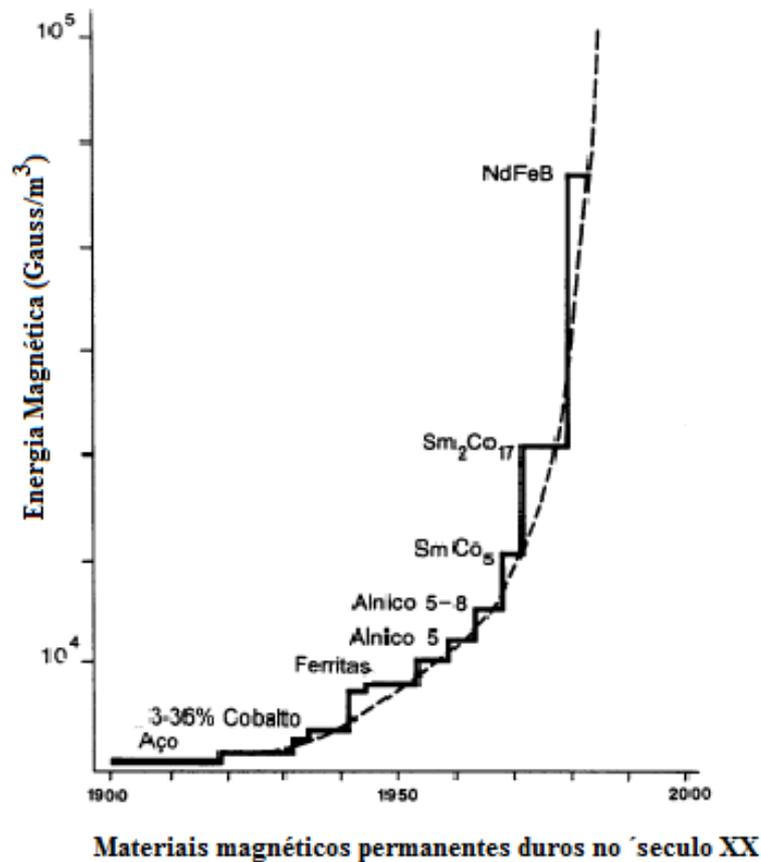


Figura 2.43: Gráfico do Aumento da eficiência (energia magnética máxima) dos materiais permanentes duros no século XX

Fonte: Adaptado (EASTERLING, 1993 apud PADILHA, 2000)

Dependendo da aplicação, podem ser fornecidos em várias categorias de valores magnéticos, variadas medidas e diferentes formatos (discos, anéis ou blocos), Figura 2.44.



Figura 2.44: Diferentes formatos de ímãs de neodímio  
 Fonte: <http://www.supergauss.com.br/index.php/imas-de-neodimio/>

A maior parte dos materiais magnéticos duros, como os ímãs de neodímio, é constituída de ferromagnéticos apresentando enorme fluxo magnético, são mecanicamente frágeis e perdem o alinhamento quando exposto a uma temperatura crítica ( $T_c$ ) e perdem seu magnetismo de modo irreversível (CALLISTER e RETHWISCH, 2015).

Ímãs cilíndricos e discos podem ser magnetizados axial ou diametralmente, conforme mostra a Figura 2.45:

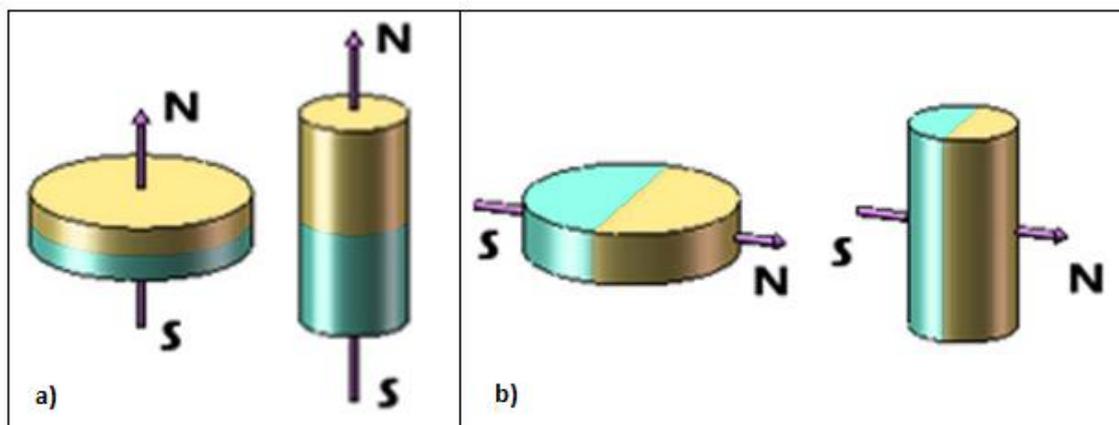


Figura 2.45: a) Magnetização axial

b) Magnetização

Fonte: <http://www.italpro.com.br/page/magnetismo.htm>

Os ímãs em formato de anéis, igualmente, podem ser magnetizados através do diâmetro (magnetização diametral) ou através da espessura (magnetização axial), conforme Figura 2.46:

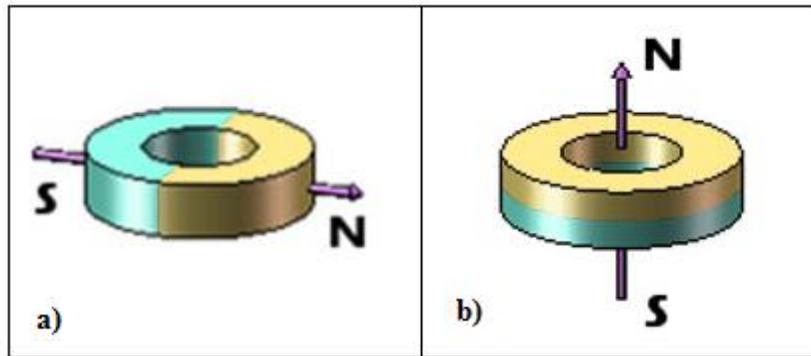


Figura 2.46: a) Magnetização diametral b) Magnetização axial  
 Fonte: <http://www.italpro.com.br/page/magnetismo.htm>

### 2.13 MOTORES DE PASSO (MP)

Os dispositivos eletromecânicos que convertem pulsos elétricos em movimentos mecânicos são chamados de Motores de Passo (MP), os mesmos geram variações angulares discretas. Pequenos incrementos angulares, denominados “passos”, são responsáveis por rotacionar o rotor ou eixo do MP. A rotação e sentido de giro destes motores estão diretamente relacionados ao recebimento e sequência dos pulsos elétricos aplicados em seus terminais. A frequência e o número de pulsos aplicados determinam a velocidade que o rotor gira e o tamanho do ângulo rotacionado. Eles podem ser usados em aplicações onde é necessário controlar vários fatores tais como: ângulo de rotação, velocidade, posição e sincronismo (BRITES; SANTOS, 2008)

Segundo Brites e Santos (2008) estruturalmente o motor de passo pode ser do tipo Relutância Variável (MRV), no qual o mesmo possui um rotor de ferro, com múltiplos dentes e um estator com enrolamentos. Energizados com corrente DC, os polos dos enrolamentos do estator ficam magnetizados. A rotação ocorre quando os dentes do estator são atraídos para os polos do estator energizado, devido à força que aparece, para que o sistema tenha o circuito com menor relutância.

Logo abaixo, para ilustrar vejamos as Figuras 2.47 e 2.48:

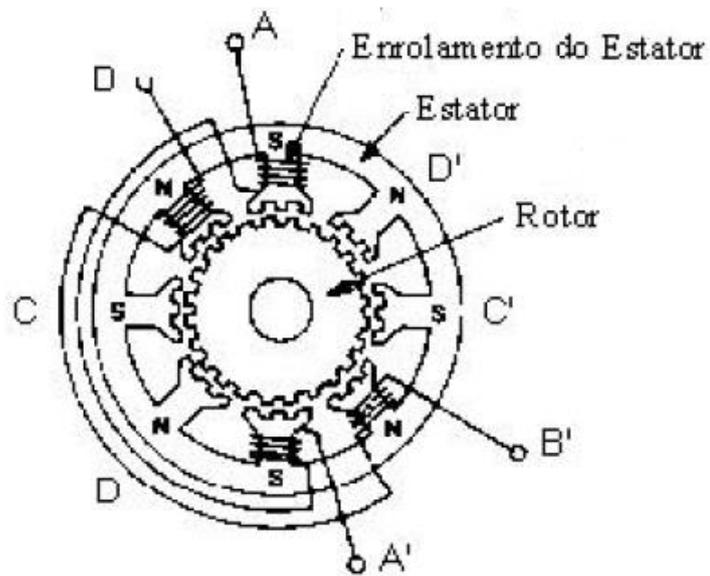


Figura 2.47: Motor de passo com estrutura tipo relutância variável

Fonte: (BRITES; SANTOS, 2008)

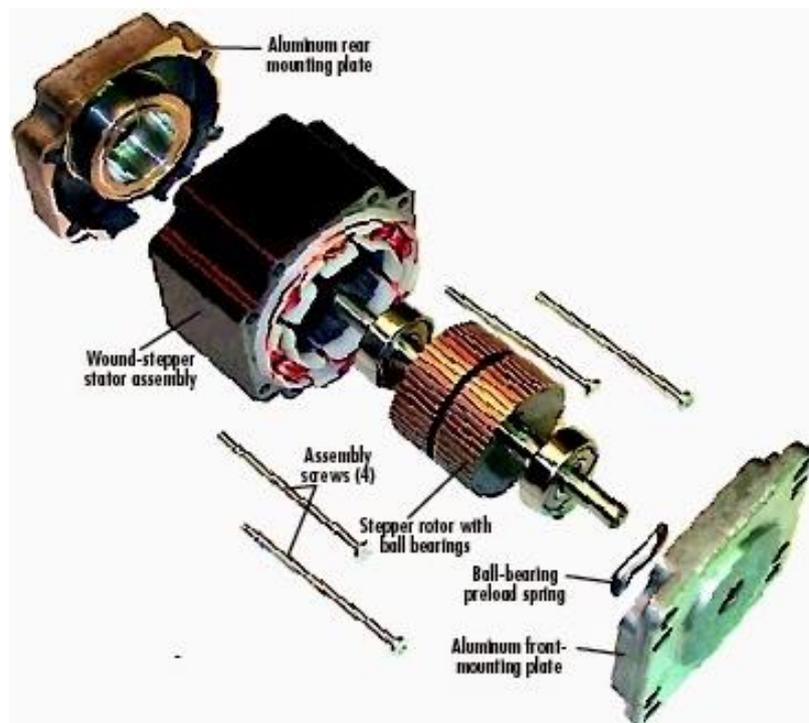


Figura 2.48: Vista de um motor de passo com estrutura tipo relutância variável

Fonte: <http://abhieeprojects.blogspot.com.br/2015/02/basics-of-stepper-motor-stepper-motor.html?m=1>

Os MRVs utilizam um rotor não magnetizado de material ferroso (aço doce) ou outros materiais especiais, com múltiplos polos salientes semelhantes a dentes de engrenagem e um estator com uma quantidade específica de bobinas, Figura 2.49 (FERNANDES, 2015).

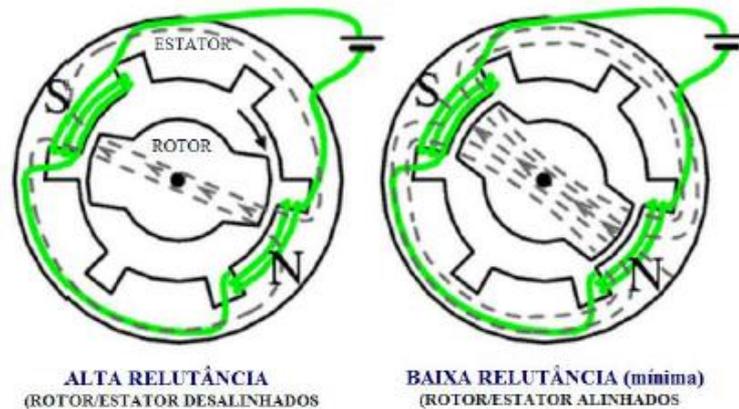


Figura 2.49: Ilustração do princípio de funcionamento dos MRVs.

Fonte: Adaptado (KUPHALDT apud FERNANDES 2015).

## 2.14 MOTOR SEM ESCOVAS

Segundo D'Ávila et. al. (2011) um motor CC (Corrente Contínua) sem escovas/ DC (Direct Current) *brushless motor*, de acordo com a *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA), é uma máquina síncrona girante com ímãs permanentes no rotor.

Através de uma fonte de tensão contínua é possível fornecer potência elétrica ao motor CC *Brushless* e a comutação eletrônica pode ser realizada por um sistema de controle eletrônico. A posição do rotor com relação às fases do enrolamento da armadura é determinada por um dispositivo de detecção de posição (sensores de efeito *Hall*). O sistema de controle eletrônico de comutação, de acordo com o sinal dos sensores de posição, fornece a sequência para ativar as fases do enrolamento da armadura e desta forma, mantém o motor em funcionamento (CHAI, 1998 apud D'ÁVILA et al., 2011).

O rotor do motor *Brushless*, apresentado no estudo de D'Ávila, possui dois ímãs permanentes com formato cilíndrico composto de  $Nd_2Fe_{14}B$  (Neodímio-Ferro-Boro). A Figura 2.50 ilustra um desenho simplificado de um motor *brushless* em corte transversal. O enrolamento trifásico da armadura é representado pelas fases A, B e C.

Na Figura 2.51, " $R_e$ " é a resistência de uma fase, " $L$ " é a indutância de uma fase, " $E_a$ ", " $E_b$ " e " $E_c$ " são as forças contraeletromotrizes (fcm) induzidas nas fases A, B e C, respectivamente (CHAI, 1998 apud D'ÁVILA et. al, 2011).

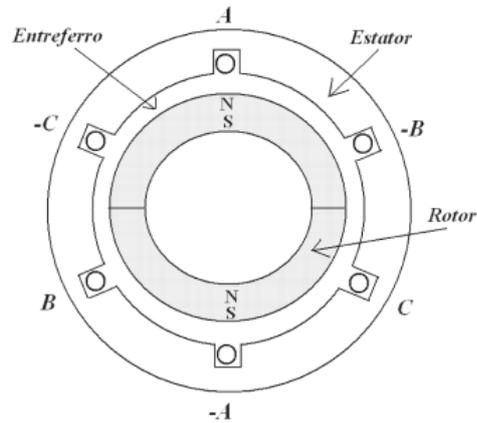


Figura 2.50: Desenho em corte transversal do motor *brushless* CC  
 Fonte: (CHAI, 1998 apud D'ÁVILA et. al, 2011).

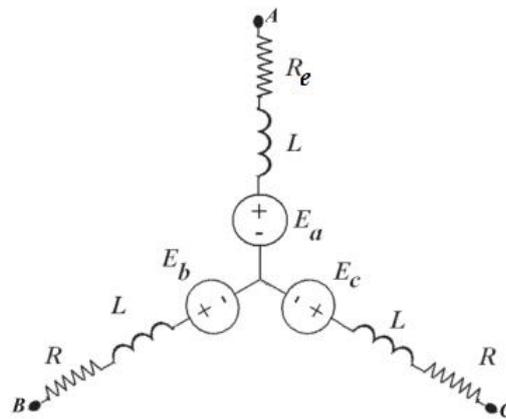


Figura 2.51 Modelo do motor CC *brushless*  
 Fonte: Adaptada (CHAI, 1998 apud D'ÁVILA et. al, 2011)

## 2.15 MOTOR DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL (MRV)

Segundo Fernandes (2015) o motor mais indicado para o PDCG é o de relutância variável, que pertence à categoria dos motores de passo do tipo síncrono, em particular, o desenvolvido por Ruiz (2014), conforme referências pesquisadas, e diversas aplicações de motores de relutância variável em equipamentos com velocidades entre 10 RPM a 150.000 RPM e potências de 1kw a 5MW.

O projeto de Ruiz (2014) previu uma velocidade nominal do motor de aproximadamente 120.000 RPM. Nesta perspectiva atende as necessidades específicas para o acionamento do PDCG-M.

Os MRVs possuem as características de construção simples, baixo custo e capacidade de resistir a panes. Sua robustez chega ao ponto de poderem funcionar mesmo no caso de falha de uma ou mais fases. Embora em baixas velocidades os MRVs não sejam tão eficientes, apresentam vantagens em altas velocidades.

O MRV projetado por Ruiz (2014), detalhes construtivos do motor, circuitos eletrônicos necessários e o algoritmo de controle, são mostrados na Figura 2.52:

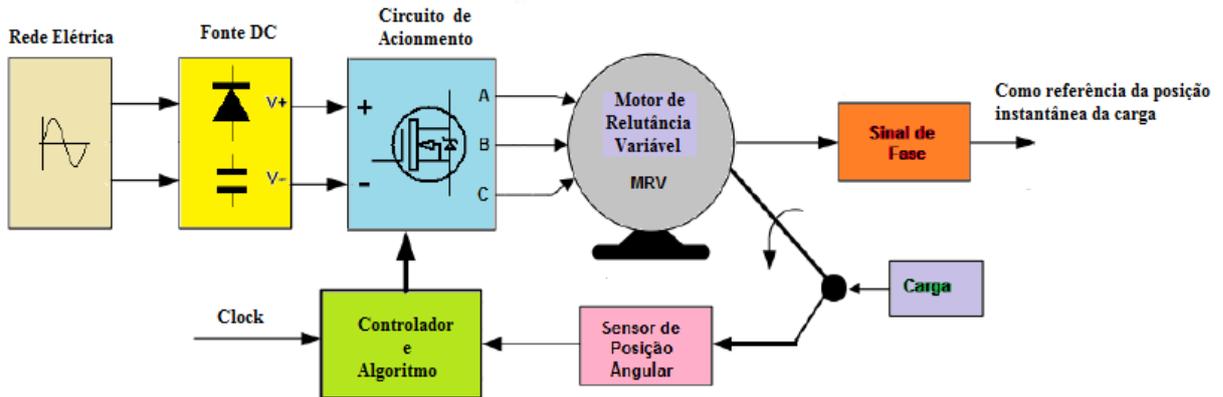


Figura 2.52: Diagrama representativo do projeto do MRV

Fonte: (RUIZ, 2014).

As dimensões obtidas nesse projeto, para o estator e para o núcleo (rotor) do MRV, são as mostradas na Figura 2.53:

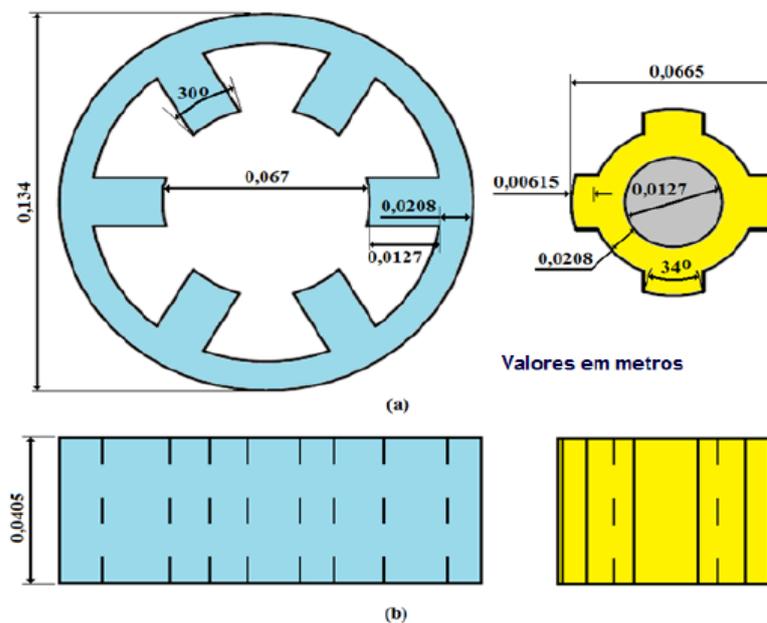


Figura 2.53: Dimensões do projeto do rotor e do estator: (a) Vista Frontal; (b) Vista Superior

Fonte: (RUIZ, 2014)

## 2.16 USINAGEM NÃO CONVENCIONAL

O termo Processos de Usinagem Não Tradicional ou Convencional (UNC) refere - se a um grupo, que remove o material em excesso de uma peça, através de várias técnicas que envolvem o uso de diferentes tipos de energias, ou combinações destas energias (mecânica, elétrica, química ou térmica). “São chamados de processos de usinagem, mas não usam uma ferramenta de corte afiada como nos processos convencionais.” (GROOVER, 2017).

Desde a 2ª Guerra Mundial, diversos novos processos de remoção de material vêm sendo desenvolvidos, utilizando outras formas de energia além da energia mecânica ou desenvolvimento de melhores maneiras de usinar formas complexas em materiais duros (DIETER,1981).

Com relação ao projeto, produção e utilização (Processamento, estruturas, propriedades e desempenho) em Ciência e Engenharia dos Materiais (CEM) a usinagem é uma operação secundária de Processamento (CALLISTER e RETHWISH, 2015).

A Figura 2.54 ilustra os tipos de Usinagens convencionais e Não Convencionais (tradicionais)

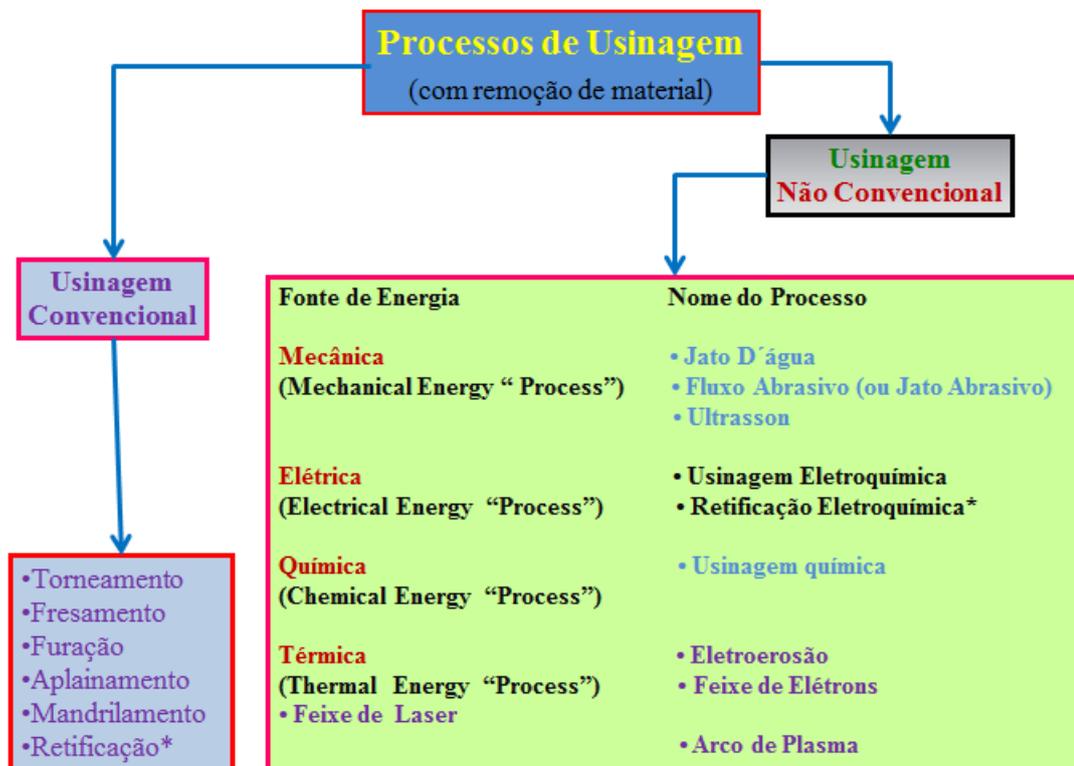


Figura 2.54: Usinagens convencionais e Não Convencionais

Fonte: Adaptação (DIETER,1981; GROOVER, 2017)

### 2.16.1 Eletroerosão por penetração

A usinagem por Eletroerosão ou Descarga Elétrica (*Electrical Discharge Machine – EDM*), é o processo capaz de produzir furos, fendas e outras cavidades em um material que conduza eletricidade, através da remoção controlada de material, por fusão e vaporização, causada por uma descarga elétrica de centelha com frequência elevada (Dieter,1981; Groover, 2017).

Na EDM por penetração o material (anôdo) e a ferramenta (cátodo) são imersos em um fluido dielétrico (o óleo mineral ou sintético, água deionizada e o querosene). O dielétrico, além de atuar como isolante participa desta limpeza e ainda refrigera a superfície usinada. As partículas fundidas, desintegradas na forma de minúsculas esferas, são removidas da região por um sistema de limpeza e, no seu lugar, fica uma pequena cratera, conforme ilustra a Figura 2.55 (DIETER,1981; GROOVER, 2017).

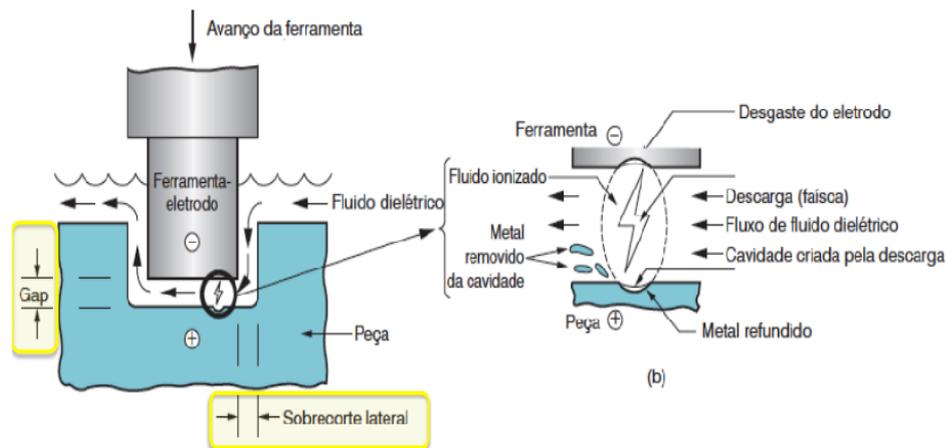


Figura 2.55:Esquema de um processo por eletroerosão a penetração

Fonte: (GROOVER, 2017)

A distância mínima entre a peça e a ferramenta, a qual é produzida a centelha, é chamada GAP (do inglês gap = folga) e depende da intensidade da corrente aplicada. Os dois importantes parâmetros de processo são a corrente de descarga e a frequência de ocorrência das descargas. Relativo à ferramenta, a dureza e resistência do material não são fatores relevantes em EDM, uma vez que o processo não é uma competição de dureza entre a ferramenta e a peça. As altas temperaturas de descarga que fundem a peça também fundem a ferramenta, criando uma pequena cavidade na superfície oposta à cavidade produzida na peça. O desgaste da ferramenta é

normalmente medido como a taxa de remoção de material ( $Q_{RM}$ ) da peça com relação ao material retirado da ferramenta conforme Equação 2.21 (DIETER,1981; GROOVER, 2013).

$$Q_{RM} = \frac{664 \cdot I}{T_f^{1,23}} \quad (2.21)$$

Em que:

$Q_{RM}$  = taxa de remoção de material

$I$  = corrente de descarga [A]

$T_f$  = temperatura de fusão [°C]

Obs.: 664 é uma constante com dimensões no SI igual a °C<sup>1,23</sup>/A

### 2.16.2 Eletroerosão a fio

Os princípios da EDM a fio são semelhantes aos da eletroerosão por penetração, porém, neste processo, um fio (eletrodo) eletricamente carregado, atravessa a peça submersa em fluido dielétrico (óleos minerais ou sintéticos, a água deionizada e o querosene), em movimentos constantes, provocando descargas elétricas entre o fio e a peça, cortando o material, Figura 2.56. Para permitir a passagem do fio, é feito um pequeno orifício no material a ser usinado. (DIETER,1981; GROOVER, 2017).

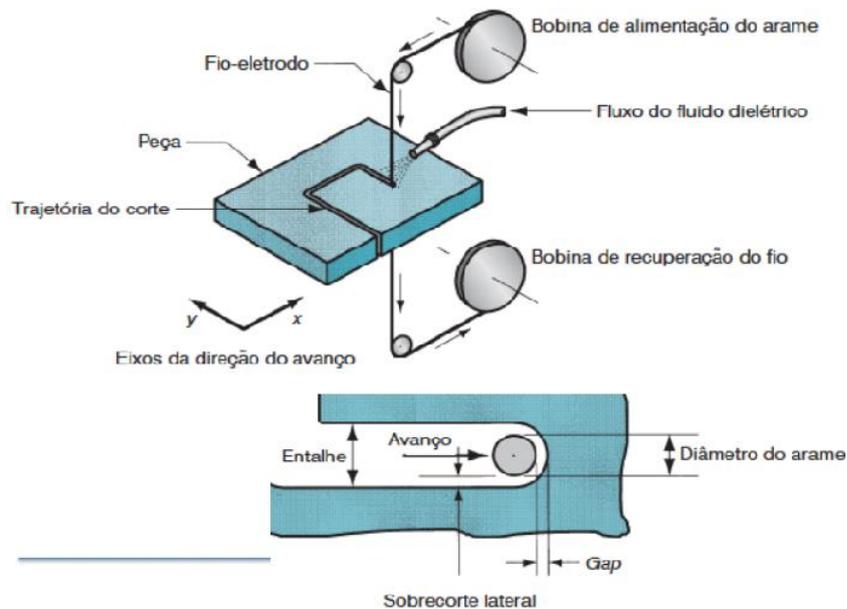


Figura 2.56: Esquema de um processo por eletroerosão a fio  
Fonte: (GROOVER, 2017)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente se propôs um estudo na perspectiva de obter contribuições para o projeto e desenvolvimento, em escala reduzida, de um Protótipo de Dispositivo para Calibração de Gravímetros-Modular (PDCG-M). O PDCG-M deve ser capaz de atingir rotações próximas a 10.000 RPM (167 Hz).

Nesse intento, este trabalho propõe para o projeto a utilização de mancais magnéticos e de levitação (LENZ), o uso de técnicas preditivas (Análise Vibracional/ Termografia) e as possibilidades de modulação dos componentes e blindagem/reforço balístico para testes futuros no vácuo.

A saber, com o desenvolvimento contínuo das pesquisas, possa atingir rotações estáveis de 96.000 RPM (1600 Hz), possibilitando o acoplamento de um sistema composto por duas massas girantes e na perspectiva de produção de sinais gravitacionais em escala laboratorial conhecidos, possibilitando a medição da velocidade de interação gravitacional por massa ressonante, de forma que atenda as necessidades de calibração do sistema vibracional do Detector de Ondas Gravitacionais (OG) Mário Schenberg.

#### 3.1 ESTUDOS PARA O DESENVOLVIMENTO DO PROJETO DE UM PROTÓTIPO PARA CALIBRAÇÃO DE GRAVÍMETROS MODULAR

Pesquisas bibliográficas descritivas, com particular atenção ao projeto GRÁVITON, e similares em outros países, foram norteadoras desse estudo. Além disso, pesquisas utilizando-se os equipamentos dos laboratórios/ oficinas e softwares disponíveis na Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC/ SP e aparelhos de análise preditiva disponibilizados pela empresa privada Arnes Preditiva & Treinamento.

#### 3.2 MATERIAIS: PESQUISA E DIRETRIZES

Em razão da alta velocidade de trabalho do PDCG-M, dos grandes esforços mecânicos aos quais o protótipo será submetido e da necessidade de blindagem

balística e da perspectiva trabalho futuro em câmara de vácuo, serão utilizados para construção do PDCG-M materiais de engenharia com boas propriedades físicas e resistência específica (metais, polímeros e compósitos) e que atendam as necessidades e os requisitos de resistência mecânica, tendo como referência os estudos de trabalhos anteriores da mesma linha de pesquisa.

A escolha/seleção dos materiais para construção do Protótipo de Dispositivo de Calibração de Gravímetros-Modular (PDCG-M), que garanta ao conjunto mecânico integridade, estabilidade dimensional e segurança seguiram as diretrizes propostas por Fernandes (2015), bem como, revisão bibliográfica, a partir fontes consultadas.

Ashby (2011) apresenta metodologia desenvolvida para escolha de materiais usados na Engenharia na forma de mapa, conforme Figura 3.1, onde o mesmo relaciona módulo de elasticidade e massa específica para vários tipos de materiais.

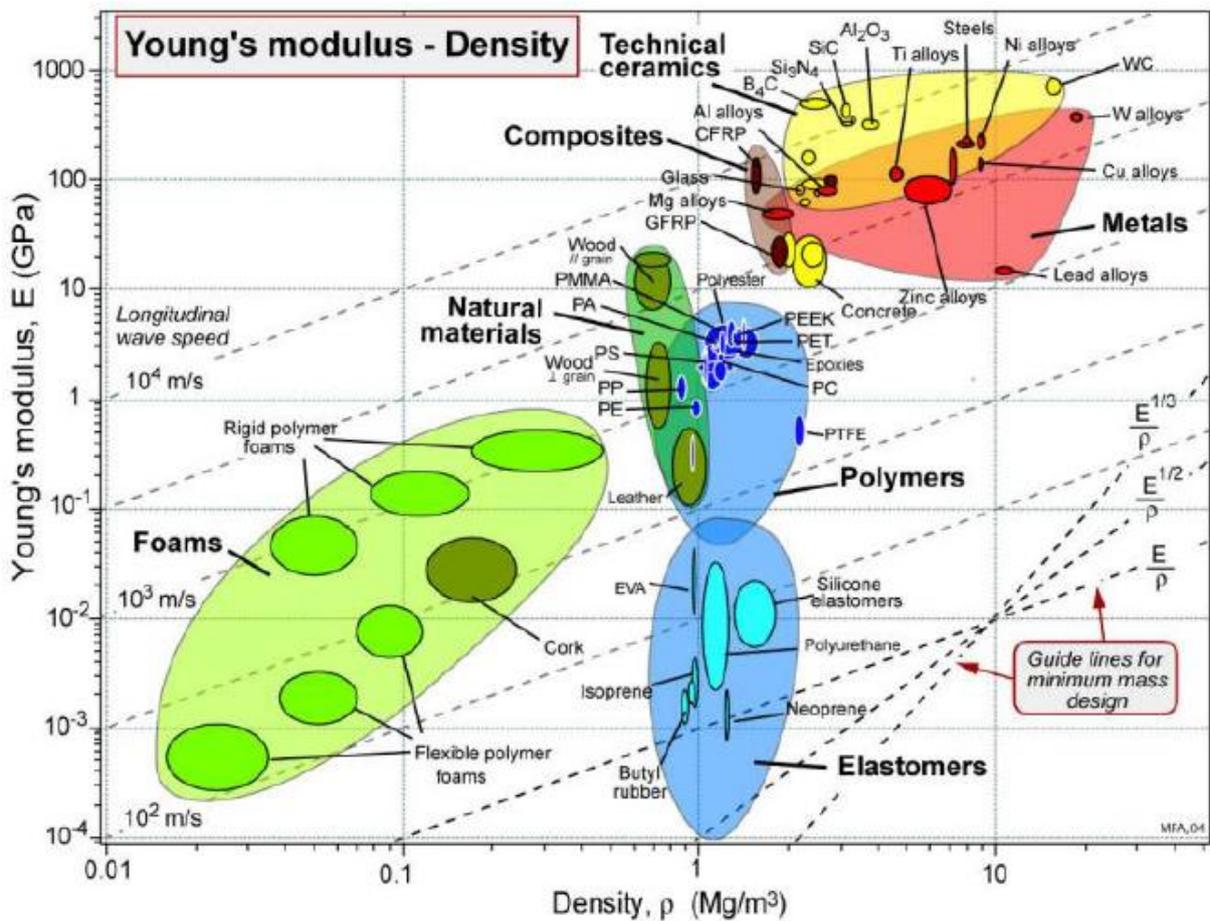


Figura 3.1: Materiais de Engenharia - módulo de elasticidade versus massa específica

Fonte: (ASHBY, M., 2011)

A Tabela 3.1, apresenta a seleção materiais de engenharia com boa resistência específica, conforme pesquisas de trabalhos anteriores e sugestões pautadas em teóricos referentes citados neste trabalho.

Tabela 3.1: Proposta de materiais de engenharia para fabricação do PDCG-M

Material/ Liga	Aço Liga	Alumínio	Cobre	Latão	Polímero	Compósito
<b>Bases estruturais</b>		Al-Mg -Si			Poliacetal	
<b>Suportes</b>		Liga Al 6061 (Naval)		C - 360	Poliacetal	
<b>Eixo do Rotor</b>		Al-Si-Mn	ASTM 110		Poliacetal	
<b>Núcleo do Rotor</b>	Fe-2C-6,5Si (%p) “Aço elétrico”					
<b>Volante</b>		Al-Mg-Si			Poliacetal	Fibra de Carbono c/ resina arazyn 4.9#00
<b>Elementos fixação</b>	A2 AISI 304 (Inox) DIN 912					
<b>Pinos-guias</b>	SAE – 1045 (temperado)  DIN 6325					
<b>Massores</b>	Aço maraging <sup>21</sup> (Teste final)	Al-Mg-Si  (Teste Inicial)				
<b>Blindagem</b>						Policarbonato
<b>Pivô</b>					Nylon 6	

Fonte: (ASHBY, 2011; CALLISTER e RETHWISH, 2015; CAPELLA, 2012; COLPAERT, 2008; SANTOS, G, 2015)

A liga de alumínio Al- Mg-Si foi escolhida para construções da base estrutural e eixo do rotor por ser um material leve, muito resistente à corrosão, por ter propriedade paramagnética e uma alta condutividade térmica e elétrica. Acrescente-se que os elementos

<sup>21</sup> FRAJUCA; SOUZA; COPPEDÉ; NOGUEIRA; BORTOLI; SANTOS, 2018.

magnésio e silício presentes na liga conferem a mesma significativa melhora nas propriedades mecânicas. A presença dos elementos de liga magnésio e silício influencia na usinabilidade do alumínio, quebra do cavaco e diminuição do coeficiente de atrito entre cavaco e ferramenta durante a usinagem (DINIZ, 2013; SANTOS, G., 2015).

A Tabela 3.2 apresenta a análise química da liga de Alumínio-magnésio-silício utilizada para construção da base metálica e eixo do rotor do PDCG-M.

**Tabela 3.2: Análise química da liga de alumínio (Base e Eixo )**

ANÁLISE LIGA DE ALUMINIO (BASE E EIXO)	
Elemento Químico	Concentração (%) em peso
Alumínio (Al)	95,4
Magnésio (Mg)	2,26
Silício (Si)	1,31
Manganês (Mn)	0,63
Ferro (Fe)	0,25

A Figura 3.2 apresenta o equipamento de análise química por fluorescência de raios-X onde foi realizada a análise química da liga de alumínio-magnésio-silício.



Figura 3.2: Equipamento de análise química por fluorescência de Raios-X - Bruker® S2 Ranger

Fonte: Autor

Diante das dificuldades para aquisição de materiais para construção dos suportes para os anéis de neodímio, motores e mancais magnéticos, a solução encontrada foi o

aproveitamento de tubos extrudados da liga de alumínio naval 6061 da Alcoa (Figura 3.3) cedido pelo Laboratório de Projetos Especiais (LPE), da Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC/SP).

Para acoplamento dos ímãs de neodímio nos suportes para levitação por Lenz e dos mancais das extremidades do eixo foram utilizados, respectivamente, o poliacetal e o latão C-360 (disponível no LCMP I/ FATEC-SP).



Figura 3.3: Tubo extrudado de alumínio 6061 da Alcoa para confecção dos suportes do PDCG

Fonte: Autor

A Tabela 3.3 apresenta a composição química típica de uma liga de latão C-360, usado para confecção das buchas de alojamento dos cilindros de neodímio nos suportes dos mancais magnéticos do PDCG-M.

Tabela 3.3: Composição química típica de uma liga latão C-360

Elemento Químico	Concentração (%) em peso
Cobre	60,0 - 63,0%
Chumbo	2,50 - 3,00 %
Ferro	0,35% máximo
Zinco	Balanço

Fonte: (www.termomecanica.com.br)

A liga de alumínio 6061 é leve, possui alta relação resistência específica/ peso e boa condutividade elétrica e térmica, durabilidade, moldabilidade, resistência à corrosão, dureza e

excelente usinabilidade. A Tabela 3.4 apresenta a composição química típica de uma liga de alumínio 6061.

Tabela 3.4: Composição química típica de uma liga de alumínio 6061.

Elemento Químico	Concentração (%) em peso
Cobre (Cu)	0,15 ~ 0,70
Crômio (Cr)	0,04 ~ 0,35
Ferro (Fe)	Máximo 0,70
Magnésio (Mg)	0,70 ~ 1,20
Manganês (Mn)	Máximo 0,15
Silício (Si)	0,40 ~ 0,80
Titânio (Ti)	Máximo 0,15
Outros	0,05
Alumínio	Balanço

Fonte: Azo Journal of Materials Online (2000~2006)

Na realização dos experimentos para escolha dos pivôs para os mancais de seu protótipo Fernandes (2015) observou considerável desgaste dos ímãs, causado pelo contato com as esferas de aço (Figura 3.4), fato pouco esperado, visto que a força resultante no contato esfera/ímãs foi quase nula. Esse desgaste causou aumento considerável do atrito e das vibrações, sendo necessária a substituição dos ímãs.

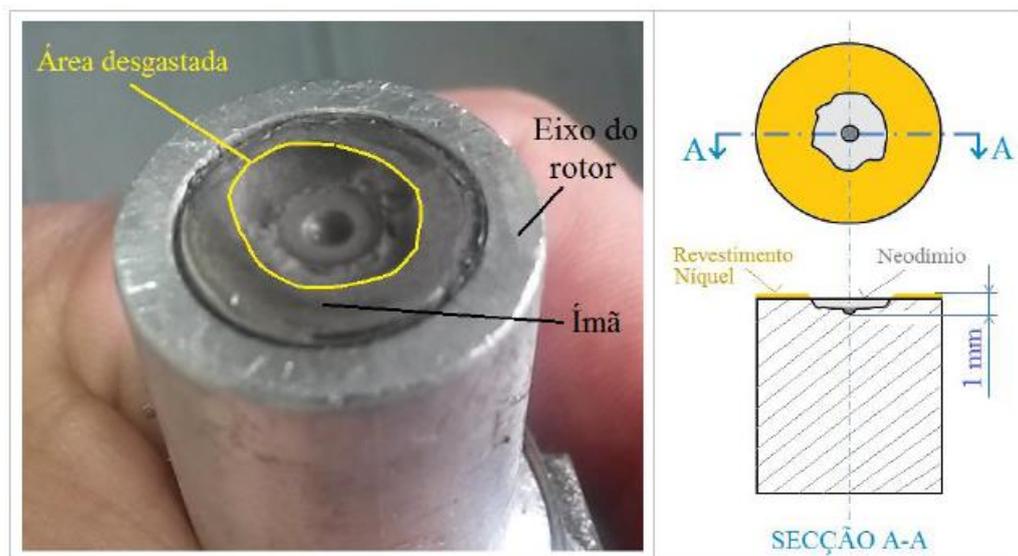


Figura 3.4: Desgaste observado no ímã do mancal MPS

Fonte: Fernandes (2015)

De acordo com Ashby (2011), dentre os diversos materiais de engenharia, os polímeros apresentam os mais baixos coeficientes de atrito dinâmico (sem lubrificação) entre o aço polido.

Fernandes (2015) investigou o desempenho de cinco materiais poliméricos visando a construção dos pivôs dos mancais (Borracha dura, Nylon 6, Poliacetal, PVC e PTFE (Politetrafluoretileno)). Os pivôs foram usinados e instalados no protótipo e testados à uma rotação máxima de 2.000 RPM por duas horas, sob as mesmas condições e geometria (Figura 3.5).

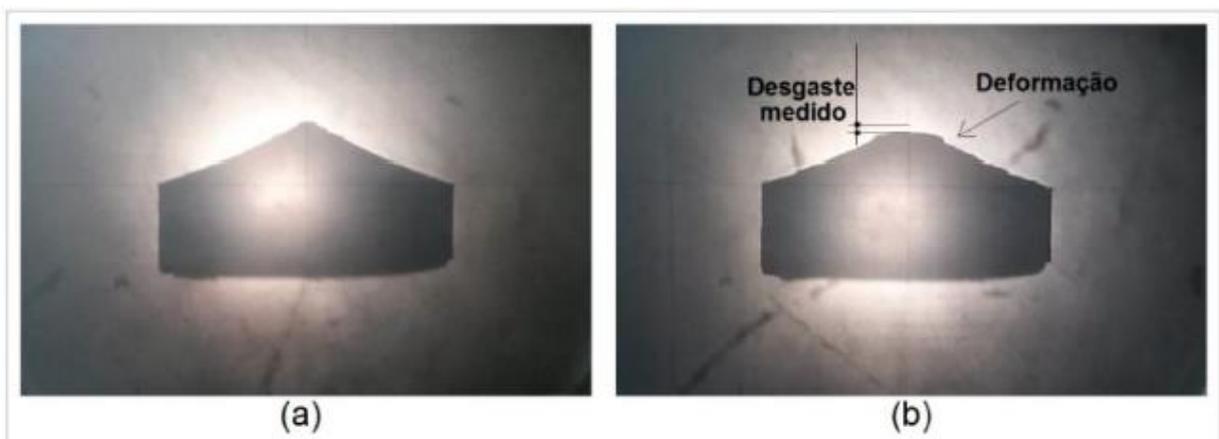


Figura 3.5: Imagens obtidas no projetor de perfis: (a) Pivô antes do ensaio; (b) Pivô depois do ensaio.

Fonte: Fernandes (2015)

Dentre os pivôs testados nos experimentos, em termos de rotação máxima e com o auxílio de um projetor de perfis, o de Nylon 6 foi o que apresentou o melhor resultado (Tabela 3.5). A lubrificação desses pivôs com grafite em pó permitiu a elevação da rotação máxima do eixo do protótipo para 3.150 RPM (FERNANDES, 2015).

Tabela 3.5: Desempenho dos diferentes polímeros usados como pivôs

Polímero	Rotação máxima (RPM)	Desgaste (mm) a 2.000 (RPM) / 120 (min.)
PVC	2.700	0,05
Nylon 6	2.950	0,03
Teflon	2.800	0,10
Borracha	2.600	0,05
Poliacetal	2.700	0,07

Fonte: Fernandes (2015)

Para construção da base, buchas do suporte de levitação e do volante foi escolhido o polímero pertencente ao grupo dos Polioximetilenos, o Poliacetal (POM), pois é um material dielétrico e não ferromagnético, possui alta temperatura de fusão e estabilidades térmica, boa resistência química e é autolubrificante. Acrescente-se que o POM é um polímero muito utilizado na confecção de peças técnicas e apresenta ótimo custo benefício quando comparado a outros polímeros (CALLISTER e RETHWISH, 2015).

Foram escolhidos elementos normalizados (BONASSI et al., 2011) para os posicionamentos e fixações:

a) pinos guias: temperados SAE 1045/ DIN 6325, para garantia do posicionamento dos módulos dos mancais e do motor do PDCG-M.

b) parafusos: A2 AISI 304 (inox)/ DIN 912 - por terem fraca interação com os ímãs de neodímio dos mancais e ferromagnético do rotor

O material escolhido para blindagem de segurança do PDCG-M foi o Policarbonato (PC), por ser um polímero que possui elevada rigidez, boa resistência química, excelente resistência ao impacto e boa resistência térmica. É um material muito utilizado nas indústrias eletroeletrônica e automobilística.

### 3.3 GEOMETRIA E DIMENSIONAMENTO DO DISPOSITIVO

A geometria do dispositivo foi desenvolvida visando o desenvolvimento de um protótipo que mantenha a tensão constante ao longo do raio, apresente menor resistência aerodinâmica, tenha ótima relação massa ( $M$ ) x raio<sup>2</sup> ( $a$ ), possua resistência mecânica e demonstre níveis de vibração aceitáveis.<sup>22</sup>

O dimensionamento do conjunto do dispositivo terá como base o espaço interno máximo disponível na câmara de vácuo disponível no Laboratório de Tecnologia do Vácuo da FATEC/SP (diâmetro 400 mm x 300 mm de altura), cálculos de esforços e limites de resistência mecânica e tensões atuantes nos materiais, geometria que garanta o acoplamento mecânico para manutenção da tensão constante e maior massa possível.

---

<sup>22</sup> Em acordo com a classificação adotada para a severidade vibratória e em função da potência do acionamento, da velocidade de rotação do protótipo em estudo, bem como, nível de criticidade.

### 3.3.1 Protótipo do Dispositivo de Calibração de Gravímetros-Modular

Na fase de estudo foi proposto, como ideia inicial a construção de um protótipo físico do dispositivo (Figura 3.6), e efetuação testes de funcionamento em velocidades menores, acompanhamento dos níveis de vibração e criticidade do sistema, verificação do comportamento do dispositivo em cada etapa para posterior teste no vácuo

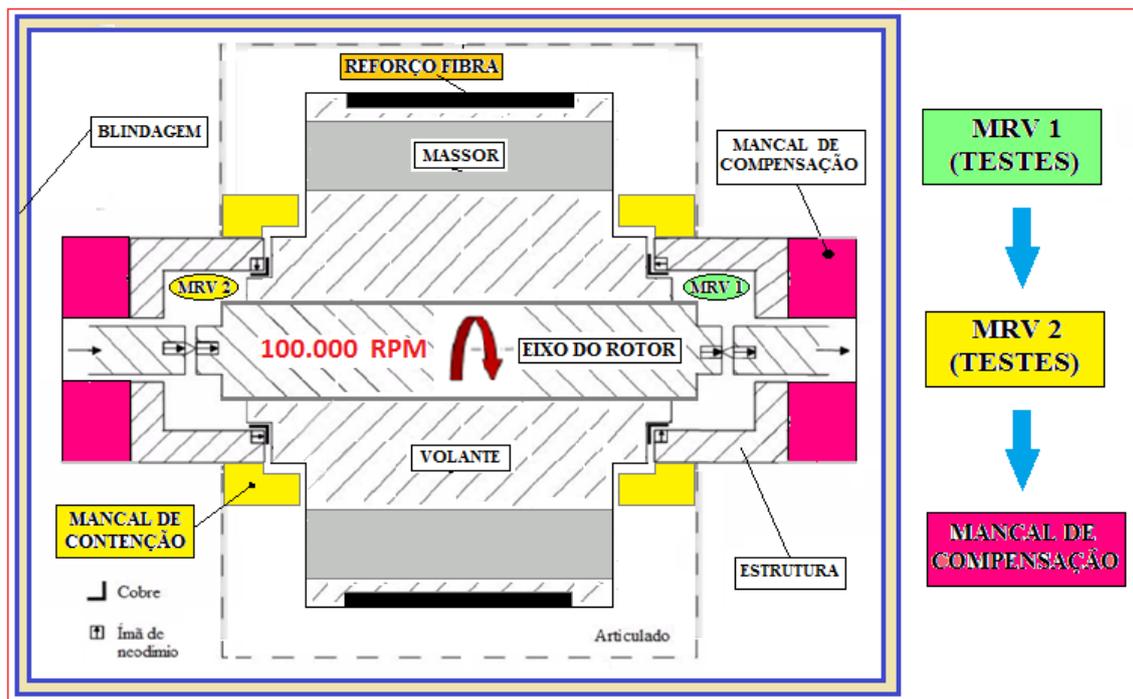


Figura 3.6: Protótipo de Dispositivo para Calibração de Gravímetros –Modular (PDCG-M).

Fonte: (Adaptação – FERNANDES, 2015; LINARES, 2016)

A construção do protótipo físico do PDCG-M e efetuação dos testes obedecerá a uma sequência e análise a cada etapa conforme segue:

- a) **Etapa 1:** com MRV 1 e efetuação de testes;
- b) **Etapa 2:** caso necessário, pós testes com MRV 1, adição de MRV 2 e efetuação de testes;
- c) **Etapa 3:** após testes com MRV 1 e MRV 2, caso necessário, implantação de acoplamento de compensação a cada MRV necessário.

### 3.3.2 Conjunto girante do rotor

As diretrizes propostas por Fernandes (2015) para os materiais de construção do projeto do conjunto girante do rotor (eixo, rotor (núcleo do motor), conjunto girante, massores e reforço de fibra de carbono), são apresentados a seguir:

- a) **Eixo:** cilindro de secção uniforme, com dois furos abertos axialmente nas extremidades para alojar os s dos mancais magnéticos;
- b) **Rotor (núcleo do motor):** material ferroso (Fe-2C-6,5Si (%p) “Aço elétrico”) ou outros materiais especiais, com múltiplos polos salientes semelhantes a dentes de engrenagem;
- c) **O conjunto girante (CG):** conforme evolução das principais configurações propostas para o CG, os estudos apontaram para forma de discos duplos reforçados e envolvidos firmemente com fibras tracionadas de carbono em matriz epoxídica;
- d) **Massores:** o material não deve ser ferromagnético, em razão de possíveis interações magnéticas com os mancais, e com maior massa específica possível, bem como, deve apresentar boa estabilidade dimensional e rigidez;
- e) **Reforço de Fibra:** compósitos de fibra de carbono em matriz epoxídica;
- f) **Montagem:** recomendada a técnica de ajuste por interferência, conforme normas técnicas de acoplamento, adotadas internacionalmente.

Segundo as diretrizes de Fernandes (2015) para o projeto de construção do CDMS, os materiais propostos para este CG em duplo disco devem seguir as mesmas exigências do CG anterior. Os materiais reforçados compósitos de fibra de carbono em matriz de resina epóxi são indicados para a fabricação dos discos, em razão da alta rotação.

O material indicado para as massas girantes é aço maraging ou uma de suas ligas, em razão da elevada massa específica e alta resistência mecânica comparada com outros metais (FRAJUCA; SOUZA; COPPEDÉ, NOGUEIRA; BORTOLI; SANTOS, 2018).

### 3.4 CIRCUITO DE ACIONAMENTO DA MOTORIZAÇÃO DO PROTÓTIPO

Este item apresenta um resumo do projeto de acionamento e controle de velocidade em malha aberta do motor do PDCG-M. A Figura 3.7 ilustra o motor Brushless (DC 26V e 1,1 A) usado neste trabalho.



Figura 3.7: Motor Brushless usado no Projeto do PDCG-M

Fonte: Autor

Escolheu-se o motor de corrente contínua sem escova brushless para aplicação neste projeto em razão da sua larga aplicação na indústria de automação médica e robótica, bem como, por possuir característica técnicas eficientes quando comparamos as razões tamanho/torque e peso/potência (GIERAS, 2002 apud SILVA; TIVES, 2017).

A Figura 3.8 apresenta o diagrama de blocos do projeto do circuito.

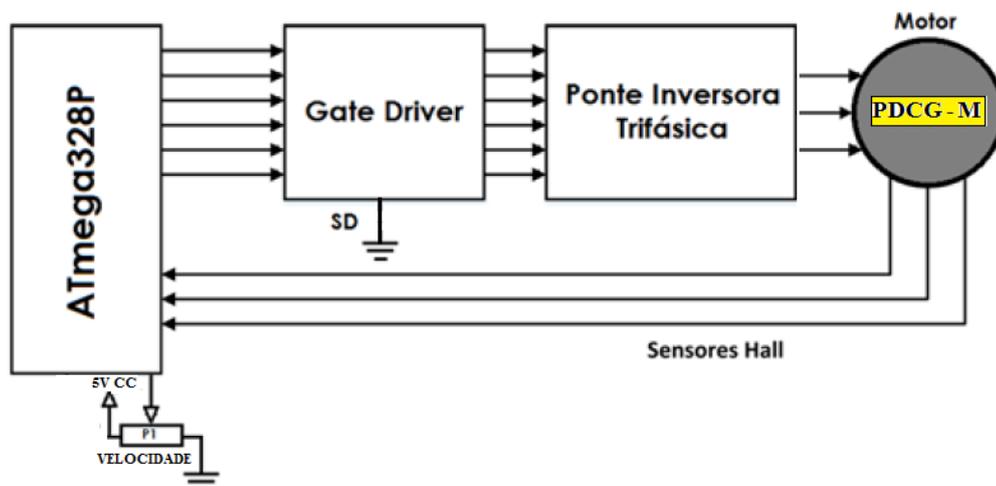


Figura 3.8: Diagrama Simplificado do Projeto do PDCG-M

Fonte: Adaptado (SILVA; TIVES, 2017)

Em seguida são apresentadas a imagem da montagem final do projeto (Figura 3.9) placa Arduino (Figura 3.10) e detalhamento parcial do circuito de acionamento (página seguinte). Acrescente – se que os diagramas esquemáticos completos, a programação de acionamento e outras imagens, são apresentados nos apêndices F\_1, F\_2, e G, respectivamente.

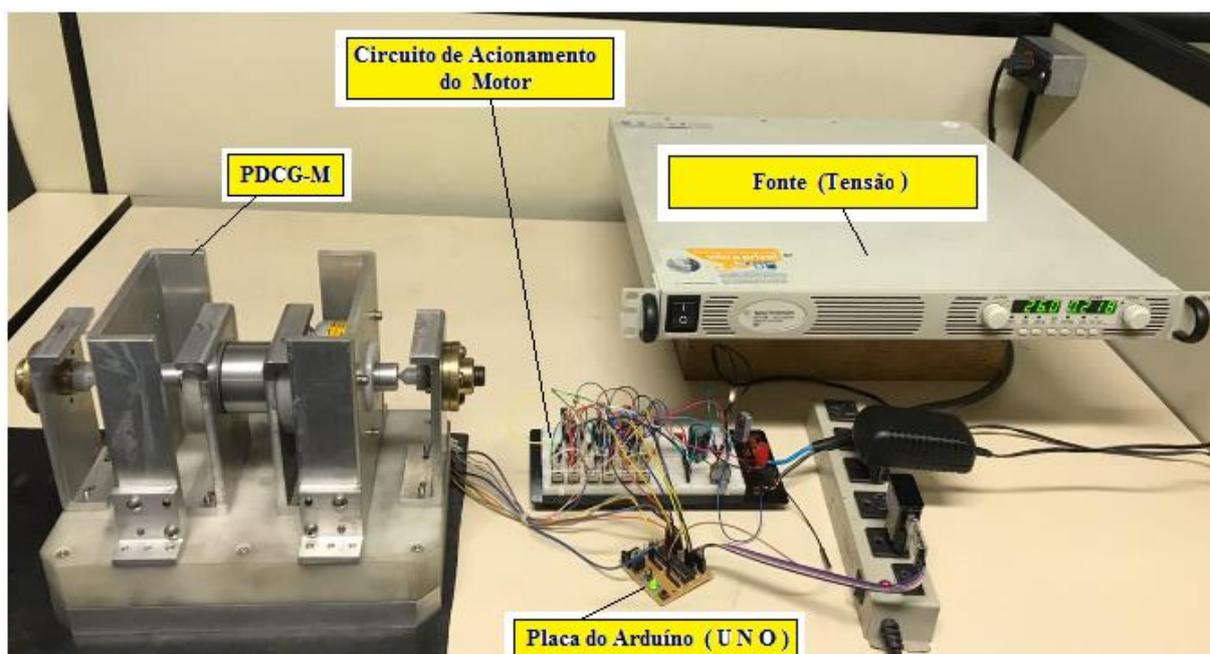


Figura 3.9: Montagem final do Projeto do PDCG-M

Fonte: Autor

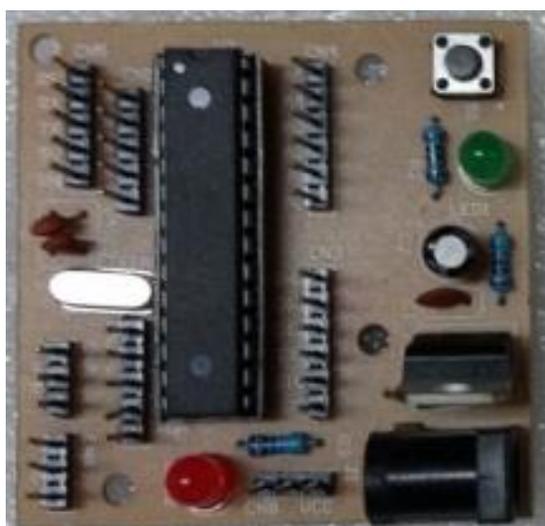


Figura 3.10: Placa do Arduino UNO (Montado pelo Discente do Mestrado Eduardo Sanchez no IFSP)

Fonte: Autor

Esquema da montagem parcial do circuito do projeto no Proteus® (Figura 3.11) e imagem real do circuito no Protoboard (Figura 3.12).

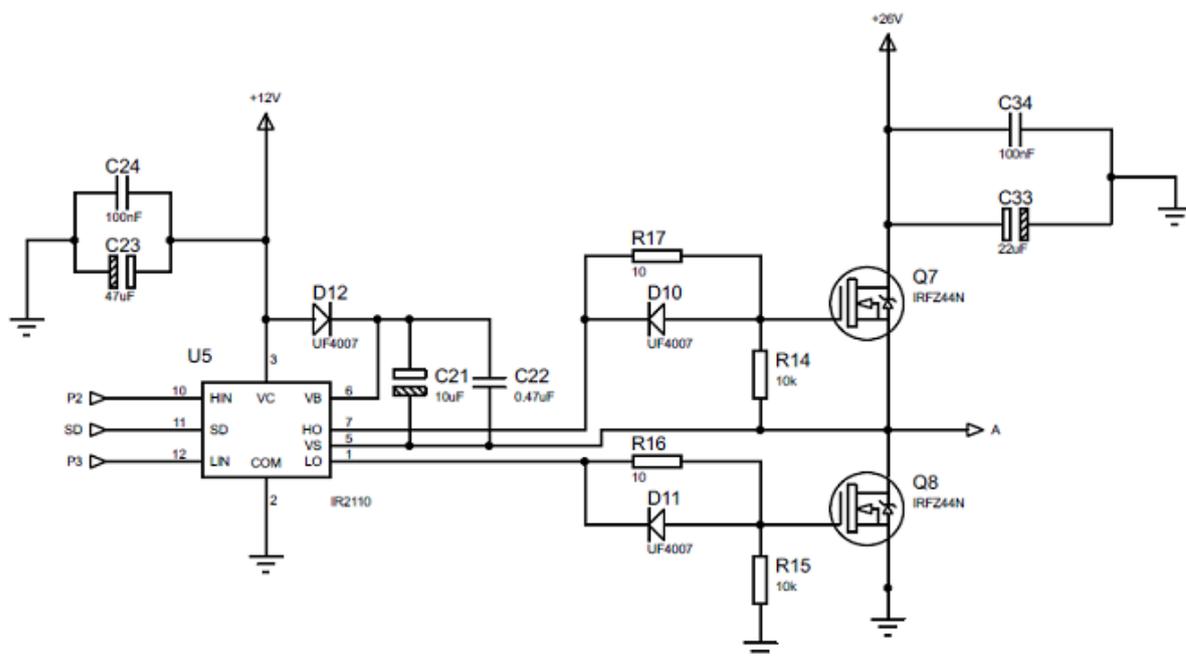


Figura 3.11: montagem parcial do circuito do projeto no Proteus®

Fonte: Autor

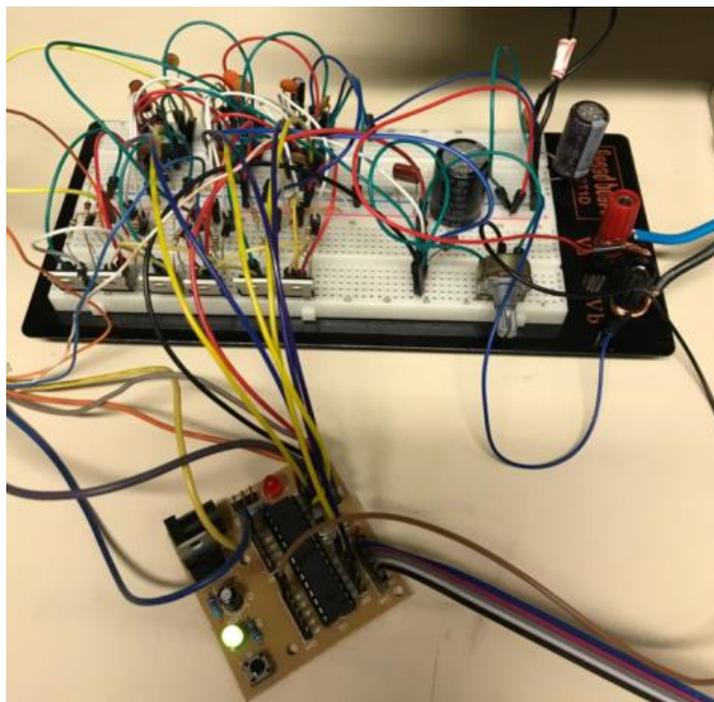


Figura 3.12: imagem real do circuito no Protoboard

Fonte: Autor

### 3.5 PRÉ-TESTES I - ANÁLISE VIBRACIONAL E BALANCEAMENTO DO DSC – 1º PROTÓTIPO

Nesta etapa foram realizados pré-testes de análise vibracional e balanceamento em um Dispositivo de simulação de Campo (DSC) criado na perspectiva de obtenção de respostas para resolução de problemas de vibrações e desbalanceamento apontados nos testes do protótipo Fernandes (2015).

Os pré-testes, simulações e coleta de dados foram realizados nos laboratórios/oficinas e softwares disponíveis na Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC/SP e aparelhos disponibilizados pela empresa privada Arnes Preditiva & Treinamento em apoio ao projeto. Estes resultados iniciais irão se somar a parte experimental no decorrer da construção do PDCG-M. A parte experimental demonstra as técnicas do processo de construção, metodologia empregada, instrumentação, modificações e resultados encontrados.

Nos ensaios experimentais e pré-estudos realizados em laboratório, por meio de análise vibracional e balanceamento, contou-se com ajuda de um Dispositivo de Simulação de Campo – DSC (base, motor elétrico, roda, disjuntor e vibra-stop) e também com materiais, acessórios e equipamentos necessários para a simulação do experimento (alicate especial para balanceamento e massores de chumbo; Balança Digital - BEL® L2102 ( $\pm 0,01$  g); Base magnética e relógio comparador, conforme mostrado na Figura 3.13:



Figura 3.13: Bancada com Materiais no LCMP I e Simulador de Campo com Roda

Fonte: (SILVA NETO; FRAJUCA, 2016)

O Analisador Vibracional e Balanceador de Campo Vaibro® (modelo – SmartVaibroCH1) utilizado nos pré-testes é um medidor portátil com saída em aceleração, velocidade e deslocamento acoplado a um acelerômetro ICP® 106 ( $mV/ unit$ ) fixado à uma base magnética, com faixa de frequência de medição de 2 a 10000 Hz e canhão laser com transdutor, acoplados a um computador para entrada e análise de dados (Figura 3.14).



Figura 3.14: Analisador Vibracional e Canhão Laser com Transdutor.  
(Fonte: Autor)

Outros instrumentos também foram utilizados para auxiliarem os experimentos, tais como: balança digital - Shimadzu® - Mod. AY220 ( $\pm 0,001 g$ ), relógio apalpador – Mitutoyo/ n° 513-401 ( $\pm 0,001 \mu m$ ) e transferidor – Shinwa n.º 19 ( $\pm 0,5^\circ$ ).

Nos pré-estudos e ensaios experimentais realizados em laboratório houve também a necessidade do uso de um torno mecânico para auxílio dos testes.

A Figura 3.15 apresenta a roda (mesma do simulador de campo) montada no torno mecânico.



Figura 3.15: Roda montada no torno mecânico

Fonte: (SILVA NETO; FRAJUCA, 2016)

A Figura 3.16 apresenta o esquema do arranjo experimental utilizado para os dois equipamentos (simulador e torno mecânico).

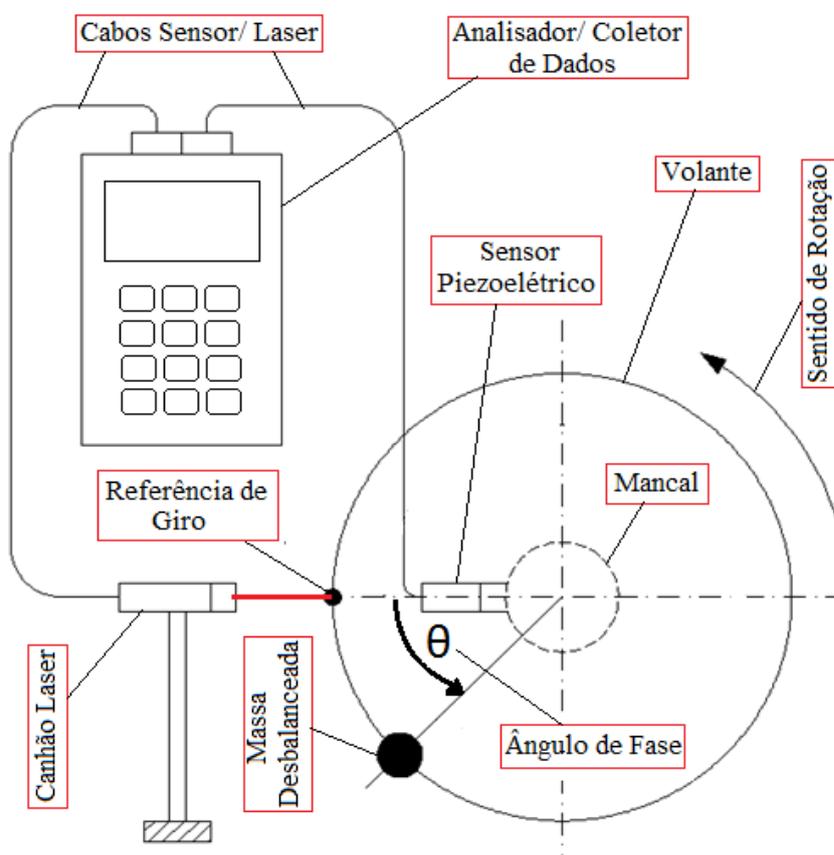


Figura 3.16: Desenho esquemático da análise vibracional e balanceamento.

Fonte: (SILVA NETO; FRAJUCA, 2016)

Para facilitar o entendimento foi construído um esquema (fluxograma) e sequência de imagens demonstrando o procedimento experimental e etapas para análise e vibracional e balanceamento, conforme apresentado nas Figuras 3.17 e 3.18, a seguir:

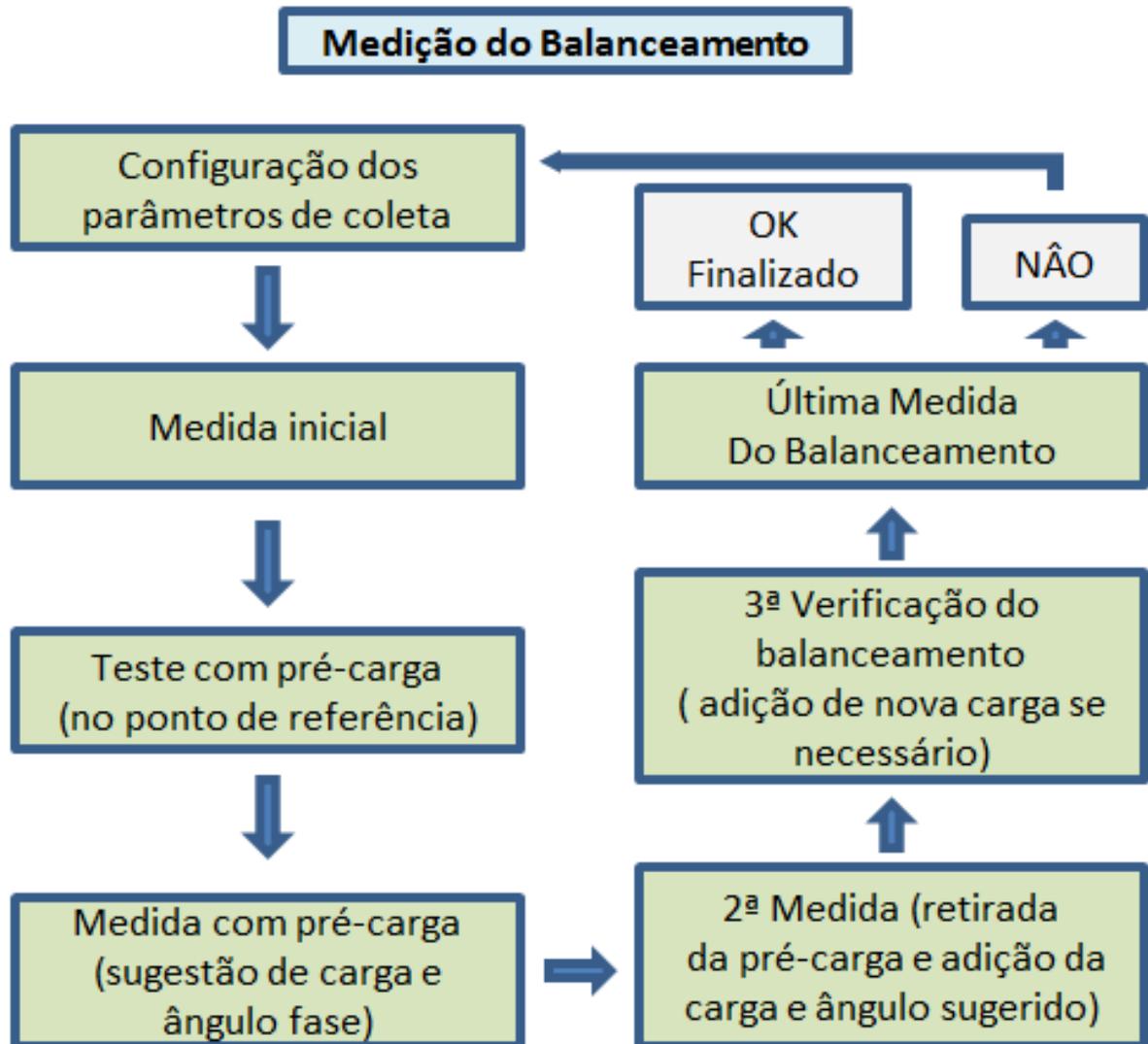


Figura 3.17: Esquema com etapas da análise vibracional e balanceamento.

Fonte: (SILVA NETO; FRAJUCA, 2016)



Para medições e coleta de dados foi utilizado aparelho de análise vibracional e balanceamento em campo da Vaibro®, acoplado a um computador, e utilização do software ROZH MRS 3000® (*Copyright: ROHZ Measurement & Control Co. Ltda*), para análise estatística, vibracional e de balanceamento para todos os efeitos de interação principal.

O programa do software pode fornecer relatórios dos pontos monitorados para posterior acompanhamento do equipamento (preditiva) ou análise do equipamento, conforme ilustra a Figura 3.19.

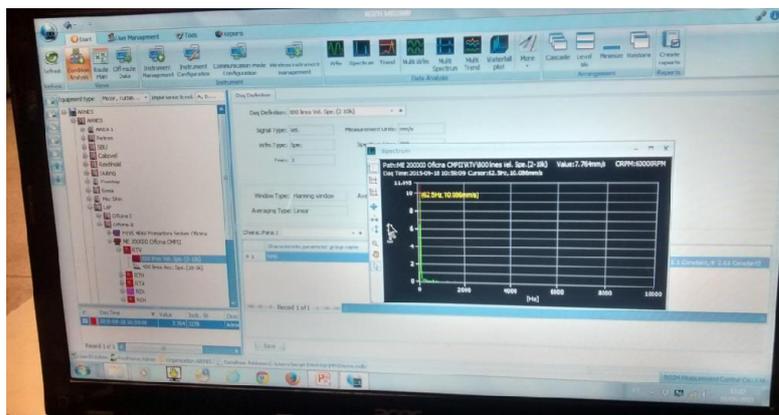


Figura 3.19: software ROZH MRS 3000® (ROHZ Measurement & Control Co., Ltda).

Fonte: Autor

### 3.5.1 Melhorias no dispositivo simulador de campo (DSC) e acessórios para análise vibracional dinâmica

Como o PDCG-M é um trabalho experimental e em razão de dificuldades na aquisição de alguns itens como materiais para construção, motorização e mancais com ímãs de neodímio, foram realizadas paralelamente outras tarefas, focadas em ideias proveniente deste trabalho de pesquisa.

Uma destas ideias foram as melhorias e novos testes no DSC, criado inicialmente com o objetivo de auxiliar no do balanceamento dinâmico do conjunto girante do PDCG-M, pois se enxergou a possibilidade de transformar o DSC em um dispositivo didático para ensino da técnica preditiva de análise vibracional e balanceamento dinâmico, com potencial para geração de um novo artigo para publicação.

O dispositivo antigo apresentou problemas construtivos que inviabilizaram o balanceamento da roda/polia (desgaste no eixo do motor, excentricidade e imperfeições etc).

A nova ideia foi a obtenção de um dispositivo de campo construtivamente balanceado (Figura 3.22), dentro dos níveis criticidade de vibração aceitáveis (NORTON, M., KARCZUB, D., 2003) e que possibilitasse a provocação de um desbalanceamento forçado, através da adição de massas no disco e restabelecimento da condição original do DSC, o mais próximo possível, utilizando a técnica de análise vibracional e balanceamento dinâmico, com auxílio do equipamento da Vaibro®.

As Figuras 3.20, 3.21 e 3.22 mostram a reconstrução do dispositivo:



Figura 3.20: Blank de alumínio, novo motor e instrumentos para confecção do novo DSC  
Fonte: Autor

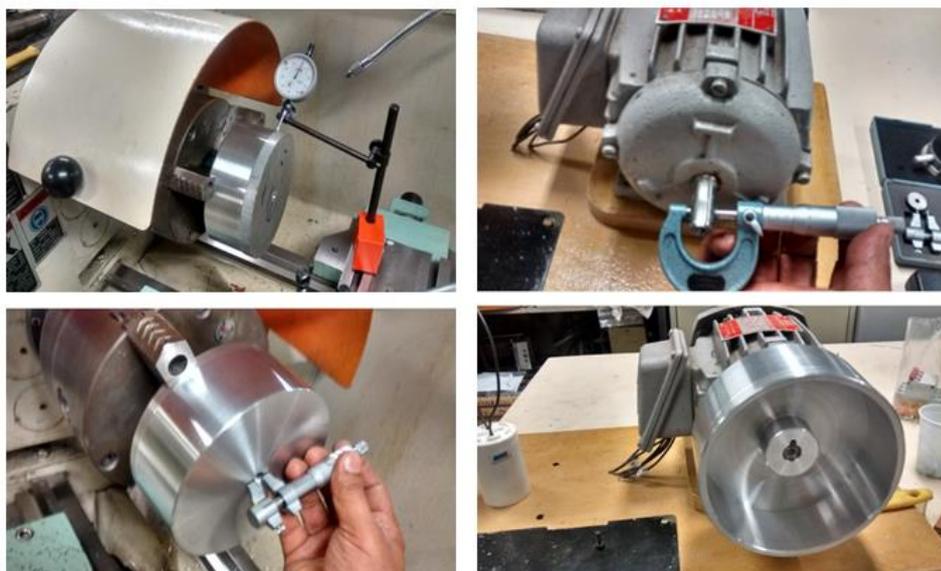


Figura 3.21: Algumas fases da reconstrução e montagem do novo DSC

Fonte: Autor

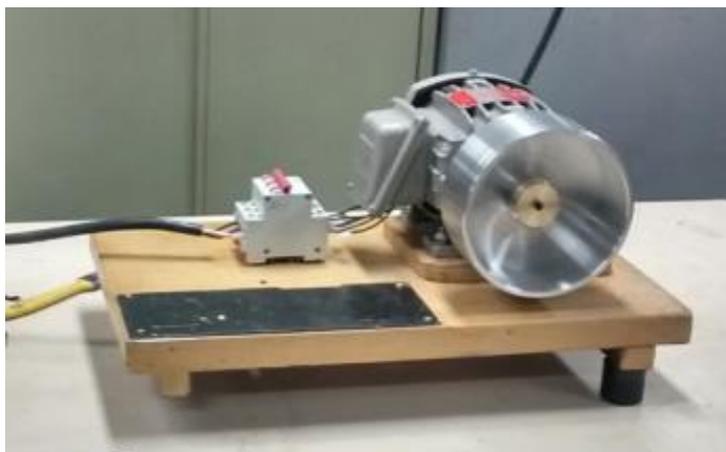


Figura 3.22: Novo DSC para Análise Vibracional Dinâmica finalizado

Fonte: Autor

### 3.5.2 Melhoria da precisão da indicação do ponto de adição de massa para o DSC

Conforme artigo anterior publicado (SILVA NETO; FRAJUCA, 2016), onde foi verificado a necessidade de melhorar a precisão da indicação do ponto de adição de massa durante o processo de balanceamento dinâmico. Sendo assim, foi efetuado a fixação de um transferidor de 360° num pedestal regulável com base magnética, para melhoria da precisão na indicação do ponto de adição/remoção de massa (Figura 3.23), isto melhorou a precisão da indicação do ponto de adição de massa comparado com o uso inicial de um goniômetro.



Figura 3.23: Transferidor 360° fixado em base m magnética

Fonte: Autor

**3.6 TESTES II - COM O NOVO DISPOSITIVO DE SIMULAÇÃO DE CAMPO (DSC)**

Uma ideia inicial para provocar o desbalanceamento do DSC foi utilização de uma pequena massa (massa de vidro), de valor desconhecido e em posição aleatória diferente do ponto de referência, e massores de chumbo adesivados com valores medidos em balança digital de precisão.

Para realização dos novos testes foi efetuada uma pequena alteração no procedimento experimental, ficando o fluxograma e etapas para análise e vibracional e balanceamento conforme seqüência de etapas apresentada na Figura 3.24, a seguir:

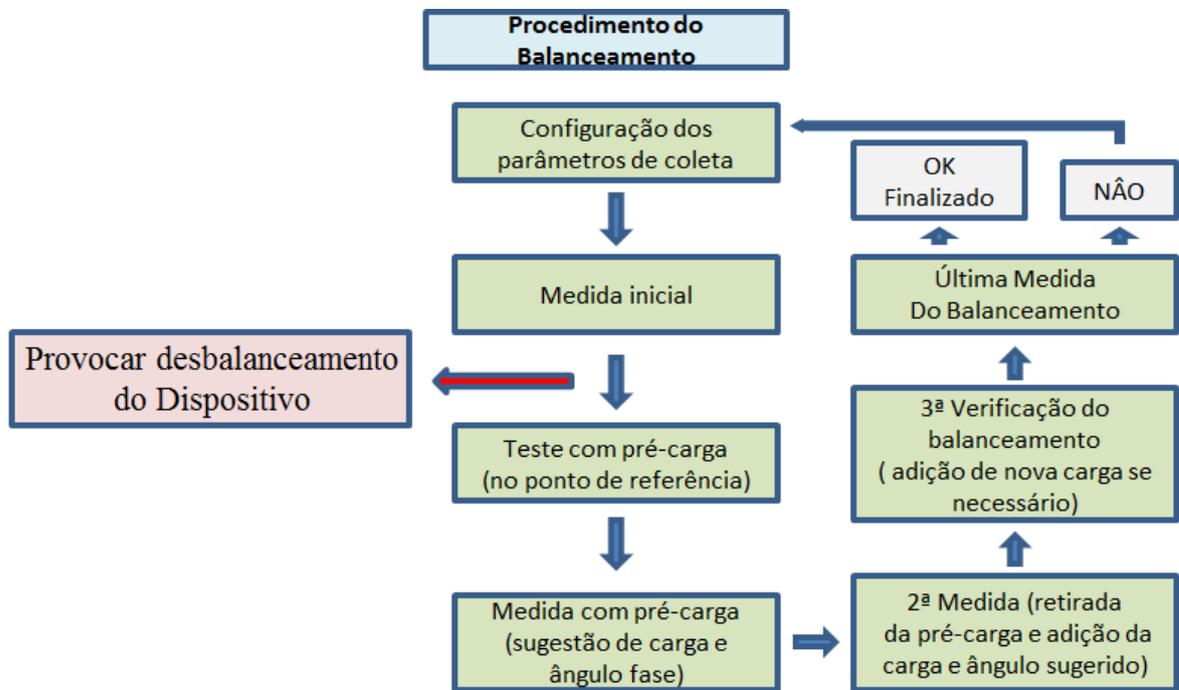


Figura 3.24: Procedimento Experimental do balanceamento dinâmico modificado

Fonte: Adaptação (SILVA NETO; FRAJUCA, 2016)

**3.6.1 Testes II - Configuração dos parâmetros de coleta**

Após fixação da fita e ajuste do canhão laser foi parametrizado o aparelho Vaibro® para o modo RPM (medição de rotação), obtivemos 1796, 8 RPM (Figura 3.25). Isto significa que a montagem do aparato foi efetuada corretamente para prosseguirmos a experiência.



Figura 3.25: Verificação inicial do RPM para início do Procedimento Experimental

Fonte: Autor

Em seguida mudamos para o modo velocidade para medirmos a velocidade média global inicial ( $V_{m0}$ ) do conjunto do dispositivo e obtivemos  $V_{m0} = 1,049$  mm/s (Figura 3.26). O desbalanceamento máximo admissível é 1,500 mm/s (NORTON, M., KARCZUB, D., 2003) e o valor encontrado é a referência para retorno após a provocação do desbalanceamento.

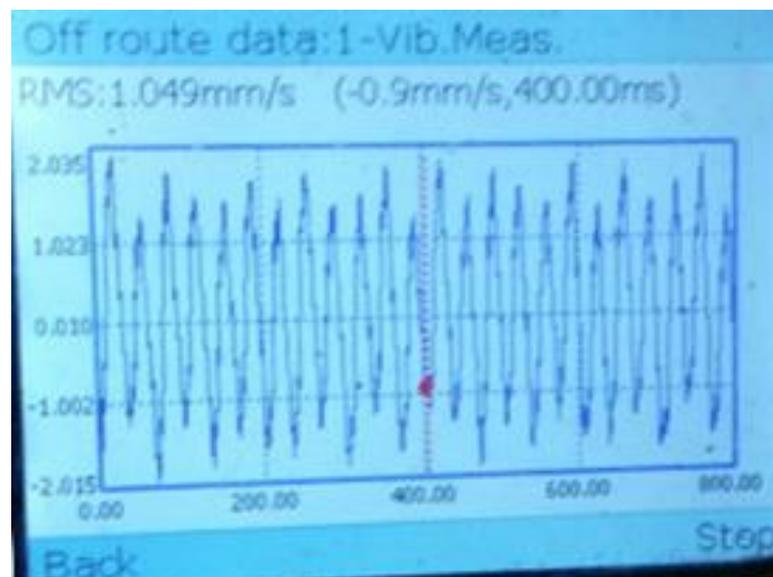


Figura 3.26: Medida a velocidade média global inicial ( $V_{m0}$ )

Fonte: Autor

### 3.6.2 Testes II - Provocação forçada do desbalanceamento do novo DSC

Efetuada a medição da velocidade global média, parametrizou-se o aparelho para função balanceamento e iniciou-se os testes para o balanceamento conforme arranjo experimental, mostrado na Figura 3.27.

Provocou-se o desbalanceamento forçado do dispositivo, adicionando na parte interna da polia, num ponto aleatório e diferente da marca de referência, a massa de vidro.



Figura 3.27: Arranjo Experimental com colocação da massa de vidro  
Fonte: Autor

O DSC foi acionado e efetuamos a medida inicial, com o desbalanceamento forçado, mostrada na Figura 3.28.



Figura 3.28: Medida Inicial com DSC desbalanceado  
Fonte: Autor

### 3.6.3 Teste II - Pré-carga no ponto de referência

Foi adicionado na parte interna da polia, na marca de referência, a pré-carga com massor de chumbo adesivado (Figura 3.29).

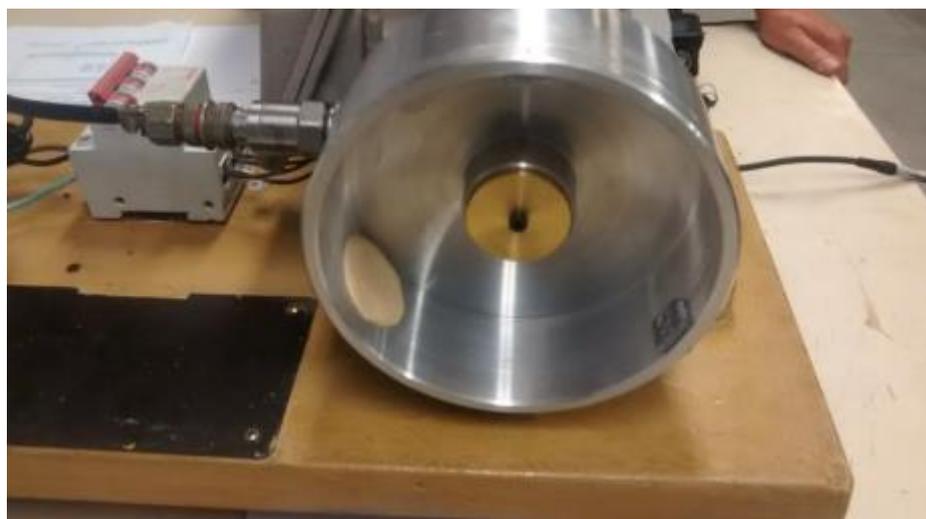


Figura 3.29: Teste inicial com massa de vidro e massor de chumbo adesivado (pré-carga)

Fonte: Autor

O valor padrão é 10,00 gramas, no entanto foi adicionado um valor aproximado de 10,30 gramas (g), conforme ilustração da Figura 3.30.



Figura 3.30: Massores de chumbo adesivados e medida da pré-carga em balança digital de precisão

Fonte: Autor

### 3.6.4 Testes II - Medida com pré-carga (sugestão de carga e ângulo fase)

O DSC foi novamente acionado, efetuou-se a medida com a pré-carga e verificou-se a medida de desbalanceamento, carga sugerida e ângulo de fase indicado para fixação da mesma (Figura 3.31).

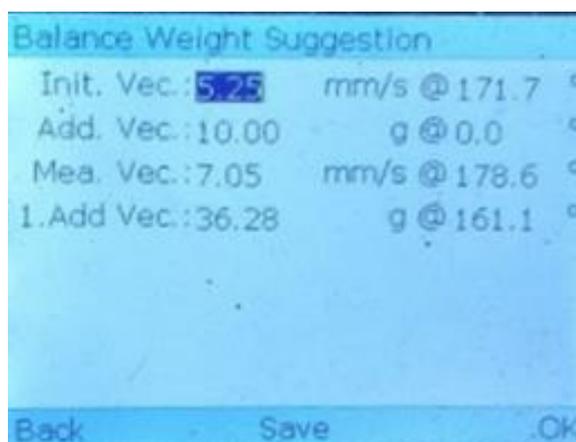


Figura 3.31: Medida do desbalanceamento (valor global), carga sugerida e indicação de ângulo de fase

Fonte: Autor

### 3.6.5 Testes II - Retirada da pré-carga e fixação de massa no ângulo de fase para 2ª medição

Após a fixação da carga sugerida de 32,55 g no ângulo de fase indicado de 161,1°, retirou-se a pré-carga do ponto de referência, antes do prosseguimento para as etapas seguinte, conforme mostra a (Figura 3.32).



Figura 3.32: Fixação da carga sugerida no ângulo de fase e retirada da pré-carga

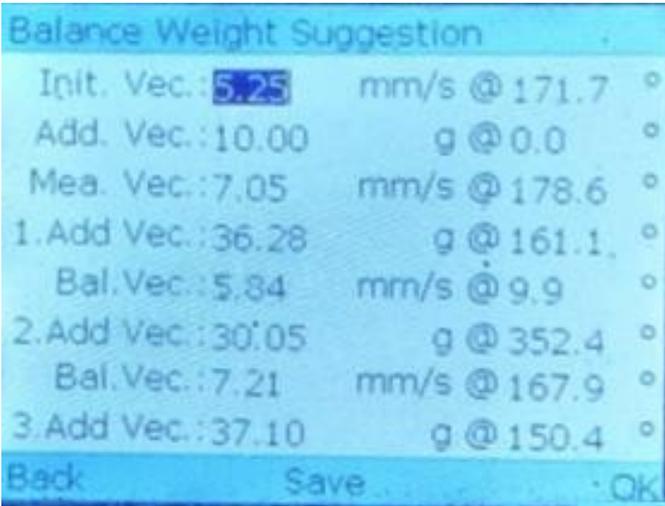
Fonte: Autor

### 3.6.6 Testes II - Prosseguimento de etapas, verificações e análises Preliminares (DSC)

As etapas seguintes de Análise Vibracional e Balanceamento Dinâmico foram efetuadas conforme esquema/fluxograma (Figura 4.5) e manual da Vaibro®.

Durante os testes com o uso da massa de vidro, para provocar o desbalanceamento, a cada medida, tinha-se um valor diferente e não uniforme de velocidade global, ou seja, instabilidade de medição e resultados desfavoráveis.

Efetuando-se análises e observações no decorrer do teste I foram verificadas a ocorrência do espalhamento e modificação da distribuição da massa de vidro, em razão da força centrípeta e inconsistência da mesma, tornando o uso da mesma imprecisa. Outros problemas verificados foram as pequenas diferenças de massa da pré-carga de 10,30 g ao invés de 10,00 g e carga incorreta de um massor de 32,55 g, ao invés de 36,28 g. Acrescenta-se a falta de rigidez da estrutura do dispositivo, percebido com o aumento da medida de desbalanceamento. Desta forma não obtivemos bons resultados no com a massa de vidro no Teste I e conseqüentemente a impossibilidade de precisão e realização da análise vibracional e balanceamento dinâmico, com retorno do DSC próximo a condição original, conforme mostrado no visor do aparelho da Vaibro®, Figura 3.33.



Balance Weight Suggestion		
Init. Vec.:	5.25	mm/s @ 171.7 °
Add. Vec.:	10.00	g @ 0.0 °
Mea. Vec.:	7.05	mm/s @ 178.6 °
1. Add Vec.:	36.28	g @ 161.1 °
Bal. Vec.:	5.84	mm/s @ 9.9 °
2. Add Vec.:	30.05	g @ 352.4 °
Bal. Vec.:	7.21	mm/s @ 167.9 °
3. Add Vec.:	37.10	g @ 150.4 °
Back	Save	OK

Figura 3.33: Medida da velocidade global (mm/s), carga de adição (g) e ângulo de fase (°) no aparelho Vaibro.

Fonte: Autor

Na impossibilidade da utilização da massa de vidro para provocar o desbalanceamento inicial, optamos por descartar o uso da mesma e optar pelo uso na íntegra de massores de chumbo (autoadesivos- roda de alumínio automotiva) para efetuar novos testes.

### 3.6.7 Melhorias na estabilidade do DSC e leitura do canhão laser da Vaibro®

Durante os testes II, com o novo dispositivo, foi observada falta de rigidez da estrutura do conjunto (Figura 3.34), pois, ao colocarmos uma massa acima de 15g para provocar o desbalanceamento, percebia-se aumentadas a trepidação do conjunto e a velocidade global média, dificultando o balanceamento, possibilidade de erro na leitura do transdutor do canhão laser e por consequência as indicações incorretas do ângulo de fase e ponto correto para adição dos massores para efetuação do balanceamento dinâmico.



Figura 3.34: Dispositivo de campo, com vibra-stops em bancada reforçada  
Fonte: Autor

Inicialmente mudamos o dispositivo para uma bancada mais robusta, no entanto o problema persistiu. Outra providência para solução do problema foi a fixação do conjunto (com vibra-stops) com grampos fixos na bancada (Figura 3.35).



Figura 3.35: Dispositivo de campo, com vibra-stops e fixação com grampos fixos na bancada  
Fonte: Autor

Com estas providências melhoramos a rigidez da estrutura do conjunto, leitura do transdutor do canhão laser e indicações dos pontos de adição dos massores. No entanto a velocidade global média inicial ( $V_{m0}$ ) permanência muito próxima dos níveis de criticidade de vibração aceitáveis (Figura 3.36) e não solucionamos as trepidações do conjunto.

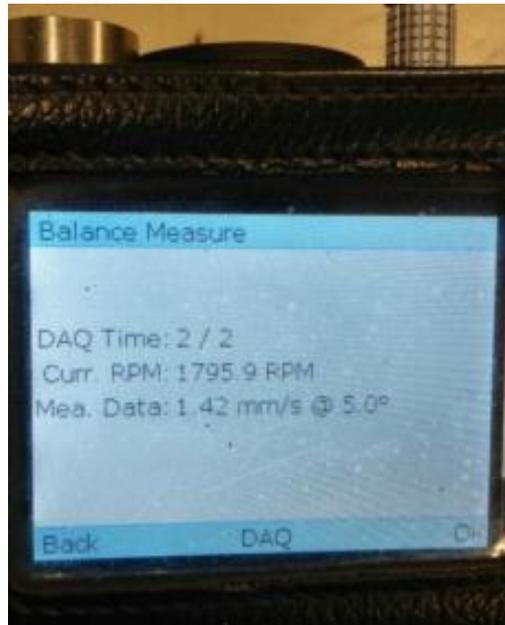


Figura 3.36: Leitura inicial com vibra-stops e fixação com grampos fixos

Fonte: Autor

Na perspectiva de melhorias dos níveis de criticidade de vibração e solução das trepidações do conjunto durante os testes, teve-se a ideia de eliminação dos vibra-stops (Figura 3.37) e fixação do conjunto com grampos fixos na bancada reforçada.



Figura 3.37: Retirada dos vibra-stops do Dispositivo de Campo

Fonte: Autor

A Figura 3.38 ilustra a fixação do conjunto (sem vibra-stops) com grampos fixos na bancada.



Figura 3.38: Dispositivo de campo, em vibra-stops e fixação com grampos fixos na bancada

Fonte: Autor

Esta providência fez com que fosse eliminado o problema de trepidações do conjunto e diminuição níveis de criticidade de vibração com consequente queda da velocidade global média inicial ( $V_{m0}$ ) inicial para 0,429 mm/s, Figura 3.39.

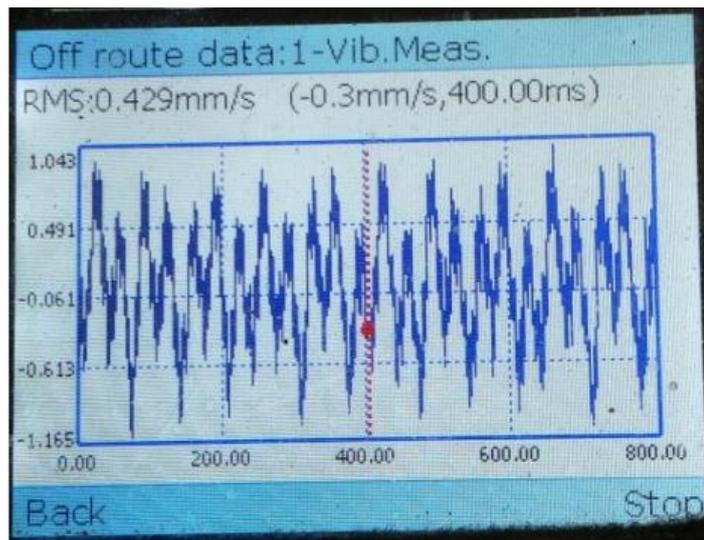


Figura 3.39: Velocidade global média inicial ( $V_{m0}$ ) com melhorias na rigidez do Dispositivo

Fonte: Autor

### 3.7 TESTES III - APÓS MELHORIAS NO DISPOSITIVO DE SIMULAÇÃO CAMPO

Seguindo o mesmo procedimento experimental do teste II, ou seja, provocando o desbalanceamento do DSC, desta feita por meio de uma pequena massa de chumbo adesivada (Figura 3.40), de valor desconhecido (máximo 15g) e fixado em posição aleatória diferente do ponto de referência.



Figura 3.40: Uso de massores de chumbo adesivado para provocação do desbalanceamento e balanceamento do DSC (teste III)

Fonte: Autor

Igualmente massores de chumbo adesivados, com valores medidos em balança digital de precisão, foram utilizados para balanceamento do DSC seguindo fluxograma e etapas para análise vibracional e balanceamento, conforme sequência apresentada na Figura 3.24 (página 114).

Os resultados e medições do teste III, após melhorias efetuadas no Dispositivo de Simulação Campo (DSC), foram anotados e apresentados na Tabela 4.2 (página 166)

### 3.8 TESTES IV - COM MOTOR DE PASSO MODIFICADO

Em razão da dificuldade na aquisição de um motor com as mesmas características do utilizado no trabalho de Fernandes (2015) e objetivando a realização dos trabalhos experimentais iniciais da motorização do PDCG-M, foi utilizado um motor de passo com modificações, na perspectiva de obtenção de rotação suficiente para testar a Lei de Lenz proposta no protótipo de Linares (2016). O trabalho efetuado consistiu em desmontar o motor de passo, construir um novo rotor (eixo), modificado e não magnetizado, com intuito de transformar o motor de passo num MRV, Figura 3.41.



Figura 3.41: Eixo novo do motor pré-usinado (esquerda) e eixo original  
Fonte: Autor

Foi utilizado, para confecção do novo rotor, sobra de material de consumo existente no Laboratório de Usinagem da FATEC/SP e inicialmente não foi feita a análise química do material. O rotor foi torneado entre pontas (com arrastador e por atrito), com as mesmas medidas do rotor original e controlado com instrumentos de precisão. Em seguida houve a tentativa de fresamento dos “dentes” do rotor na fresadora e com auxílio de um divisor, no entanto não foi possível, em razão do desgaste excessivo da fresa de aço rápido. As Figuras 3.42 e 3.43 demonstram os processos de torneamento e tentativa de fresamento.

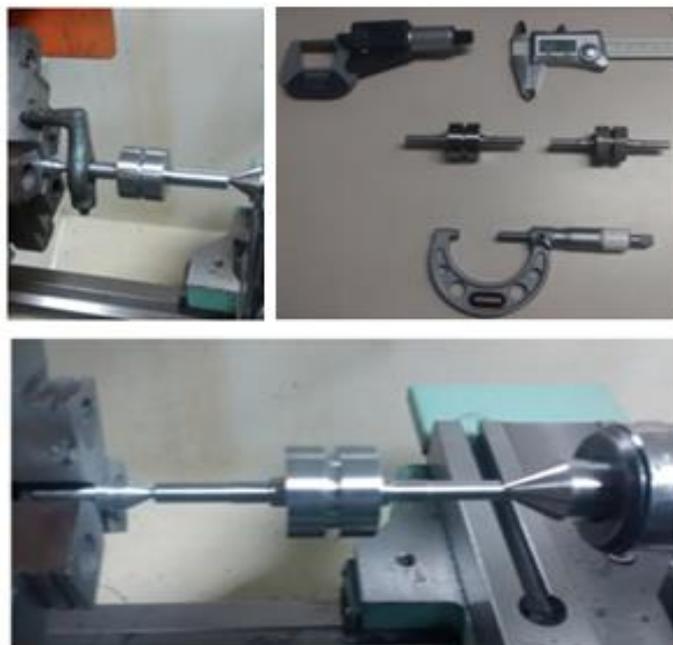


Figura 3.42: Torneamento do novo rotor entre pontas e instrumentos de medida usados  
Fonte: Autor

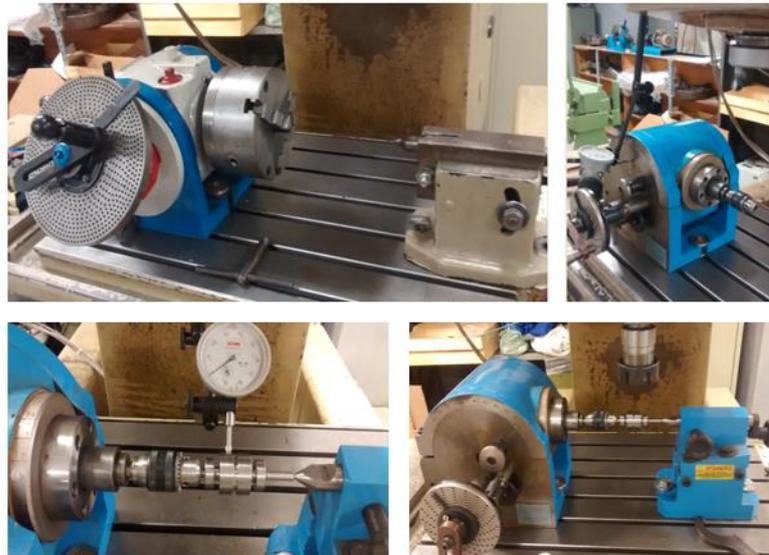


Figura 3.43: Preparação e alinhamento do divisor, e tentativa de fresamento do rotor

Fonte: Autor

Em razão do desgaste excessivo da fresa de aço rápido, foi preparado um corpo de prova do mesmo material para análise, utilizando microscopia óptica, Figura 3.44. A análise no Laboratório de Tratamento Térmico e Seleção de Material (TTSM) da FATEC/SP revelou que se tratava do aço SAE 52100, alto teor de Carbono (0,97 %C) e Crômio (1,38 %Cr).

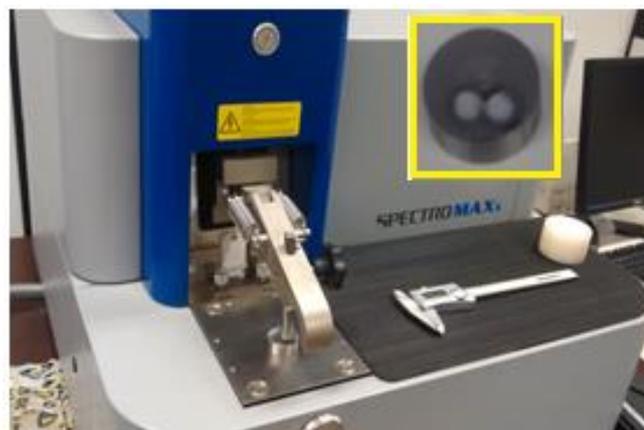


Figura 3.44: Equipamento para análise química do material do rotor por microscopia óptica - SPECTROMAXx DCM 2752 e amostra analisada (quadro amarelo no interior da figura)

Fonte: Autor

A solução encontrada para usinar os dentes no rotor, aço SAE 52100, foi a usinagem não convencional (UNC), optando-se pela eletroerosão a fio e por penetração, devido forma complexa do perfil, dureza do material e precisão

do processo. Essa usinagem foi realizada no Laboratório de Usinagem do SENAI Mariano Ferraz. As imagens da Figura 3.45, a seguir, mostra o eletrodo de cobre usinado na eletroerosão a fio e o rotor usinado na eletroerosão à penetração.

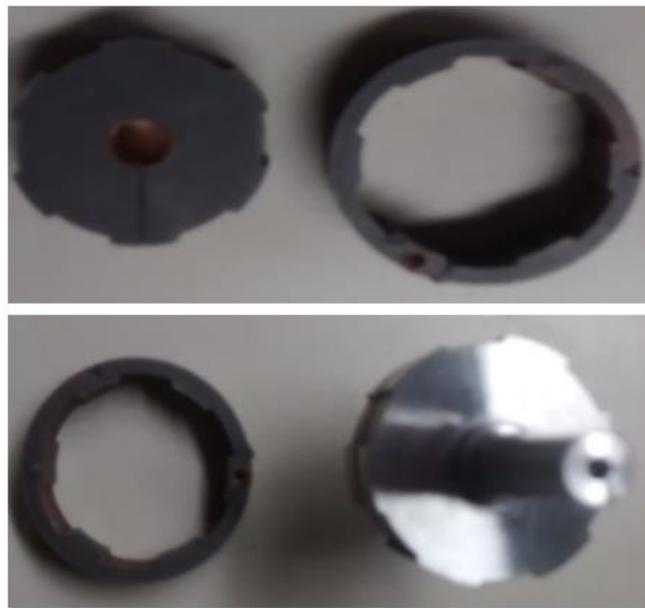


Figura 3.45: Eletrodo de cobre eletrolítico usinado por erosão a fio (acima) e eixo usinado por erosão a penetração (abaixo)

Fonte: Autor

A Figura 3.46 mostra o motor de passo, montado com um novo rotor, pronto para teste.

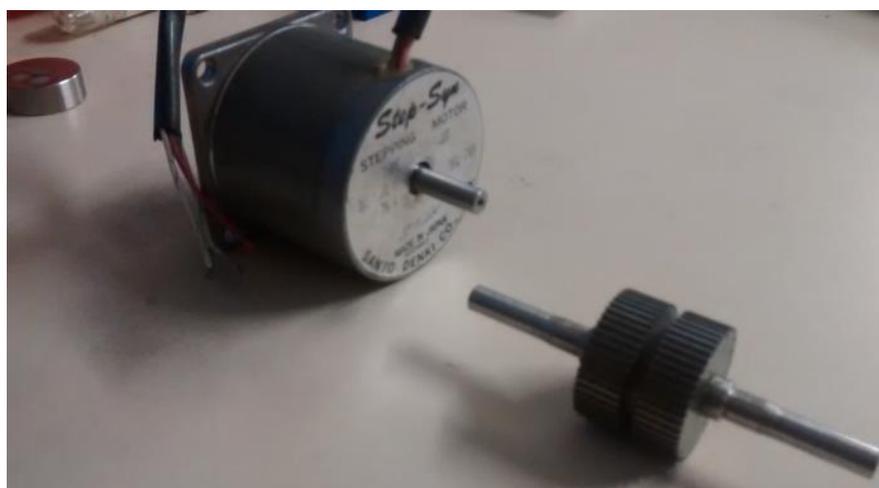


Figura 3.46: Motor modificado e com novo rotor

Fonte: Autor

### 3.8.1 Testes IV - Controle de motor de passo: Uso do Arduíno e drive com ponte H L298N

Para controle de motor de passo foi utilizado uma plataforma de hardware e software *open source* Arduíno UNO e um o driver ponte H L298N. Uma das grandes vantagens desse módulo é que ele suporta correntes de até 2A por canal (RAMOS et. al, 2014).

A Figura 3.47 ilustra as especificações e pinagem do drive utilizado:

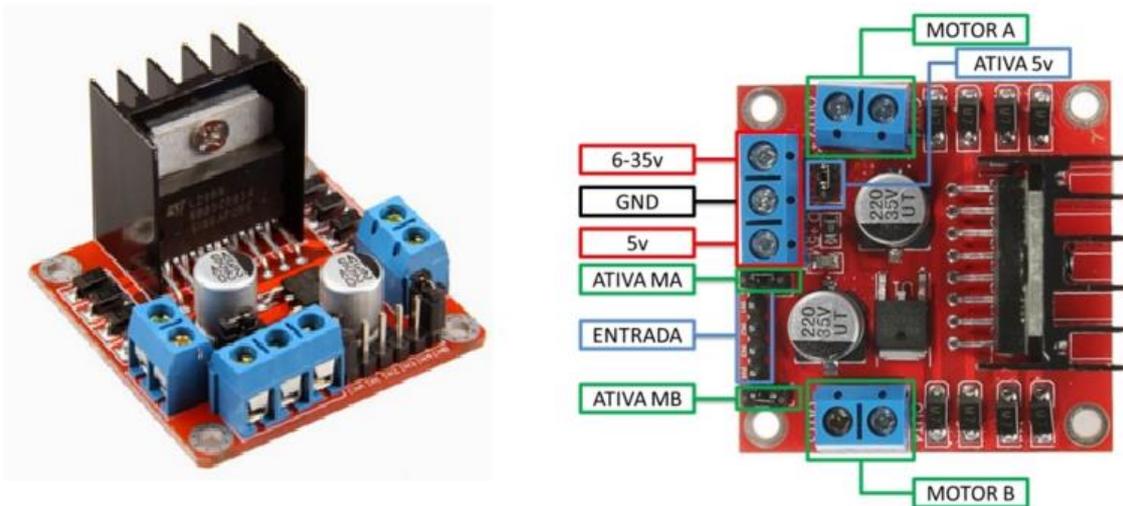


Figura 3.47: Driver motor ponte H L298N

Fonte: <http://www.arduinoocia.com.br/2014/08/ponte-h-l298n-motor-de-passo.html>

Esquema para teste de módulo com um motor de passo bipolar de 5 volts, utilizando uma fonte externa para alimentação, Figura 3.48.

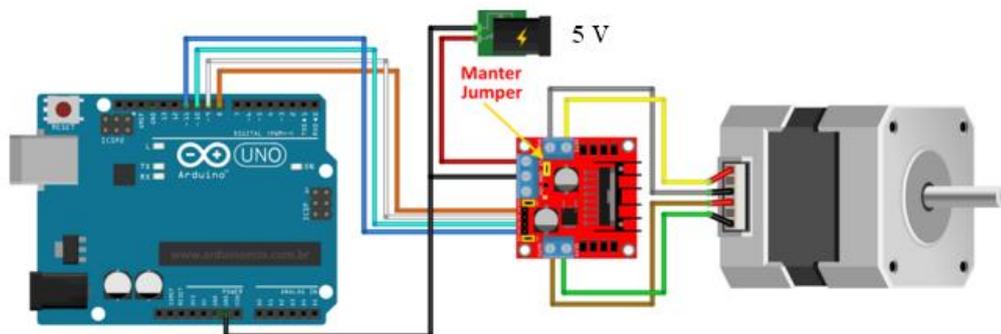


Figura 3.48: Esquema para teste de módulo (Desenho adaptado)

Fonte: <http://www.arduinoocia.com.br/2014/08/ponte-h-l298n-motor-de-passo.html>

O arranjo experimental usado para teste do motor de passo com rotor modificado é ilustrado na Figura 3.49.

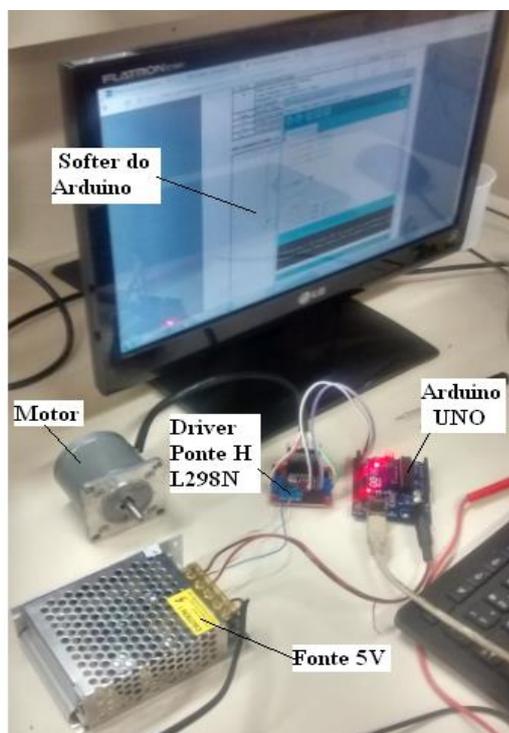


Figura 3.49: Arranjo Experimental do Teste com o Motor de Passo

Fonte: Autor

Verificou-se que os resultados obtidos nos testes experimentais utilizando o motor de passo modificado não foram satisfatórios, pois, com as medidas originais do rotor o motor girou muito lentamente, e aumentando levemente o entreferro entre o rotor e o estator o motor parou de girar. Sendo assim descartou-se a possibilidade do uso deste motor de passo modificado.

### 3.9 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DE DISPOSITIVO PARA CALIBRAÇÃO DE GRAVÍMETROS - MODULAR (PDCG-M)

As etapas de construção do PDCG - M, para pré-montagem foram realizadas em acordo com o estudos realizados nos trabalhos anteriores, diretrizes construtivas do trabalho de Fernandes (2015), ideias do trabalho de Linares (2016), pré-testes de análise vibracional e balanceamento efetuados no Dispositivo de Simulação de Campo – DSC nos laboratórios da Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC/ SP.

A rotação máxima alcançada no experimento de Fernandes (2015), com o rotor original do motor, não ultrapassou os 1.500 RPM, em razão dos constantes choques do rotor com o estator, desde as primeiras rotações. Atribuiu-se esse problema à força de atração exercida pelo núcleo do motor MIP, que é construído com ferrite magnetizada (permanente).

Para evitar o problema ocorrido anteriormente, foi pensado a criação de mancais magnéticos para levitação utilizando a Lei de Lenz (LINARES, 2016) para estabilização do eixo e sustentação da flange do CG e mudança da posição do conjunto do motor para extremidade do eixo, conforme projeto modular apresentado nas Figuras 3.50 e 3.51

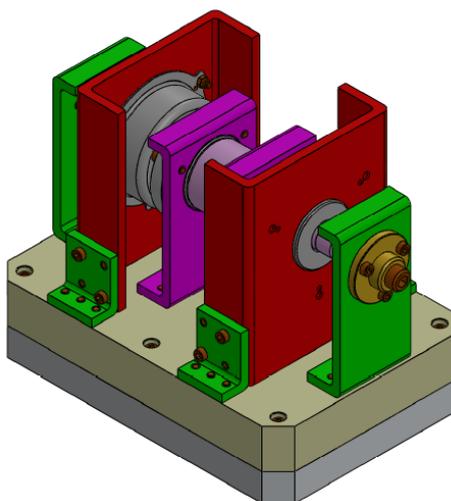


Figura 3.50: Vista da Montagem em 3D do Projeto Modular do PDCG-M

Fonte: Autor

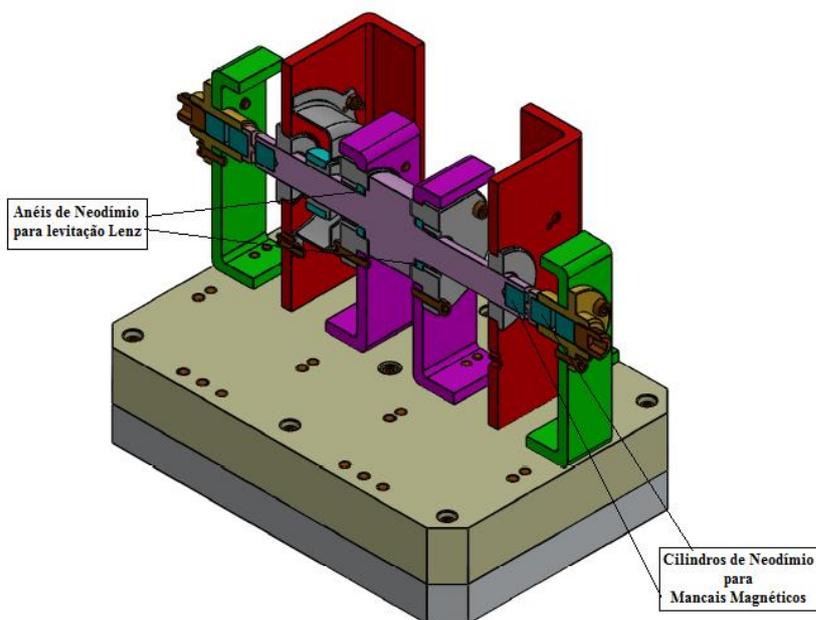


Figura 3.51: Vista da Montagem em 3D em Corte do Projeto Modular do PDCG-M

Fonte: Autor

### 3.9.1 Fresamento das bases e suportes modulares

Nesta etapa de construção do PDCG-M foram utilizadas: uma fresadora ferramenteira com graduação analógica e outra assessorada com régulas digitais e precisão milesimal. Os alinhamentos do cabeçote e da morsa na fresadora ferramenteira (Figura 3.52) para garantia de paralelismo, esquadrejamento e alinhamento de furações durante as usinagens das partes.



Figura 3.52: Alinhamentos do Cabeçote e Morsa da Fresadora Ferramenteira Analógica

Fonte: Autor

A Figura 3.53 mostra o alinhamento da morsa na fresadora com régulas digitais.



Figura 3.53: Alinhamento da Morsa na Fresadora Ferramenteira de Coordenadas

Fonte: Autor

Foram confeccionadas para o PDCG-M uma base principal polimérica e dielétrica para isolamento (poliacetal-POM) e outra metálica e não-ferromagnética (alumínio) para estabilização. Ambas com excelentes propriedades mecânicas e térmicas (Figuras 3.54)



Figura 3.54: Fresamento e esquadreamento da base de poliacetal

Fonte: Autor

Para garantia de uma superfície plana na base de poliacetal foi utilizada uma “bailarina” mono cortante de aço rápido, conforme demonstra a Figura 3.55:



Figura 3.55: Fresamento da superfície da base de poliacetal com “bailarina”

Fonte: Autor

Não foi possível o uso da “bailarina” mono cortante de aço rápido para usinar a base de alumínio, para garantia de uma superfície plana, em razão da vibração da ferramenta. O acabamento final foi efetuado com uma fresa de topo de corte duplo, Figura 3.56.



Figura 3.56: Fresamento da base de Alumínio

Fonte: Autor

Posteriormente foram usinados chanfros de 15 x 15 mm nas extremidades das bases polimérica e metálica em razão do espaço disponível na câmara de vácuo (diâmetro 400 x 300 mm de altura), conforme ilustra a Figura 3.57.



Figura 3.57: Usinagem dos chanfros das Bases

Fonte: Autor

Os ajustes da referência inicial ( $X_0$ ,  $Y_0$ ), no fresamento das bases e de cada suporte modular para o ímã do mancal da extremidade, anel de neodímio e motor, foram definidos com auxílio de um pino retificado de 10 mm (com compensação de metade do diâmetro) e um fita de papel de 0,02 mm (também compensada). Definida a posição de origem (ponto zero do centro dos eixos que executam movimentos de rotação) para usinagem (fresamento, furação e mandrilhamento) de cada peça, foram estabelecidas as coordenadas à partir do referenciamento realizado anteriormente, Figura 3.58.



Figura 3.58: Referenciamento com pino retificado e fita de papel

Fonte: Autor

Para construção dos suportes para fixação dos anéis de neodímio, com objetivo de efetuar o testes usando a Lei de Lenz, foi utilizado tubo extrudado com liga de alumínio naval 6061, material com excelentes propriedades mecânicas e disponível no Laboratório de Projetos de Equipamentos Especiais (LPE) da FATEC-SP. Foram realizados no material o serramento, fresamento, mandrilhamento (Figura 3.59) e furação coordenada.



Figura 3.59: Mandrilhamento dos Suportes de Fixação dos Anéis de Neodímio

Fonte: Autor

A Figura 3.60 mostra o fresamento dos suportes para fixação dos ímãs dos mancais das extremidades do PDCG-M.



Figura 3.60: Fresamento dos Suportes dos Ímãs dos Mancais Magnéticos

Fonte: Autor

Como o ferramental para o mandrilhamento dos furos nos suportes de alumínio para fixação dos anéis de neodímio era limitado (regulagem manual), tornando difícil o controle preciso do diâmetro e como também os ímãs de neodímio são quebradiços e desgastam com o atrito com outros metais, optou-se pela confecção de buchas de poliacetal para facilitar a montagem e prevenir desgastes nos ímãs, Figura 3.61.



Figura 3.61: Torneamento, Fresamento e Buchas de Fixação dos Anéis de Neodímio

Fonte: Autor

A usinagem dos suportes de alumínio para fixação dos motores também foi efetuada na fresadora de coordenadas, para garantir a precisão na montagem e alinhamento do conjunto, Figura 3.62.



Figura 3.62: Furações e Mandrilhamento dos Suportes de Fixação dos Motores

Fonte: Autor

### 3.9.2 Torneamento do eixo principal e embutimento dos ímãs de neodímio dos mancais

Para garantir a concentricidade do eixo, após a usinagem de desbaste dos diâmetros e furos de centrar, foi confeccionada uma ponta postiça. Esta técnica é muito utilizada em ferramentaria, quando o objetivo é a garantia da concentricidade do eixo. A Figura 3.63 ilustra a ponta postiça construída para usinagem do eixo.

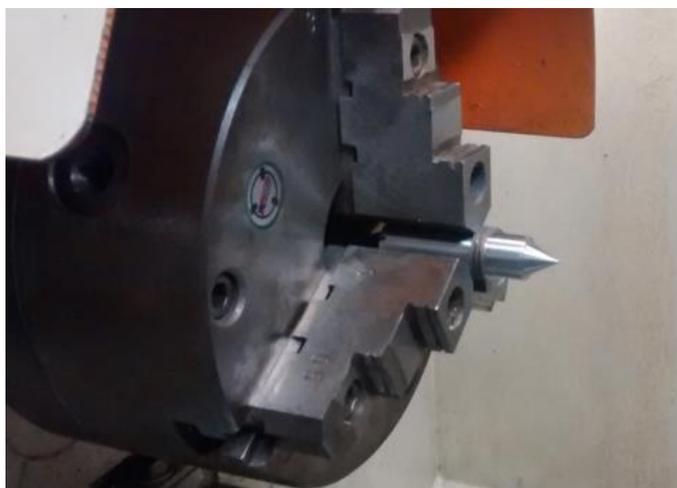


Figura 3.63: Usinagem de ponta cônica postiça para Torneamento

Fonte: Autor

Inicialmente o desbaste do eixo foi efetuado entre pontas com auxílio de um arrastador (Figura 3.64), por conta dos esforços de usinagem. O uso do arrastador é necessário neste tipo de operação, no entanto limita a rotação e provocam desbalanceamento e vibrações no sistema máquina, ferramenta e peça.

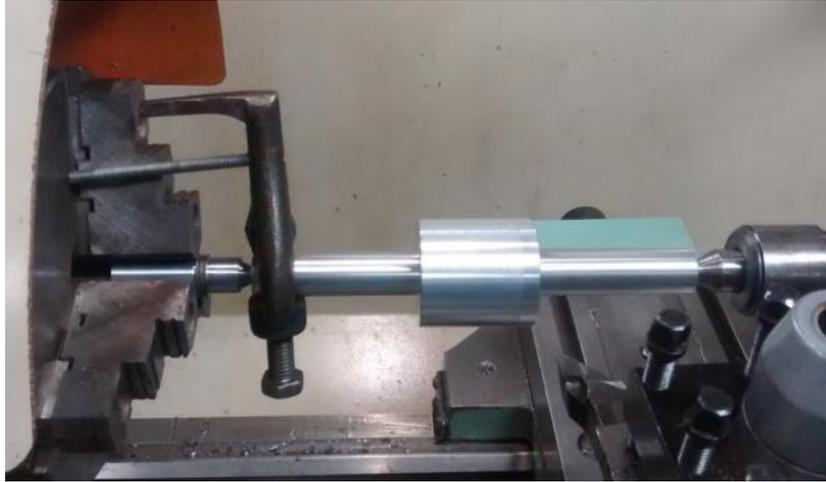


Figura 3.64: Torneamento do Eixo entre Pontas com Arrastador

Fonte: Autor

Após o desbaste do eixo foi dado acabamento no mesmo entre pontas, porém, sem o arrastador. Deixou-se pouco sobremetal para o acabamento e utilizou-se pressão do contraponto e o atrito para o arraste da peça (Figura 3.65).



Figura 3.65: Torneamento do Eixo entre Pontas sem Arrastador (pressão/ atrito)

Fonte: Autor

Esta parte da usinagem do eixo foi bastante desafiadora, pois, para evitar as interferências entre os campos magnéticos dos anéis de neodímio (Lenz) e os ímãs dos mancais das extremidades, houve a necessidade de extensão dos rebaxos das extremidades do

eixo. Para garantir a concentricidade e manter o eixo balanceado foi criado um dispositivo com auxílio de um rolamento e uma luneta (Figura 3.66). A conferência da concentricidade e paralelismo foi efetuada com auxílio de um relógio comparador.



Figura 3.66: Uso de Luneta e Rolamento para Torneamento do Alojamento do Ímã do Mancal

Fonte: Autor

A usinagem do furo para alojamento do ímã de neodímio no eixo foi efetuada com uma ferramenta intercambiável pequena. Houve a necessidade da construção de um suporte para fixação da mesma no porta ferramenta do torno mecânico, conforme ilustra a Figura 3.67.



Figura 3.67: Dispositivo de fixação de Ferramenta para Torneamento do Alojamento do Ímã do Mancal

Fonte: Autor

As construções dos dispositivos e conferência da concentricidade e paralelismo do eixo propiciaram uma ótima usinagem dos furos para os alojamentos dos ímãs de neodímio. Os embutimentos dos ímãs dos mancais no eixo ocorreram de forma satisfatória (Figura 3.68).



Figura 3.68: Eixo com Ímã de Neodímio Montado na Extremidade

Fonte: Autor

### 3.9.3 Montagem e verificação dos módulos do PDCG-M

Após o fresamento e furação coordenada do suporte de alumínio foram efetuadas as montagens, com tolerância centesimal, das buchas de poliacetal e anéis de neodímio (Figura 3.69) nos módulos para o teste da lei de Lenz no PDCG-M.



Figura 3.69: Suportes de Fixação do Anéis de Neodímio com Buchas e Pré-montados

Fonte: Autor

Foram efetuadas as verificações de esquadro e planicidade do módulo dos anéis de neodímio em mesa de desempenho após a montagem do conjunto, conforme ilustra a Figura 3.70.



Figura 3.70: Suporte de Fixação do Anel de Neodímio com Bucha, Verificação de Esquadro em Mesa de Desempenho

Fonte: Autor

Após a usinagem na fresadora de coordenadas foram efetuadas as montagens das buchas de latão, para alojamento preciso dos ímãs de neodímio (Figura 3.71), na parte móvel dos mancais magnéticos das extremidades do eixo, no conjunto do PDCG-M.



Figura 3.71: Suportes de Fixação dos Ímãs dos Mancais Magnéticos e Montagem das Buchas

Fonte: Autor

Após a montagem dos módulos dos mancais magnéticos foram efetuados os roscamentos parciais nas buchas de latão (Figura 3.72), os quais são necessários para regulagem da intensidade do campo magnético nas extremidades do eixo.

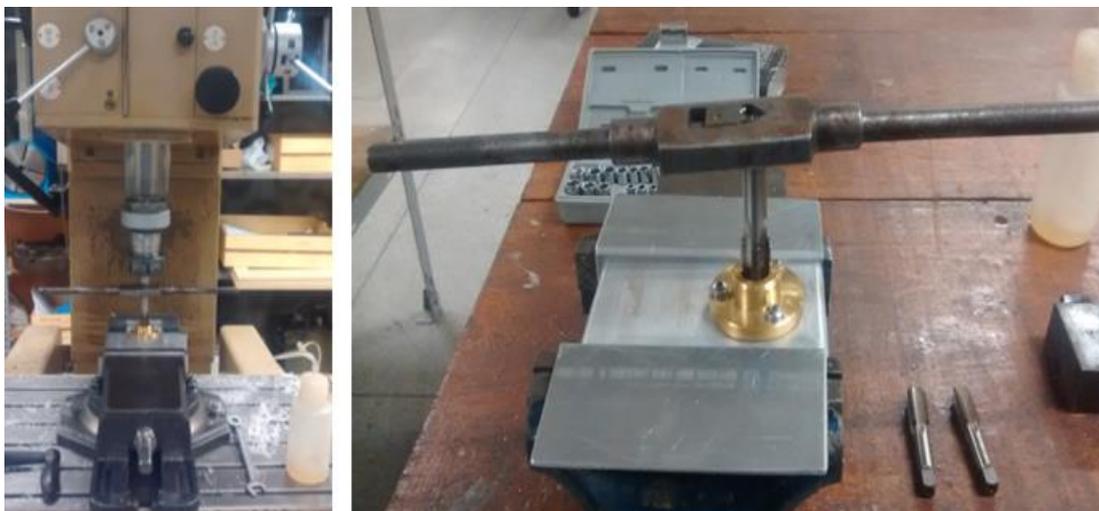


Figura 3.72: Roscamentos parciais nas buchas de latão na fresadora e na bancada

Fonte: Autor

Também foram efetuadas as verificações de esquadro e planicidade nos módulos dos mancais magnéticos, em mesa de desempenho, após a montagem do conjunto, conforme ilustra a Figura 3.73.



Figura 3.73: Suportes de Fixação dos Ímãs com Bucha de Latão e Verificação de Esquadro no Desempenho

Fonte: Autor

As verificações de alinhamento e esquadro dos módulos dos mancais magnéticos, na mesa de desempenho, foram efetuadas com auxílio de um pino guia retificado e longo, conforme ilustra a Figura 3.74.



Figura 3.74: Suportes dos Mancais, Verificação de Esquadro e Alinhamento com Pino Guia no Desempeno

Fonte: Autor

### 3.9.4 Preparação do motor e adaptação do rotor

Antes dos trabalhos a serem realizados na carcaça do motor de acionamento do PDCG efetuou-se a medição tridimensional das coordenadas das furações do mesmo, conforme ilustra a Figura 3.75.

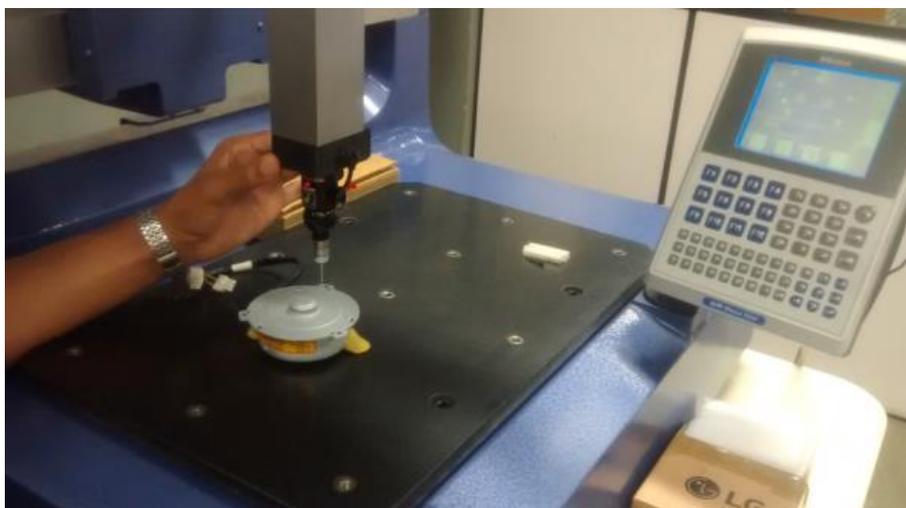


Figura 3.75: Medição Tridimensional das Coordenadas das Furações do Motor – Mitutoyo / FATEC-SP

Fonte: Autor

Segundo Fernandes (2015) foi observado um aquecimento no motor usado em seu projeto, porém o problema foi atenuado com a abertura da carcaça, o que permitiu um melhor resfriamento das bobinas e também aumentou o acesso à interface estator/rotor, facilitando a tarefa de centralizá-los a cada experimento (Figura 3.76).



Figura 3.76: Abertura feita na carcaça do motor

Fonte: Fernandes (2015)

Neste trabalho optou-se inicialmente pela abertura parcial da carcaça (Figura 3.77), pois o suporte do motor foi construído em alumínio na perspectiva da dissipação do calor gerado nas bobinas.



Figura 3.77: Usinagem de Abertura Parcial da Carcaça do Motor

Fonte: Autor

Em seu trabalho Fernandes (2015) considerou o acoplamento por ajuste com interferência o rotor do motor em dois eixos cilíndricos de alumínio com furos nas extremidades para alojamento dos ímãs de neodímio dos mancais MPS. As Figuras 3.78 e 3.79 apresentam, respectivamente, o esquema da montagem do rotor e acoplamento dos ímãs de neodímio, com as dimensões principais.

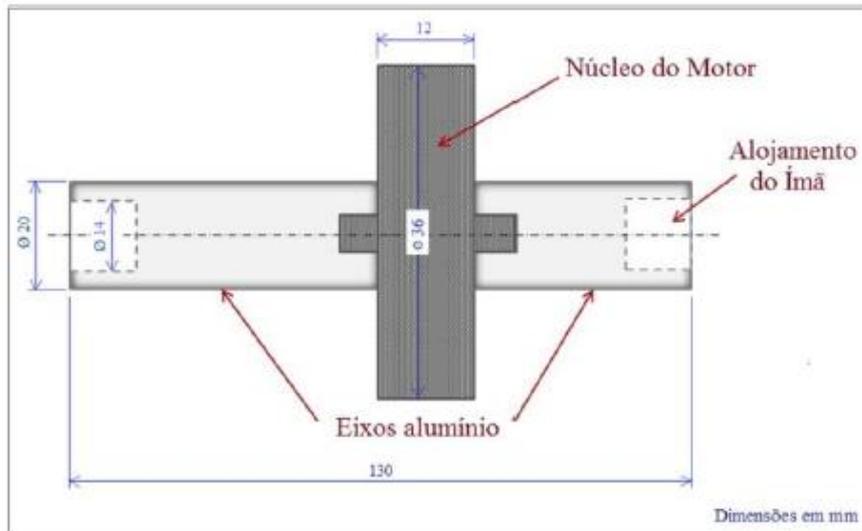


Figura 3.78: Configuração do rotor com o núcleo magnetizado do MIP

Fonte: Fernandes (2015)



Figura 3.79: Detalhes do rotor montado e acoplamento do ímã de neodímio na extremidade do eixo

Fonte: Adaptado de Fernandes (2015)

Neste trabalho optou-se pela construção de um eixo inteiriço e eliminação do “miolo” do rotor, com aproveitamento do anel externo ferromagnético e montagem com embuchamento por interferência no eixo, conforme etapas apresentadas a seguir:

- a) **Desmontagem do motor:** foi retirada a tampa da carcaça, a placa com cabeamento e o rotor, conforme ilustra a Figura 3.80:



Figura 3.80: Desmontagem do motor para retirada do rotor

Fonte: Autor

- b) **Confecção dispositivo para sacar rolamento:** foi necessário a construção de um dispositivo para possibilitar a retirada de um dos rolamentos do rotor, conforme mostra a Figura 3.81:



Figura 3.81: dispositivo para sacar rolamento

Fonte: Autor

- c) **Teste de passagem com multímetro:** foi efetuado um teste com o multímetro para verificar a passagem de corrente elétrica e possibilidade de usinagem do rotor pelo processo de EDM (Figura 3.82).

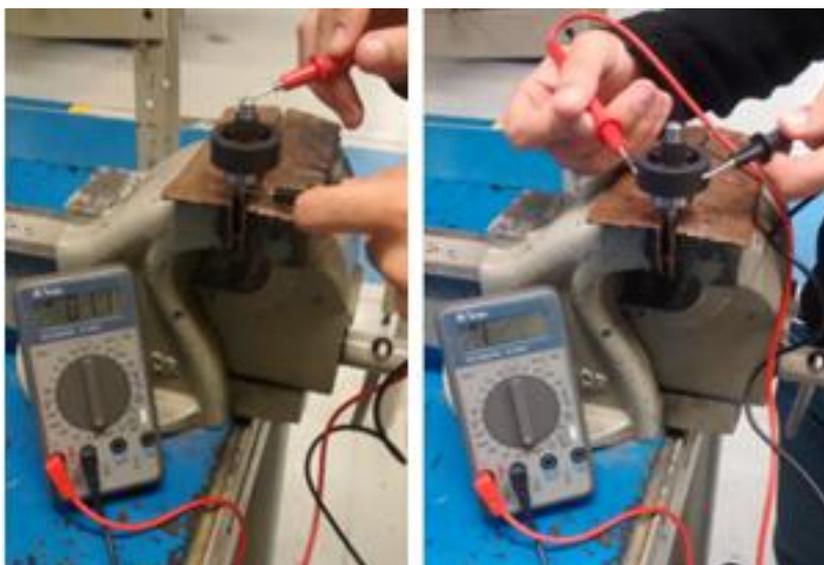


Figura 3.82: Teste de passagem de corrente elétrica com multímetro

Fonte: Autor

d) **Retirada do “miolo” do rotor:** como se verificou que o material ferromagnético do rotor é dielétrico (não conduz eletricidade) optou-se pela utilização de uma lima agulha diamantada para retirar com cuidado o “miolo” do rotor. As Figuras 3.83 e 3.84 ilustram o procedimento e o resultado final.

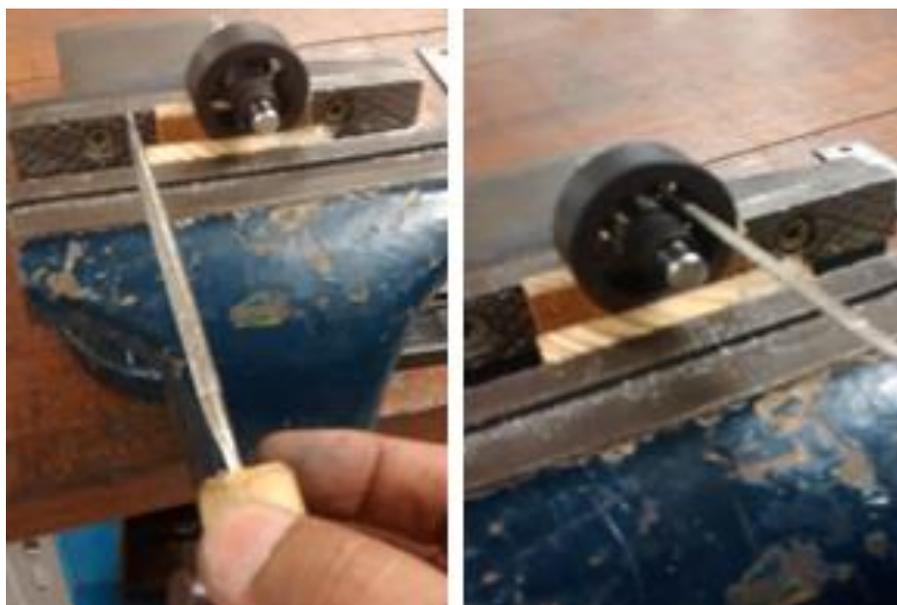


Figura 3.83: Utilização de uma lima agulha diamantada para retirar com cuidado o “miolo” do rotor

Fonte: Autor



Figura 3.84: Finalização da retirada do “miolo” do rotor

Fonte: Autor

- d) **Usinagem do anel ferromagnético do rotor:** após a retirada do eixo original do rotor foi confeccionada uma bucha de poliacetal (Figura 3.85). Isto possibilitou a usinagem do furo interno, protegendo e evitando trincas, garantindo a centralização e alinhamento do anel externo do rotor durante a usinagem do diâmetro interno do mesmo.

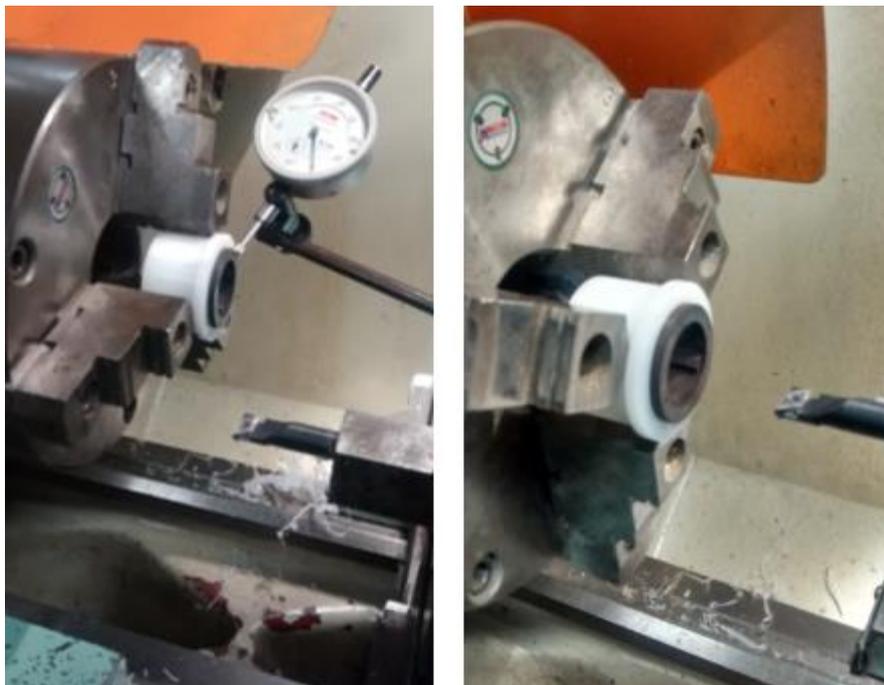


Figura 3.85: Bucha de Poliacetal para Possibilitar a Usinagem do furo Interno do Anel do Rotor

Fonte: Autor

f) **Montagem da bucha interna do rotor:** finalizada a usinagem do furo interno do anel ferromagnético do rotor foi montada no torno mecânico uma bucha menor de poliacetal (Figura 3.86), com furo interno pré-usinado para posterior ajuste com o eixo do PDCG.



Figura 3.86: Montagem da Bucha de Poliacetal Menor no Torno Mecânico

Fonte: Autor

g) **Usinagem interna da bucha do rotor:** após o embuchamento do anel ferromagnético do rotor foi efetuada a usinagem do furo interno da bucha, conforme medida do eixo, para possibilitar a montagem por interferência no eixo (Figura 3.87).



Figura 3.87: Usinagem da bucha do anel ferromagnético e teste com pó ferromagnético (nº de polos)

Fonte: Autor

h) **Montagem do rotor no eixo e nos mancais (Lenz):** como o diâmetro interno dos ímãs de neodímio dos mancais utilizados para o teste da levitação pela Lei de Lenz possui diâmetro menor do que o diâmetro externo do rotor houve a necessidade de primeiro fazer a montagem do mancal e depois a montagem por interferência do rotor no eixo. As Figuras 3.88 e 3.89

mostram a montagem do rotor no torno mecânico e eixo montado com os mancais de levitação pela Lei de Lenz.



Figura 3.88: : Montagem do rotor no eixo

Fonte: Autor



Figura 3.89: Montagem do eixo com rotor nos mancais de levitação (Lenz)

Fonte: Autor

### 3.9.5 Pivôs de apoio, dispositivos de centralização e montagem mecânica do PDCG-M

Em seu trabalho Fernandes (2015) aperfeiçoou o método de fixação do sistema de pivôs com o desenvolvimento de um gabarito centralizador, peça esta feita com chapa de alumínio e colada ao (extremidade do eixo), que posteriormente foi fresada efetuando-se um furo central para alojamento do pivô. Esse dispositivo permitiu a centralização automática da inserção e facilitação de eventual substituição dos pivôs alojamento circular. A Figura 3.90 apresenta o esboço do dispositivo proposto.

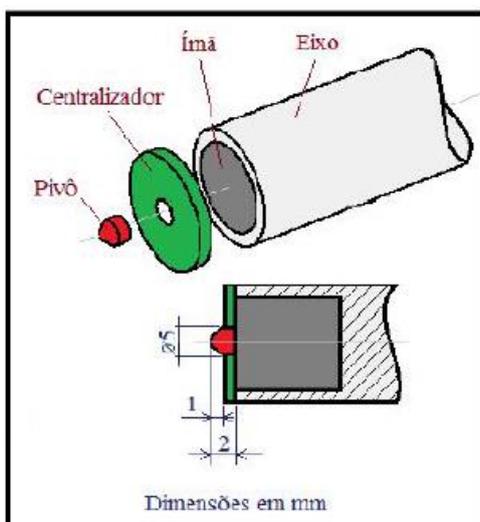


Figura 3.90: Esboço do dispositivo proposto

Fonte: Adaptado de Fernandes (2015)

Neste trabalho propôs-se a construção de um pivô de nylon inteiriço e fixado com interferência precisa no ímã do lado oposto ao eixo, no sistema de regulação do mancal magnético, com distância de interação “ $d_i$ ” controlável, conforme ilustra a Figura 3.91.

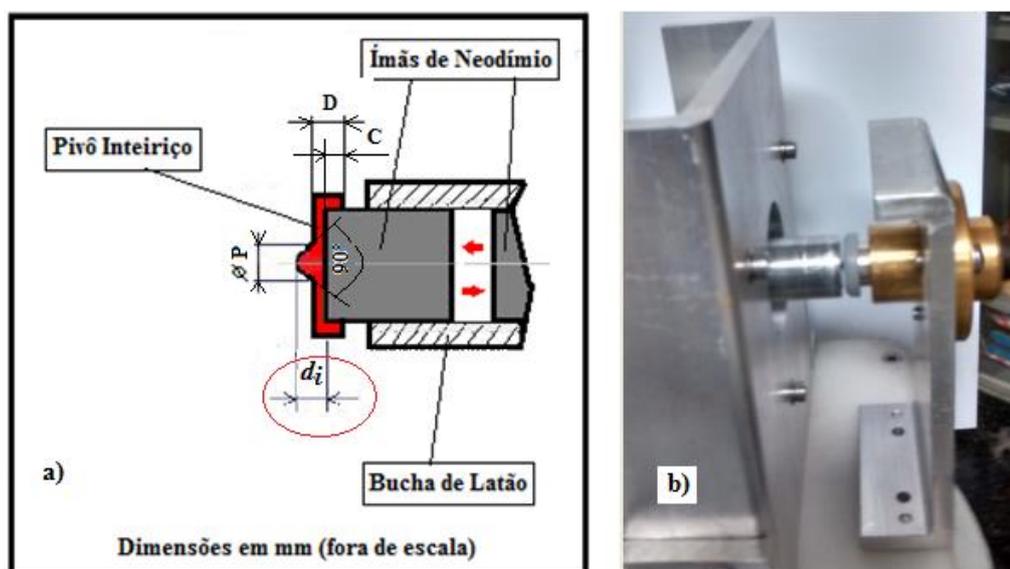


Figura 3.91: Esboço do pivô inteiriço proposto b) Imagem do conjunto de fixação do pivô

Fonte: Autor

A centralização da interface estator/rotor foi facilitada com dois dispositivos: uma bucha bipartida para centralização do eixo/rotor e um eixo escalonado para conferência da centralização do motor no suporte (Figuras 3.92 e 3.93).

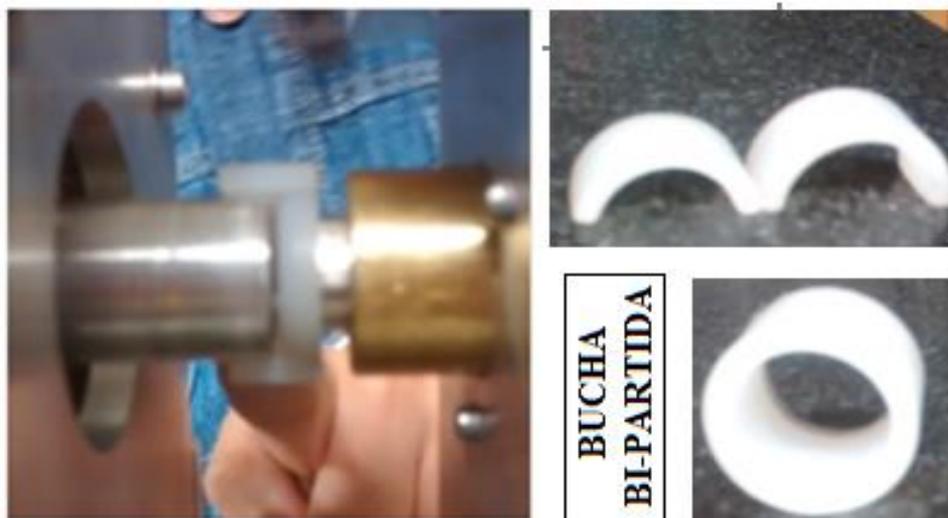


Figura 3.92: Bucha Bipartida para Centralização da Extremidade do Eixo do PDCG

Fonte: Autor

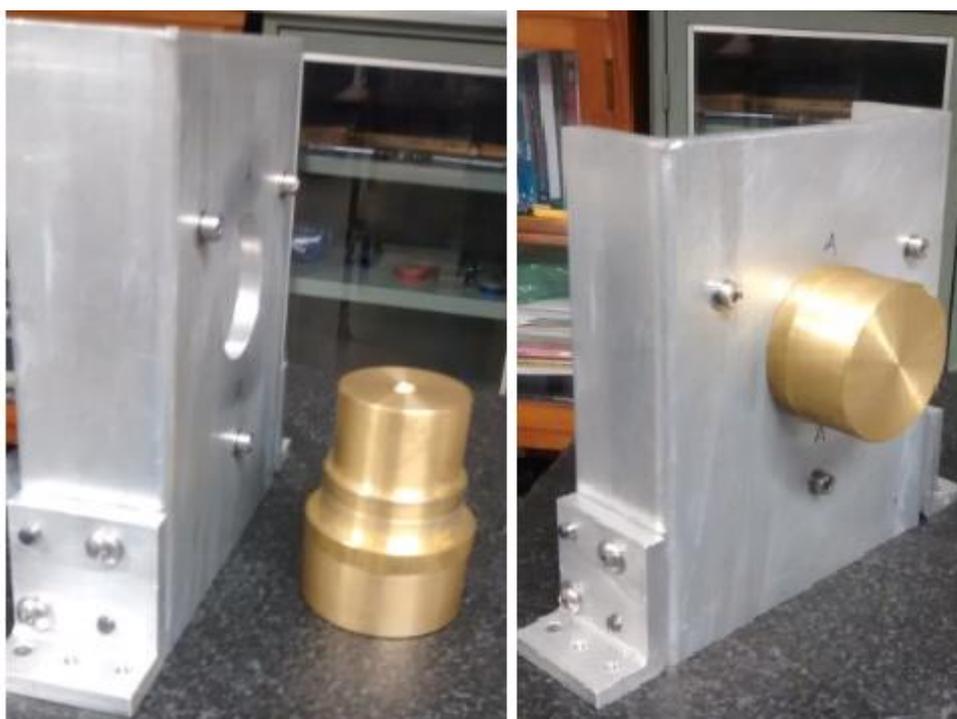


Figura 3.93: Eixo escalonado para aferição da centralização da interface estator/roto

Fonte: Autor

Além do eixo escalonado, como o motor possui outros furos menores a  $120^\circ$  e ao longo de um diâmetro menor, foi efetuado furações nos suportes do motor, com as mesmas coordenadas e colocado pinos guias antes da fixação do motor com parafusos no suporte, Figura 3.94.



Figura 3.94: Furos para pinos-guias e centralização da interface estator/roto  
Fonte: Autor

Após a finalização da usinagem de todas as peças que compõem a parte mecânica do PDCG-M foi efetuado a montagem prévia do mesmo, sem os pinos guias. A montagem final do mesmo será efetuada após a conclusão da ligação elétrica/ eletrônica do motor de acionamento do PDCG-M. As Figuras 3.95 e 3.96 mostram detalhes da montagem mecânica prévia.



Figura 3.95: Detalhe da vista superior do PDCG-M sem cabeamento elétrico  
Fonte: Autor

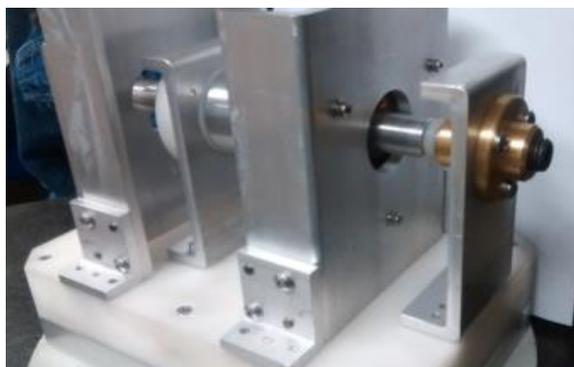


Figura 3.96: Detalhe do parafuso de regulagem dos ímãs das extremidades do PDCG-M  
Fonte: Autor

### 3.10 TESTES V - PROTÓTIPO DE DISPOSITIVO PARA CALIBRAÇÃO DE GRAVÍMETROS - MODULAR (PDCG-M) – VERSÃO FINAL

Os testes da versão final do PDCG-M, construtiva física e do circuito de acionamento do motor, foram efetuados variando-se a distância de interação ( $d_i$ ) entre o ímã do mancal magnético e o ímã da extremidade do eixo do protótipo, por meio de um pivô (ponteira) de nylon 6 e tensão de 26 V e nos últimos testes variando-se também a tensão elétrica aplicada ao motor de acionamento (40 ~60 V). A Figura 3.97 apresenta o esquema montagem do pivô e indicação da

( $d_i$ ).

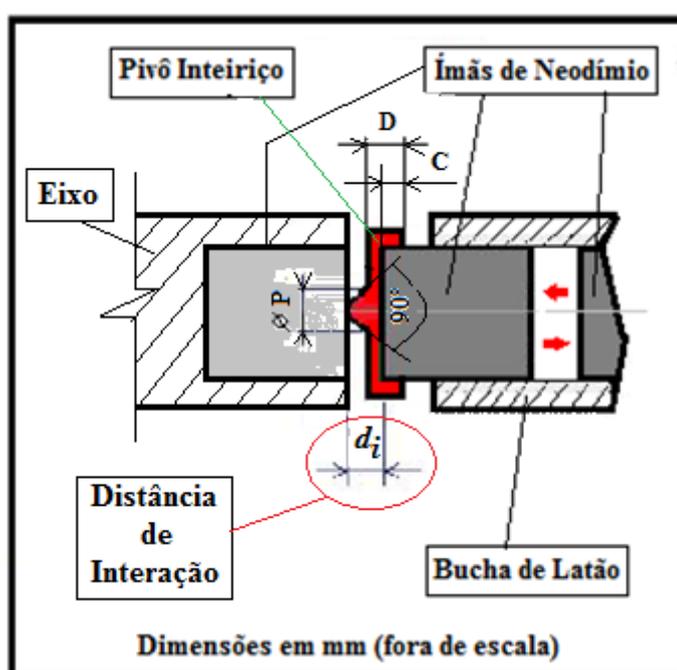


Figura 3.97: Esquema de montagem e indicação da distância de interação ( $d_i$ )

Fonte: Autor

Os testes com utilização dos pivôs com distância de interação de 2 e 4 mm, para verificação da velocidade de giro não foram possíveis, pois, o motor não girou e provocou a “queima” de componentes do circuito de acionamento (diodos) devido à sobre corrente.

Efetuamos a substituição dos componentes do circuito por outros com correntes de ruptura superiores e partimos para novos testes.

Foi no teste nº 3, com pivô com distância de interação  $d_i = 5\text{mm}$ , que conseguimos fazer com que o motor do PDCG-M girasse. A velocidade inicial medida com o tacômetro digital foi de 2554 RPM, porém ainda com a necessidade de impulso manual para que o eixo do protótipo saísse do estado de inércia.

Após este teste, em que o motor não alcançou a velocidade nominal (2800 RPM), decidimos desmontar os módulos dos mancais magnéticos e da levitação Lenz, efetuamos algumas verificações e percebemos que existiam alguns pontos de contato, fizemos os ajustes necessários no protótipo e reiniciamos novos testes.

À partir da  $d_i = 7$  mm (teste nº 4) e uso de pó de grafite conseguimos com que o motor girasse sem a necessidade de impulso para sair do estado de inércia e conseguimos atingir uma velocidade de 2890, superando pela primeira vez a velocidade nominal do motor.

Em continuidade, no teste nº 5, com pivô com distância de interação igual a 10 mm, e também usando pó de grafite, o motor atingiu a velocidade de 3750 RPM, até então nosso melhor resultado.

No decorrer do experimentos nº 6, quando utilizávamos o pivô de nylon6 e  $d_i = 15$  milímetros, o protótipo alcançou a velocidade de 3823 RPM, no entanto, os pivôs começaram a desgastar em função do atrito, tendo o maior desgaste ocorrido no pivô do mancal magnético identificado como dianteiro externo ( $D_E$ ) e menor no traseiro externo ( $T_E$ ), Figura 3.98.

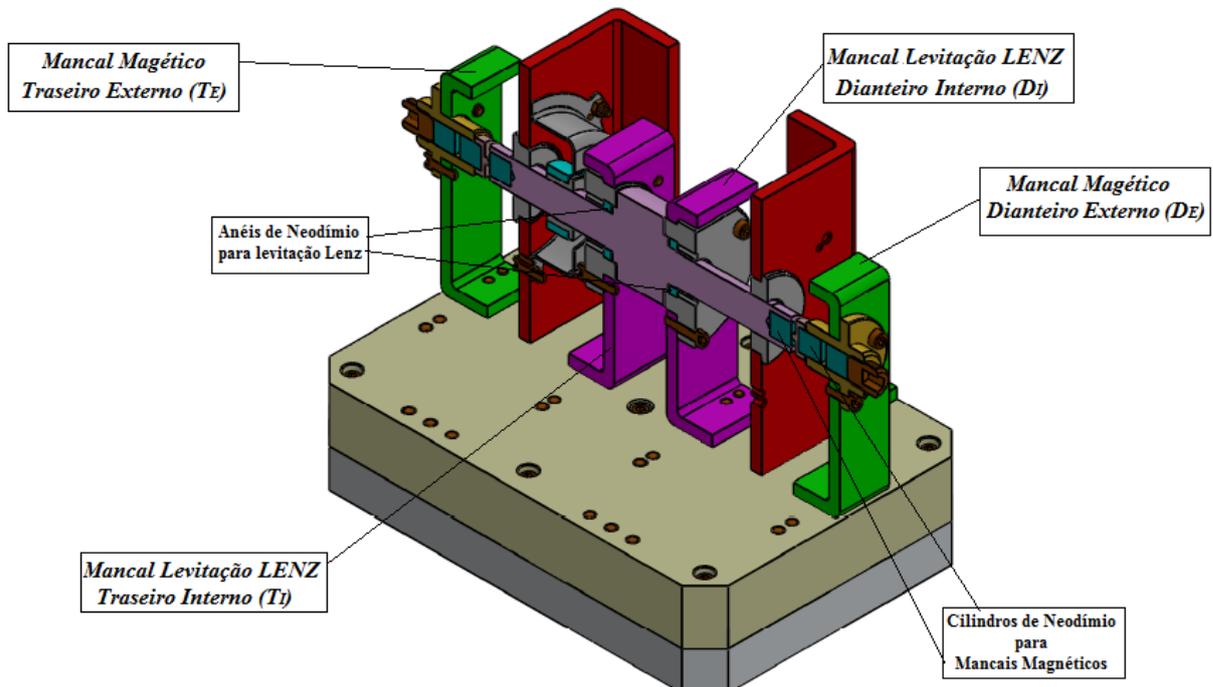


Figura 3.98: PDCG-M com identificações dos Mancais de Levitação LENZ e Magnéticos

Fonte: Autor

Exatamente quando foram utilizados os pivôs de nylon 6 e  $d_i=15$  milímetros (teste nº 6), os pivôs começaram a desgastar. Nesta situação foram iniciadas as medições da análise vibracional do conjunto.

Na primeira bateria de testes (nº 1 à nº 6) foram alteradas as distâncias de interação ( $d_i$ ), efetuado ajustes no protótipo, utilizado pó de grafite para diminuir o atrito, mantido a mesma aplicação de tensão no motor (26 V) e com estas iniciativas foi possível ter uma evolução e variação de velocidade entre 2554 e 3823 RPM.

No teste nº 6 percebemos que no momento em que os pivôs começaram a desgastar (Figura 3.99), a extremidade do eixo do motor (lado do rotor/ mancal magnético traseiro externo ( $T_E$ )), apresentou maior desgaste e maior instabilidade. Foi desmontado novamente os módulos dos mancais para averiguação e verificamos um descolamento da película metálica de proteção do imã. Prendemos o eixo no torno mecânico e ao lixarmos a face do imã, percebemos um desgaste no centro do imã, conforme podemos verificar na Figura 3.100.

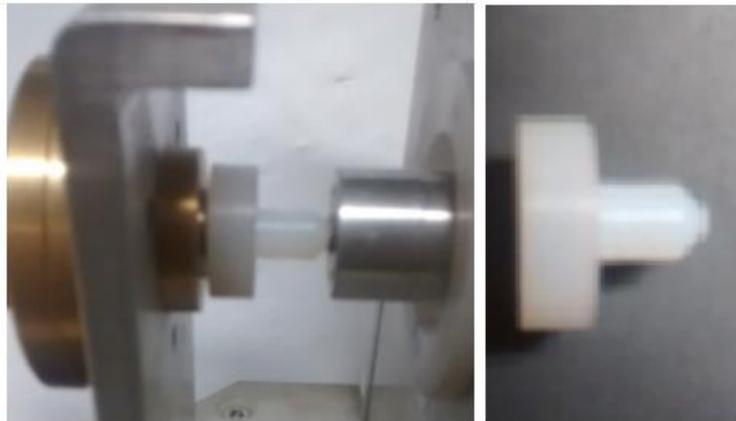


Figura 3.99: Desgaste pivô na extremidade mancal magnético traseiro externo ( $T_E$ )

Fonte: Autor



Figura 3.100: Falhas de sinterização e desgaste do imã de neodímio

Fonte: Autor

Em razão do desgaste, falhas no material do ímã e instabilidade da extremidade do eixo no lado do mancal magnético traseiro externo ( $T_E$ ), o mesmo foi retirado (uso de broca de metal duro e adesivo) e substituído (Figura 3.101).



Figura 3.101: Retirada do ímã de neodímio da extremidade ( $T_E$ )  
Fonte: Autor

Diante do ocorrido, uma tentativa do uso de um metal foi efetuada, e na ausência de um material com melhores propriedades, experimentamos um material por vezes usado em mancais de deslizamento, o Latão, o qual tem uma menor resistência a abrasão comparado com o nylon 6, no entanto suporta uma maior temperatura quando solicitado na condição de atrito (ASHBY, M., 201; CALLISTER e RETHWISH, 2015).

A Tabela 3.6 apresenta a análise química do latão, analisado no equipamento de fluorescência por raios-X (Broker® - S2 Ranger), utilizado para construção do pivô e testes do PDCG-M.

Tabela 3.6: Análise química do latão utilizado na construção de pivô para teste no PDCG\_M

ANÁLISE QUÍMICA LATÃO (PIVÔS/PONTEIRAS)	
Elemento Químico	Concentração (%) em peso
Cobre (Cu)	62,7
Zinco (Zn)	34,4
Chumbo (Pb)	1,83
Alumínio (Al)	0,16
Cálcio (Ca)	0,15
Ferro (Fe)	0,13
Silício (Si)	0,12
Estanho (Sn)	0,10

O mesmo igualmente desgastou quando atingiu a velocidade de 3.500 RPM com pó de grafite e 4.530 RPM com o uso de graxa de lítio e pó de grafite (testes nº 7 e nº 8). A Figura 3.102 apresenta a imagens do mancal magnético com pivô de latão. Acrescente-se que à partir do teste nº 5 foi necessário o uso de um anel espaçador de latão para permitir o espaço necessário para alojar os pivôs de 10 e 15 mm

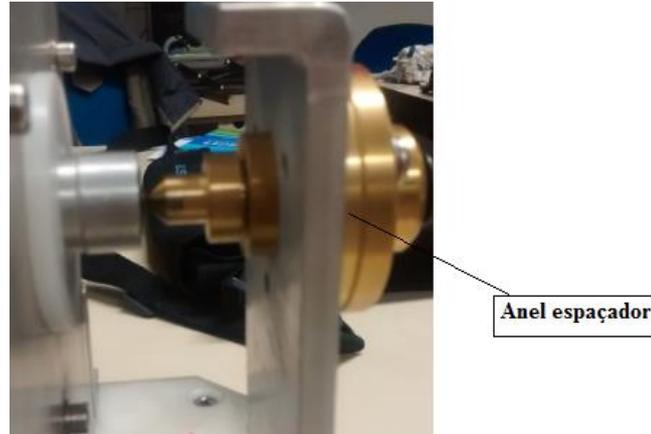


Figura 3.102: Pivô de Latão e Anel Espaçador

Fonte: Autor

Novos do pivôs de nylon 6 foram efetuados e outros quatro testes foram realizados (do nº 9 ao nº 12), desta feita também variando a tensão e igualmente utilizando a graxa de lítio e grafite. As velocidades alcançadas foram respectivamente 5.900, 6.503, 7.149 e 8.112 RPM, medidas com o tacômetro foto/contato digital da Minipa® MDT-2238A. As Figuras 3.103 e 3.104 mostram alguns registros efetuados.



Figura 3.103: Velocidade de 6503 rpm e tensão de 46,8

Fonte: Autor



Figura 3.104: Velocidade de 7149 rpm e tensão de 50,9 V

Fonte: Autor

A Figura 3.105 apresenta o resultado do teste nº 12, onde o motor do PDCG-M atingiu a velocidade de 8.112 RPM, aplicando-se uma tensão elétrica de 60 V.



Figura 3.105: Teste Final - Velocidade de 8112 RPM e Tensão de 60 V

Fonte: Autor

3.10.1 Testes V do PDCG-M – Análise vibracional do experimento nº 6

A Análise Vibracional do teste nº 6 do PDCG-M realizada nos mancais de levitação por Lenz, dianteiro e traseiro internos ( $D_I$  e  $T_I$  – Fig. 3.106), Anexo (A\_1), apresentou desbalanceamento incipiente, ou seja, no começo, sendo recomendado como ação corretiva a revisão da montagem dos mancais nos pontos com anomalias.

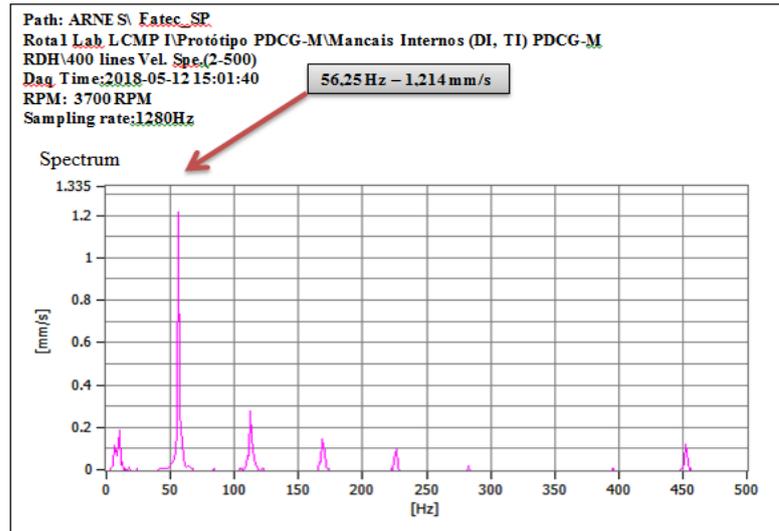


Figura 3.106: Espectro da Análise Vibracional - Teste nº 6 PDCG-M – Levitação LENZ (Desgaste Pivôs)  
 Fonte: Autor e Arnes Preditiva & Treinamento

A Tabela 3.7 apresenta as medidas de frequência, e os valores de velocidade e aceleração da análise vibracional -do teste nº 6 do PDCG-M nos mancais de levitação Lenz, em que os pivôs apresentaram desgaste.

Tabela 3.7: Medidas de frequência, e os valores velocidade e aceleração do mancal de levitação Lenz

<b>Análise Vibracional - Teste nº 6 PDCG-M/ Levitação Lenz (Desgaste Pivôs)</b>		
<b>Ponto</b>	<b>Hz.</b>	<b>Valores de velocidade [mm/s]</b>
$D_IH$	56,25	1,214
$T_IH$		0,705
$D_IA$	55	0,396
$T_IA$		0,274
<b>Ponto</b>	<b>Hz.</b>	<b>Valores de Aceleração - TRF [m/s<sup>2</sup>]</b>
$D_IH$	465	0,150 [m/s <sup>2</sup> ]

Posições de Medições: A (Axial); H (Horizontal)

Fonte: Autor e Arnes Preditiva & Treinamento

A Análise Vibracional do teste nº 6 do PDCG-M efetuada nos mancais magnéticos dianteiro e traseiro externos ( $D_E$  e  $T_E$ ), Figura 3.107, realizada em conjunto com a empresa Arnes Preditiva & Treinamento (Anexo A\_2), apresentou desalinhamento e desbalanceamento, ambos incipientes, sendo recomendado como ação corretiva e a revisão da montagem dos mancais nos pontos com anomalias. Acrescente-se que o mancal externo traseiro é o que apresenta desgaste, ou seja, maior degradação.

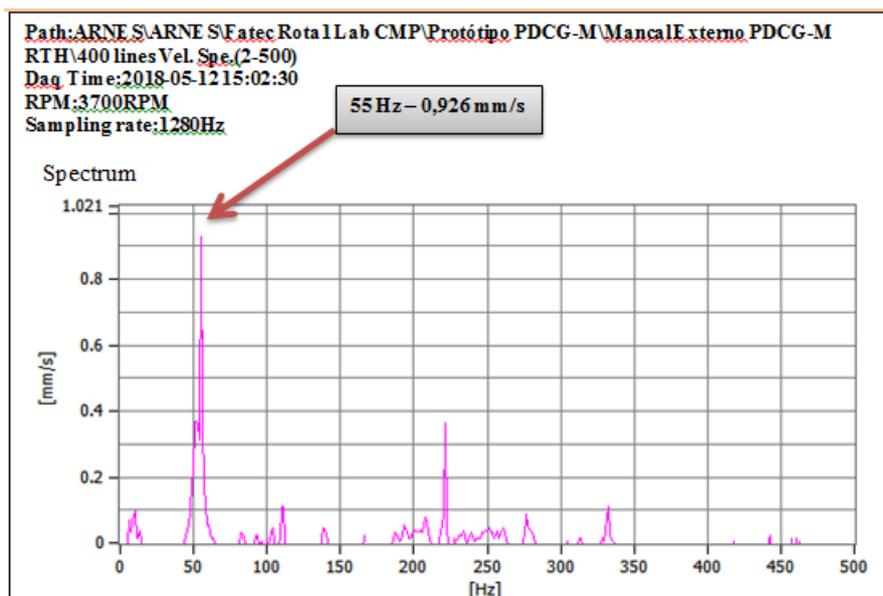


Figura 3.107: Espectro da Análise Vibracional - Teste nº 6 PDCG-M – Mancais Magnéticos (Desgaste Pivôs)  
Fonte: Autor e Arnes Preditiva & Treinamento

A Tabela 3.8 apresenta as medidas de frequência, e os valores de velocidade e aceleração da análise vibracional -do teste nº 6 do PDCG-M nos mancais de magnéticos, em que os pivôs apresentaram desgaste Pivôs.

Tabela 3.8: Medidas de frequência, e os valores velocidade e aceleração do mancais magnéticos

Análise Vibracional - Teste nº 6 PDCG-M/ Mancais Magnéticos (Desgaste Pivôs)		
Ponto	Hz.	Valores de velocidade [mm/s]
$D_{EH}$	55,0	0,929
$T_{EV}$		0,518
$D_{EH}$	56,25	0,699
$T_{EA}$		0,766
$T_{EA}$	11,25	0,865
	278,25	0,493
	<b>Hz.</b>	<b>Valores de Aceleração - TRF [m/s<sup>2</sup>]</b>
	282,50	0,122 m/s <sup>2</sup>

Posições de Medições: A (Axial); H (Horizontal); V (Vertical)

Fonte: Autor e Arnes Preditiva & Treinamento

### 3.10.2 Testes V do PDCG-M – Análise vibracional do experimento nº 9

Foram efetuados os reparos e ajustes nos pontos com anomalias apontados no item 3.10.1 e a Análise Vibracional do experimento nº 9 do PDCG-M realizada nos mancais de levitação por Lenz, dianteiro e traseiro internos ( $D_I$  e  $T_I$  – Fig. 3.108), em conjunto com a empresa Arnes Preditiva & Treinamento (Anexo A\_3), apresentou desbalanceamento admissível e incipiente.

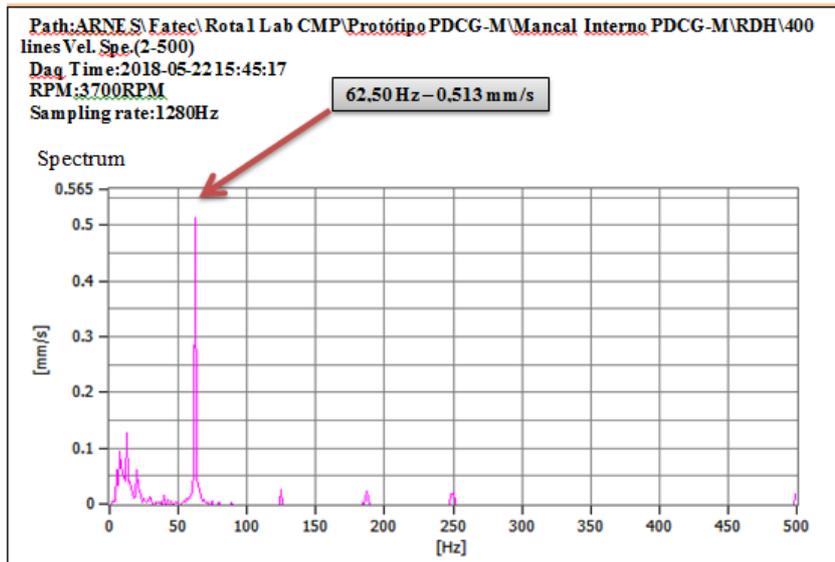


Figura 3.108: Espectro da Análise Vibracional - Teste nº 9 PDCG-M – Levitação LENZ (Rot. menor de 3700 rpm)  
Fonte: Autor e Arnes Preditiva & Treinamento

A tabela 3.7 apresenta as medidas de frequência, e os valores de velocidade da análise vibracional do teste nº 9 do PDCG-M (com rotação menor de **3700 RPM**) nos mancais de levitação Lenz, após ajustes e troca dos pivôs com desgaste.

Tabela 3.9: Medidas de frequência, e os valores velocidade do mancal de levitação Lenz

Análise Vibracional - Teste nº 9 do PDCG-M/ Levitação Lenz (Rot. Menor RPM=3700)		
Ponto	Hz.	Valor mm/s
$D_IH$	62,50	0,513
$T_IH$		0,440
	7,50	0,214
$T_I A$	61,25	0,345
$T_I V$		0,308
$T_I A$		0,222
$D_I V$		0,205
Posições das Medições: A (Axial); H (Horizontal); V (Vertical)		

Fonte: Autor e Arnes Preditiva & Treinamento

Foram efetuados os reparos e ajustes nos pontos com anomalias apontados no item 3.10.1 e a Análise Vibracional do experimento nº 9 do PDCG-M realizada nos mancais magnéticos externos, dianteiro e traseiro internos ( $D_E$  e  $T_E$  – Fig. 3.109), em conjunto com a empresa Arnes Preditiva & Treinamento (Anexo A\_3), apresentou desbalanceamento admissível e incipiente.

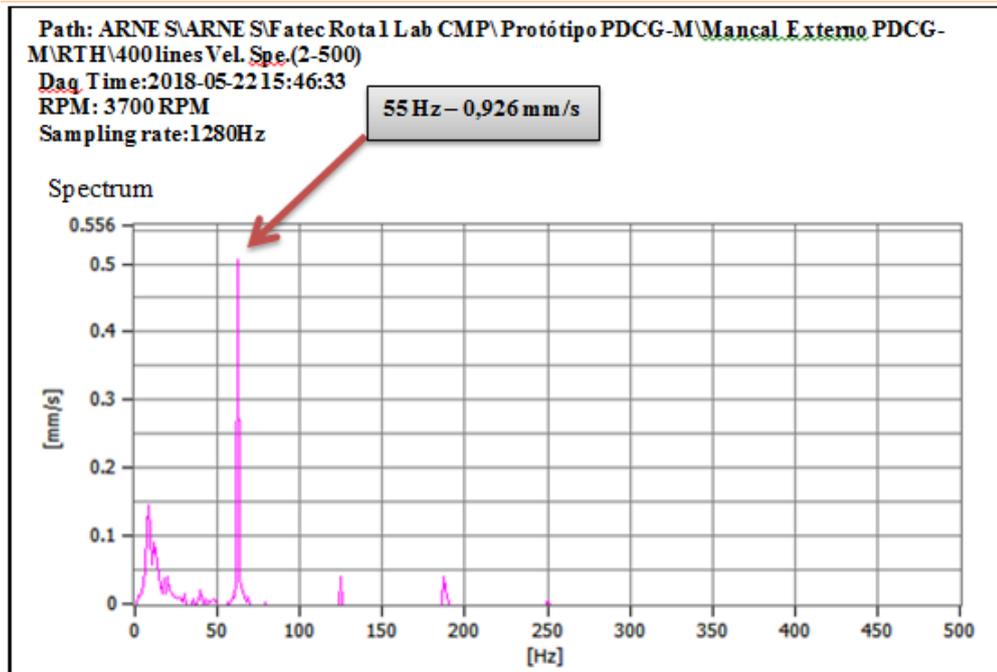


Fig. 3.109: Espectro da Análise Vibracional - Teste nº 9 PDCG-M – Mancais Magnéticos (Rot. Menor 3700 rpm)

Fonte: Autor e Arnes Preditiva & Treinamento

A Tabela 3.10 apresenta as medidas de frequência, e os valores de velocidade da análise vibracional do teste nº 9 do PDCG-M (rotação menor 3.700 RPM) nos mancais magnéticos, após ajustes e troca dos pivôs com desgaste.

Tabela 3.10: Medidas de frequência e valores de velocidade dos mancais magnéticos

<b>Análise Vibracional - Teste nº 9 do PDCG-M/ Mancais Magnéticos (RPM=3700)</b>		
<b>Ponto</b>	<b>Hz.</b>	<b>Valor mm/s</b>
<b><math>T_EH</math></b>	<b>62,50</b>	<b>0,506</b>
<b><math>D_EH</math></b>		<b>0,323</b>
<b><math>T_EV</math></b>		<b>0,287</b>
<b><math>D_EA</math></b>		<b>0,220</b>
<b><math>T_EA</math></b>	<b>61,25</b>	<b>0,450</b>
<b><math>D_EV</math></b>	<b>63,75</b>	<b>0,378</b>
<b><math>T_EA</math></b>	<b>7,50</b>	<b>0,380</b>
<b><math>D_EV</math></b>		<b>0,121</b>

Posições das Medições: A (Axial); H (Horizontal); V (Vertical)

Fonte: Autor e Arnes Preditiva & Treinamento

### 3.10.3 Testes V do PDCG-M – Análises termográficas

As Análises termográfica nos teste finais do PDCG-M foram realizadas com intuito de verificar a eficácia dos mancais de levitação por Lenz, dianteiro e traseiro internos ( $D_I$  e  $T_I$ ) e pontos de aquecimento em razão do atrito entre os pivôs de apoio e as faces dos ímãs de neodímio. As termografias foram realizadas, também, em conjunto com a empresa Arnes Preditiva & Treinamento (Anexos B\_1 à B\_8). Usamos como base as Normas da ABNT (NBR 15424, 2006; NBR 5410, 2008; NBR 15718, 2009; NBR 15866, 2010; e NBR 15572, 2013) e recomendações da IEC (*International Electrical Commission*).

A termografia é uma técnica de inspeção (não destrutiva e não invasiva) que se baseia na detecção da radiação infravermelha emitida pelos corpos com intensidade proporcional a sua temperatura.

As câmeras termográficas fornecem imagens reais (fotografias digitais), térmicas (termogramas) e gráficos. Estes dados são suficientes para uma análise de tendências, geralmente muito utilizadas na manutenção preditiva.

Dados técnicos do termovisor utilizado nas inspeções do PDCG-M e certificado de calibração é apresentado no quadro abaixo, Figura 3.110.

	<p><b>Faixas de medição:</b> -20°C -&gt; 350°C</p> <p><b>Resolução Térmica:</b> 0,20°C a 25°C</p> <p><b>Detector de Matriz de Plano Focal:</b> 120x120 pixels</p> <p><b>Faixa espectral:</b> 7,5 a 13 microns</p> <p><b>Frequência de imagens:</b> 9 Hz</p> <p><b>Memória de imagens:</b> 50 imagens</p> <p><b>Peso:</b> 0,56 kg</p> <p><b>Isolamento:</b> IP54, EC359</p> <p><b>Choque:</b> 25G, IEC 66-2-29</p> <p><b>Vibração:</b> 2G, IEC 66-2-6</p>
<p><b>Certificado de Calibração:</b>  <b>Modelo Aparelho FLIR E6 - Série nº 63901812</b>  <b>Site: FLIR Systems OU, Estonia - 12/2013</b></p>	

Figura 3.110: Dados Técnicos do Termovisor e certificado de calibração  
 Fonte: Arnes Preditiva e Treinamento (2018) – Apêndice

a) Testes V do PDCG-M – Análises Termográficas

Nos quadros abaixo (Figuras 3.111, 3.112 e 3.113) apresentam as análises termográficas do PDCG-M, do circuito de acionamento e registro de velocidade do tacômetro onde podemos verificar o termograma, a imagem real e os dados das medições.

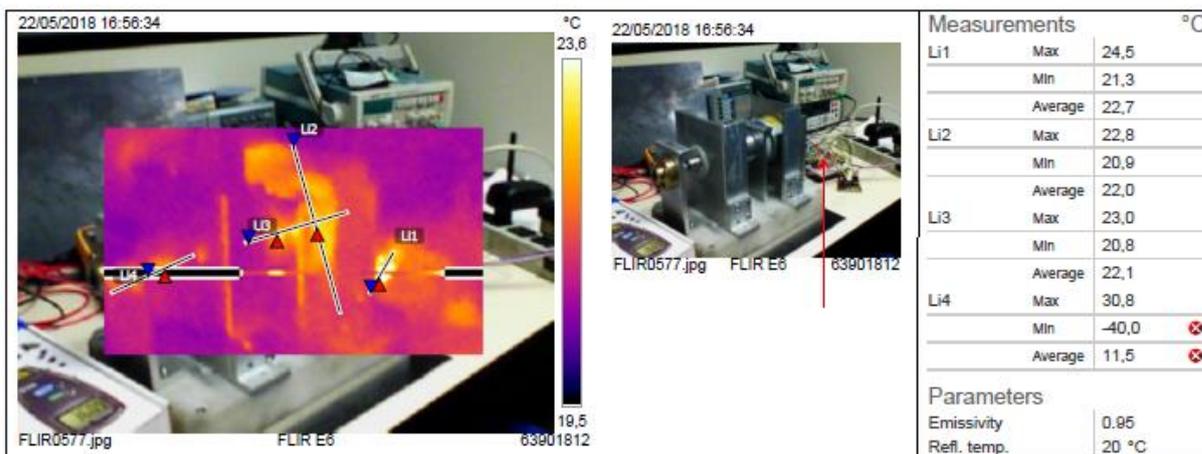


Figura 3.111: Termograma, imagem real e dados da medição termográfica (nº 3)

Fonte: Autor e Arnes Preditiva & Treinamentos

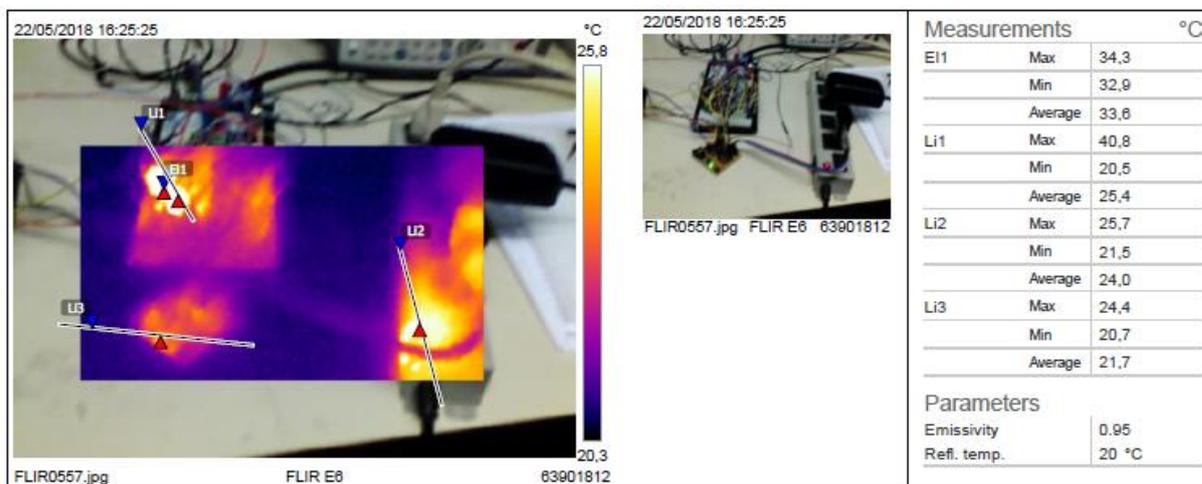


Figura 3.112: Termograma, imagem real e medição termográfica do circuito de acionamento do PDCG-M

Fonte: Autor e Arnes Preditiva & Treinamentos

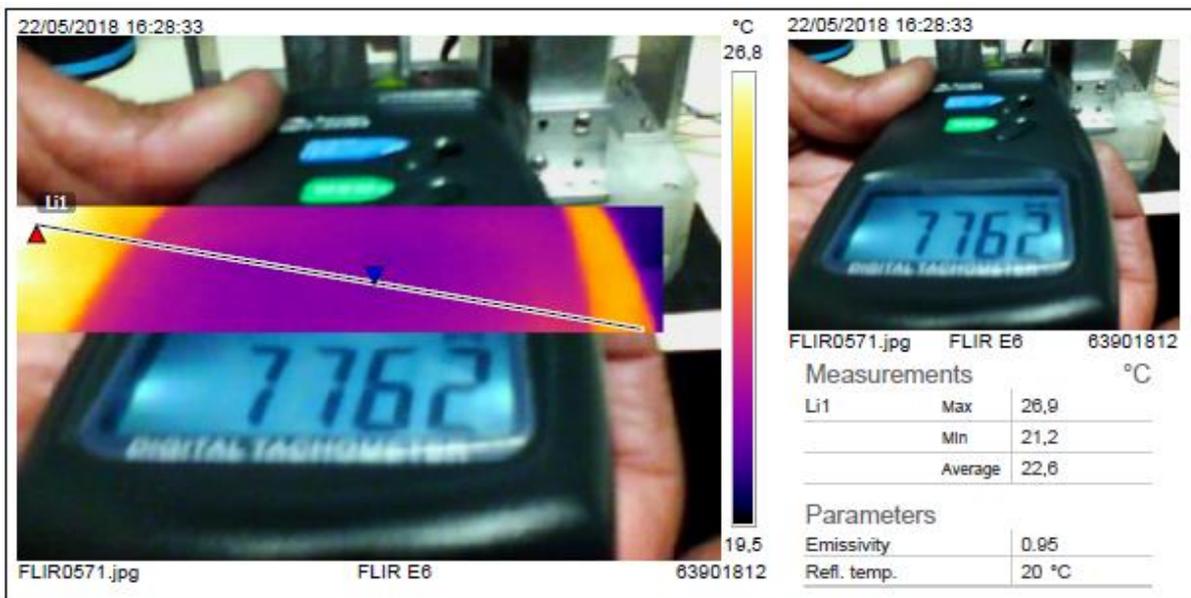


Figura 3.113: Imagem termográfica e real do tacômetro na análise nº 3 – 7762 rpm

Fonte: Autor e Arnes Preditiva & Treinamentos

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As análises vibracionais e de balanceamento utilizando analisador da Vaibro® (mod. VaibroSmartCH1®/ Acelerômetro ICP 106 mV/unit) e apoio do software ROZH MRS 3000®, equipamento devidamente preparado para receber e processar as informações dos valores coletados de vibrações foram realizadas conforme normas ISO 2372, VDI-2056 e ISO 1940.

Os pré-testes (I) com o Dispositivo de Simulação Campo (DSC), visando a construção do Protótipo de Dispositivo para Calibração de Gravímetros-Modular (PDCG-M), demonstraram no DSC grande excitação dos esforços dinâmicos, nível de vibração e desbalanceamento, em razão de problemas construtivos. A verificação com relógio apalpador acusou que a flange de fixação da roda do mesmo apresentou uma excentricidade de  $(0,750 \pm 0,001)$  mm, inviabilizando o “equilíbrio” do conjunto.

Os testes (I) efetuados no torno mecânico (Figura 3.13), conforme arranjo e procedimento experimental (Figuras 3.16 e 3.17), e medições dos valores globais de velocidade em [mm/s] (Tabela 3.1) e espectro do valor de referência e medidas de aceleração (Transformada Rápida de Fourier - TRF) e ângulos dos vetores força da massa desbalanceada (para os testes de balanceamento), indicaram resultados compatíveis com o níveis de criticidade exigidos por normas (Tabela 2.6 e 2.7), ficando classificado como Crítico [C] em função de imperfeições na roda utilizada e folgas nos rolamentos do eixo árvore do torno mecânico.

Os pré-testes com o DSC e torno mecânico demonstraram a necessidade de critérios de precisão na usinagem do protótipo. A reconstrução e melhorias no DSC confirmaram esta hipótese, ou seja, construir um DSC balanceado e então provocar o desbalanceamento do mesmo e usar a técnica de análise vibracional e balanceamento para tentar devolver a condição original do DSC.

A Tabela 4.1 demonstra os pré-testes com a roda e auxílio do Torno Mecânico que a técnica de análise vibracional e balanceamento pode auxiliar o projeto. As medições foram efetuadas com base no manual de instruções do fabricante. e dados obtidos à partir do software ROZH MRS 3000®.

Tabela 4.1: Resultados iniciais obtidos nos pré-testes I (torno mecânico).

Pré-Testes I ( Com Auxílio do Torno Mecânico)	Rotação [RPM]	Velocidade [mm/s]	Massa [g] (solicitada)	Ângulo de fase [°]	Massa [g] (experimento)
Inicial sem roda	2590,4	16,39		83,3	
Inicial com roda	2590,8	15,38		79,5	
Roda com pré-carga	2590,8		+ 10,0	0,0	+ 9,554
Medição N° 1	2590,8	20,46		77,6	
			- 10,0	0,0	- 9,554
			+ 40,01	185,7	+ 40,504
Medição N° 2	2590,8	19,60		246,2	
			+ 38,33		+ 38,514
Resultado Final	2590,8	10,06		74,1	

As medições dos valores globais de velocidade em [mm/s], espectro do valor de referência, medidas de aceleração (TRF) e ângulos dos vetores força, nos testes com o DSC melhorado (teste III) e massores de chumbo adesivado, indicaram resultados compatíveis com o níveis de criticidade exigidos, conforme normas, e são apresentados na Tabela 4.2, ficando classificado como Permissível [P].

Tabela 4.2: Resultados e medições do Teste III após melhorias no Dispositivo de Simulação de Campo (DSC)

Testes III e Medições	Rotação [RPM]	Velocidade [mm/s]	Massa [g] (solicitada)	Ângulo de fase [°]	Massa [g] (experimento)
Medida Inicial	1796, 8	0,427			
Desbalanceamento (PROVOCADO)	1797,5	2, 990		Aleatório	14,90 (Adic.)
Adição de pré-carga			+ 10,00	0,0	+ 9,953
Medição N° 1  Com pré- carga (sugestão de carga e ângulo fase)	1797,5		+ 10,00	0,0	+ 9,953
				Aleatório	14,90 (Adic.)
		5,450		190,5	
Medição N° 2  Com retirada de pré- carga e cargas adicionadas (sugestão de carga e ângulo fase)	1797,1		21,51	190,2	19,960
			- 10,00	0,0	- 9,953
				Aleatório	14,90 (Adic.)
Verificação do balanceamento (adição de carga se necessário)	1797,1	2,230		388,0	
			8,80	358,0	7,641
				Aleatório	14,90 (Adic.)
Resultado Final	1797,1	1,940		196,3	
			7,66	196,0	7,368
Resultado Final	1797,1	1,049	Permissível - 0,710 a 1,800 [mm/s] – (Tab. 2.20)		

A reconstrução e melhorias no DSC e confirmação da hipótese no decorrer dos experimentos, ou seja, construção de um DSC balanceado, provocação do desbalanceamento do mesmo e uso da técnica preditiva de análise vibracional e balanceamento, para devolver a condição original de balanceamento ao DSC, gerou um dispositivo didático para ensino desta técnica preditiva no LCMP I (FATEC:SP) e projeto de construção de um dispositivo menor (portátil) para ser usado na efetuação de cursos externos pela Arnes Preditiva & Treinamento.

Os testes com o motor de passo modificado (IV), ocorreram em razão da dificuldade na obtenção de um motor semelhante ao usado no projeto de Fernandes (2015), no entanto, não foram satisfatórios, pois o motor girou muito lentamente, e aumentando levemente o entreferro entre o rotor e o estator, o motor parou de girar.

À partir dos testes I, II, III e IV foi traçado um norte para construção do PDCG-M, estudo de materiais de engenharia, metodologia e processo construtivo, escolha de técnicas preditivas de análise vibracional e balanceamento, e termografia e opção pelo uso de um motor Brushless modificado e mancais magnéticos, agregando ainda ao protótipo a teoria de Linares (2016), ou seja, o uso da levitação por Lenz (HALLIDAY e RESNICK, 2013; TELLES e NETTO, 2015).

O sucesso foi obtido na hipótese de modificação do motor sem escovas (*Bushless*), retirando o “miolo” do rotor, conservando o anel ferromagnético externo e montando o mesmo num eixo de alumínio com auxílio de uma bucha de poliacetal para evitar a quebra (Figura 4.76).

O grande desafio do projeto foi o desenvolvimento do circuito eletrônico, ajustes e programação para possibilitar o acionamento do motor escolhido para o PDCG-M. Igualmente, e não menos desafiador, foi o encontro ideal da distância de interação ( $d_i$ ) entre os ímãs de neodímio de atração das extremidades dos mancais magnéticos, ajustes efetuados no PDCG-M e no entreferro rotor/estator.

Com o PDCG-M no ponto de ajuste ideal foi possível atingir velocidade final superior a velocidade nominal do motor sem escovas (antes da modificação). Após os testes de velocidade (Teste V – Tabela 4.3) partimos para as técnicas preditivas de análises vibracionais e termográficas, realizadas nos mancais de levitação por Lenz ( $D_I$  e  $T_I$ ) e mancais magnéticos ( $D_E$  e  $T_E$ ) do PDCG-M. Para cada ponto em análise, tomamos como base, as primeiras coletas e curvas de tendência individual do equipamento, indicando as condições de satisfação dos pontos coletados, conforme as padronizações internacionais para severidade

vibratória (Tabelas 2.6 e 2.7), citadas anteriormente, e classificação de intervenções (Anexo B\_2), bem como, as indicações das ações corretivas indicadas nos relatórios.

As observações, no relatório gerencial ROZH MR3000, das indicações do limite de alarme correspondente às grandezas de vibração em mm/s (valores em rms) comparados com os limites correspondentes de status (St) da condição do ponto avaliado, sendo classificadas como: [S] Sem medição; [N] Normal; [P] Permissível; [A] Alerta e [C] Crítico.

A condição geral, dos pontos que foram analisados, são apresentados no gráfico da Figura 4.1 e mesmo na condição mais crítica, onde houve o desgaste do pivô (DE), o nível de criticidade foi a condição alerta [A – cor amarela] e dentro de níveis permitidos, onde o maior desgaste ocorreu no pivô do mancal magnético ( $D_E$ ) e menor no mancal ( $T_E$ ), tanto para o nylon 6 como para o latão. Apontados nos espectros das Figuras 3.106 e 3.107 e valores das Tabelas 3.7 e 3.8, e gráfico abaixo.

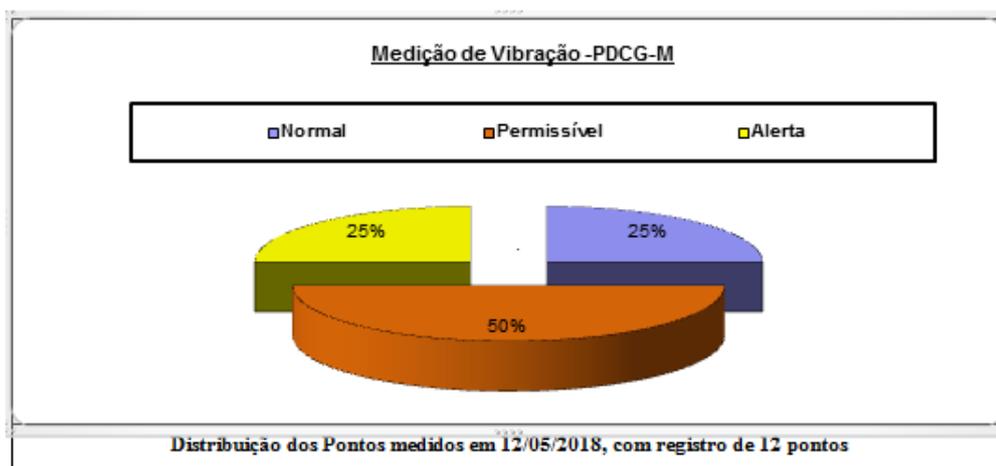


Figura 4.1: Gráfico da medição de vibração do PDCG-M

Fonte: Autor e Arnes Preditiva & Treinamento

Relativo ao desgaste dos pivôs, na Figura 4.2, Ashby (2011) apresenta diagrama do coeficiente de fricção quando duas superfícies são colocadas em contato, numa carga normal ( $F_n$ ) e uma é feita para deslizar sobre o outro, uma a força ( $F_s$ ) se opõe ao movimento. Esta força é proporcional para ( $F_n$ ), mas não depende da área da superfície, mas do estudo do resultado do atrito, ao tocar em pequenos pontos.

Materiais como Politetrafluoretileno (PTFE/ Teflon®) e bronze grafitado, deslizando em aço polido, apresentam baixo coeficiente de fricção, embora sejam altos, comparados com o atrito para superfícies lubrificadas (ASHBY, 2011).

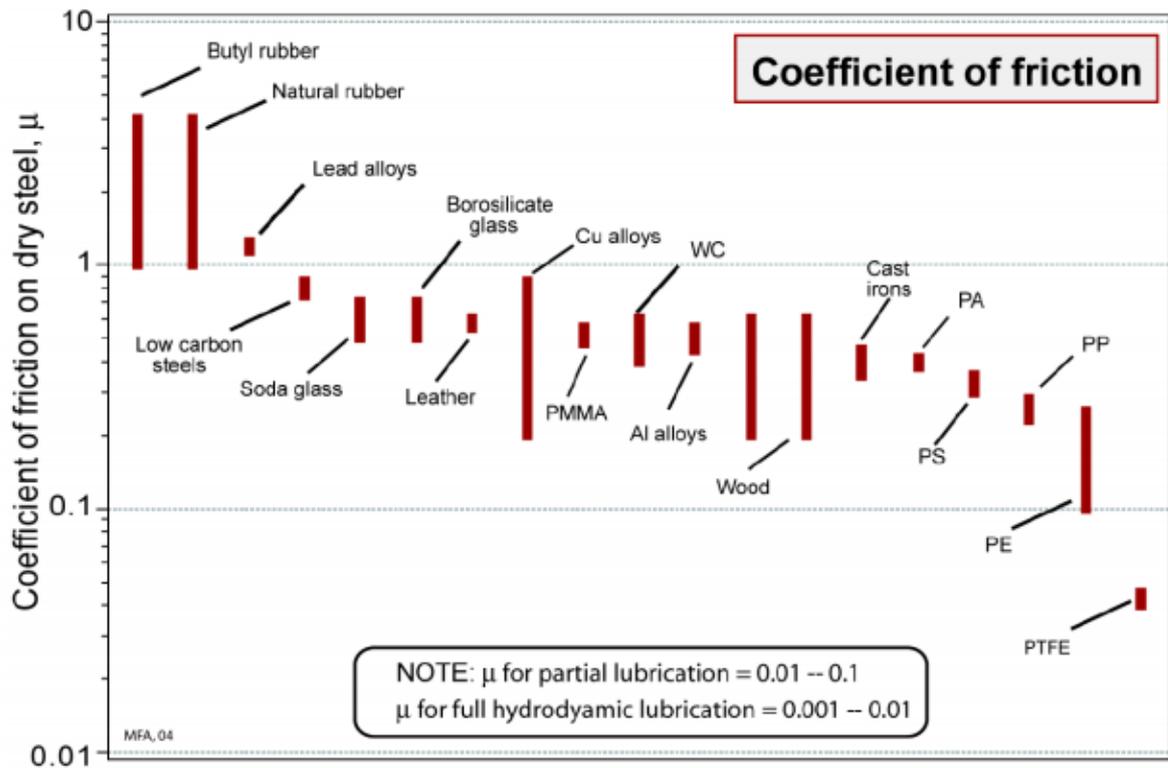


Figura 4.2: Diagrama do coeficiente de fricção de materiais em aço a seco  
 Fonte: Ashby (2011)

O diagrama da Figura 4.3, que segundo o fabricante do UHMW®, foi realizado em condições próprias e não normalizada, utilizando corpos de provas de mesmas dimensões em iguais condições de ensaio (lama, temperatura e tempo de exposição), mostra a resistência a abrasão de alguns plásticos de engenharia e materiais comumente utilizados em equipamentos que sofrem muito desgaste quando estão em operação. O UHMW® (*Ultra High Molecular Weight*), é um polietileno de alto peso molecular.

O material utilizado nos pivôs para os testes no PDCG-M, Nylon 6, aparece como 3º melhor material com baixo desgaste por abrasão comparados com outros plásticos e alguns metais de engenharia.

Ashby (2011) apresenta, na forma de mapa (Figura 4.4), a relação entre a taxa de desgaste versus dureza para diversos materiais de engenharia.

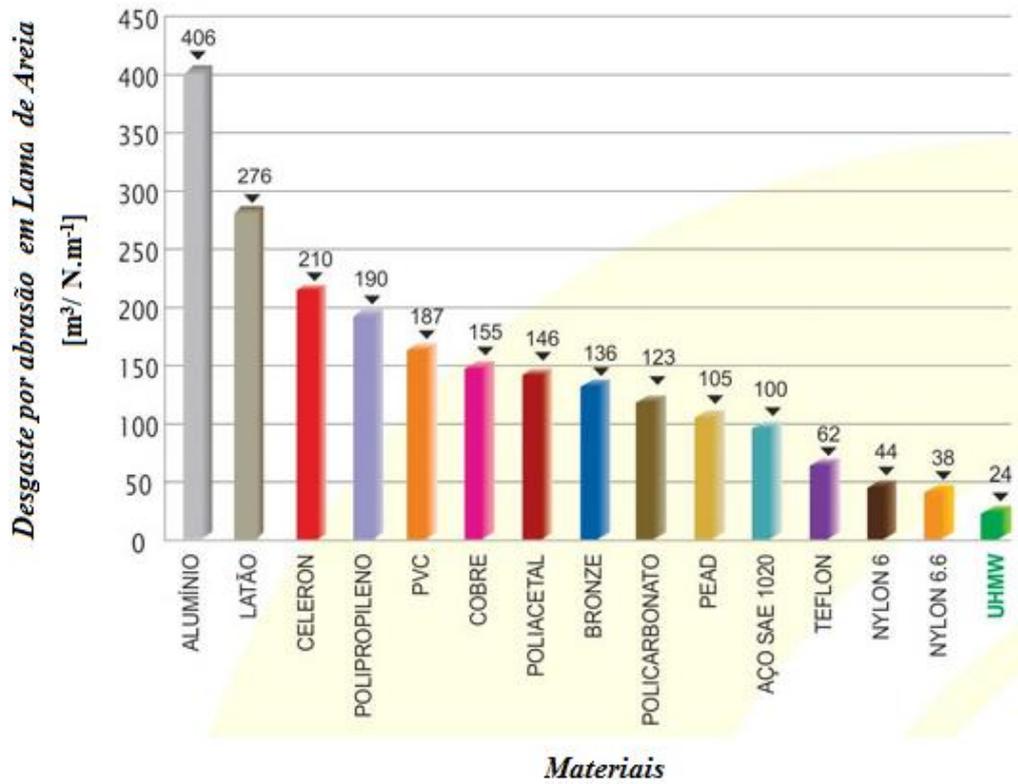


Figura 4.3: Diagrama de desgaste comparativo de materiais em teste por abrasão

Fonte: <http://www.cormatec.com.br/propriedades.php>

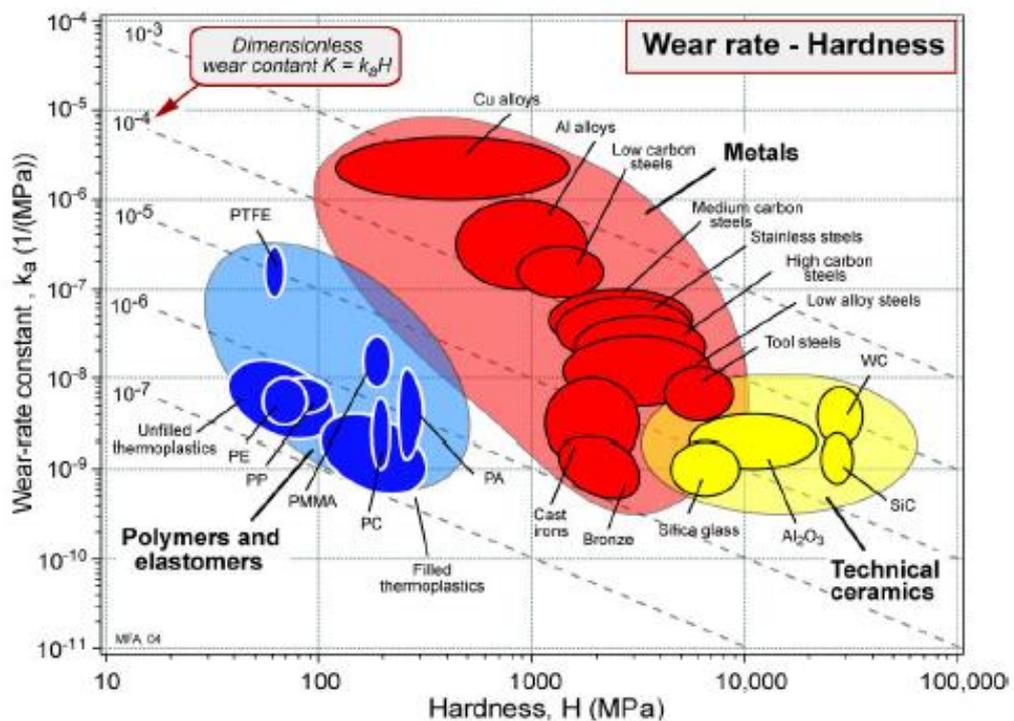


Figura 4.4: Materiais de Engenharia - Taxa de desgaste versus dureza

Fonte: Ashby (2011)

Os resultados de todos os experimentos (Testes V) realizados com o PDCG-M estão apontados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Dados e resultados dos testes finais do PDCG-M

Testes V - Dados dos Experimentos Finais do PDCG – M									
Ponteiras/Pivôs - (medidas em [mm])					Parâmetros e Medidas de Velocidade				
N	Material	D	P	C	d <sub>i</sub>	Tensão [V]	Corrente [mA]	Rotação [RPM]	Observações
1	Nylon	6,0	4,0	5,0	2,0				Não Girou/ Ajustes
2	Nylon	7,0	4,0	5,0	4,0				Não Girou/ Ajustes
3	Nylon	6,0	4,0	4,0	5,0	26,0	800	2554	Girou + impulso
4	Nylon	7,0	6,5	5,5	7,0	26,0	600	2890	Uso pó de Grafite
5	Nylon	6,5	9,5	4,5	10,0	26,0	250	3754	Grafite + ajustes
6	Nylon	7,0	8,0	4,3	15,0	26,0	300	3823	Graf./ Desg. Pivô T <sub>E</sub>
7	Latão	6,5	10,0	4,3	15,0	26,0	200	3500	Graf./ Desg. Pivô T <sub>E</sub>
8	Latão	6,5	10,0	4,3	14,3	26,0	100	4530	Graxa lítio + Grafite
9	Nylon	6,0	12,0	4,3	15,0	40,0	300	5900	Graxa lítio + Grafite
10	Nylon	6,0	12,0	4,3	15,0	46,8	218	6503	Graxa lítio + Grafite
11	Nylon	6,0	12,0	4,3	15,0	50,9	208	7149	Graxa lítio + Grafite
12	Nylon	6,0	12,0	4,3	15,0	60,0	220	8112	Graxa lítio + Grafite

As análises termográficas mostraram os pontos aquecidos, tanto nos mancais magnéticos como nos mancais por levitação Lenz. O maior aquecimento apresentado ocorreu em componentes na protoboard, ou seja, do circuito eletrônico de acionamento do motor do PDCG-M e periféricos como fontes de tensão. Ao mudar a posição de registro do termovisor, confirmada na imagem real em perspectiva, foi possível eliminar os registros de refração em análises na estrutura física do PDCG-M (ver anexos B\_1 à B\_8).

## 5 CONCLUSÕES

Os pré-testes (I, II) com o dispositivo de simulação de campo (DSC) demonstraram a importância do cuidado com a precisão e construção inicial, para evitar picos de frequência e vibração excessiva, motivo para inviabilizar o balanceamento e funcionamento adequado do PDCG-M. A medição utilizando-se do arranjo com o auxílio do torno mecânico de 7,1 kW de potência, acusou uma velocidade espectral global de 10,06 mm/s e ângulo de fase do vetor força de 74,1°, ou seja, valores melhores comparados com as medidas iniciais sem e com a roda.

Igualmente nos testes (III), após melhorias no DSC, conseguiu-se evoluir para um valor global inicial excelente, 0,427 [mm/s], ou seja, nível de criticidade vibratória normal [N]. Neste mesmo teste, após a provocação forçada do desbalanceamento para um valor global de 2,990 [mm/s], ou seja, crítico [C]. Após o uso da técnica de análise vibracional e balanceamento o resultado atingiu um valor global de 1,049 [mm/s], ou seja, permissível [P], diminuindo os níveis de excitação causados pelos esforços dinâmicos e desbalanceamento do conjunto, indicando que esta técnica é viável e pode auxiliar no balanceamento do volante do PDCG-M. Neste mesmo neste, ficou evidente a necessidade de um dispositivo ou instrumento que possibilite uma melhor precisão do ponto de indicação para adição da massa para efetuação do balanceamento do protótipo e também de um analisador de vibração com características técnicas para equipamentos de alta rotação.

Os testes (V) de velocidade com o PDCG-M e com técnicas preditivas de análise vibracional e termografia se mostraram satisfatórios e foi possível atingir o objetivo almejado no início do projeto. O PDCG-M, em razão das técnicas construtivas de ferramentaria e mecânica de precisão, atingiu velocidade de 8112 RPM com: Tensão de 60V, amperagem de 220 mA, distância de interação ( $d_i$ ) de 15 mm, pivô de nylon 6 e graxa de lítio+pó de grafite como lubrificante para diminuir o atrito. Acrescente-se que optamos por não testar o motor até o limite máximo dos componentes eletrônicos, para preservar o protótipo para trabalhos futuros. Verificamos que os testes englobando os mancais de levitação Lenz contribuíram para estabilidade do volante do PDCG-M, mas, de acordo com a Lei de Lenz, a mesma força eletromotriz induzida que gerou uma corrente na direção em que o campo magnético provoca a levitação, também se opõe ao campo magnético que

induz a corrente, provocando um “freamento” da velocidade de rotação (HALLIDAY e RESNICK, 2013; TELLES e NETTO, 2015).

O uso de técnicas usinagem de precisão e ferramentaria, levitação Lenz, e escolhas de materiais com propriedades mecânicas superiores, selecionados para construção, conferiram ao PDCG-M maior estabilidade em altas rotações, comparado com trabalho de Fernandes (2015). Outra vantagem deste projeto é a modulação e possibilidade da montagem de diferentes layouts do PDCG-M.

As escolhas selecionadas dos materiais para construção do PDCG-M foram: para base metálica e eixo (alumínio-magnésio-silício); para os suportes dos mancais de levitação Lenz e magnéticos (ligas de alumínio 6061); para buchas de alojamento dos ímãs de neodímio dos mancais magnéticos (latão C360); para base polimérica (poliacetal-POM); para os pivôs (nylon-6).

As técnicas preditivas usadas nos testes finais (V) inicialmente com o analisador de vibração da Vaibro® e gerenciador ROZH MR3000® indicaram limites de alarme correspondente às grandezas de vibração em mm/s (valores em rms), ou seja, Alerta [A – cor amarela] na condição mais crítica onde ocorreram desgastes nos pivôs (nylon 6 e latão) no mancal magnético ( $D_E$ ) e instabilidade no mancal ( $T_E$ ). Posteriormente, com a troca do ímã desta extremidade, o nível de criticidade foi a condição Normal [N-Verde]. As análises termográficas não apresentaram severidades passíveis de intervenção, tanto nos mancais magnéticos e levitação Lenz, como nos componentes do circuito eletrônico de acionamento do motor do PDCG-M e periféricos (fontes de tensão), demonstrando a assertividade na escolha de materiais, circuito de acionamento, funcionalidade e estabilidade do protótipo, e modificações inovadoras propostas.

As análises termográficas não apresentaram pontos severamente aquecidos, tanto nos mancais magnéticos como nos mancais por levitação Lenz. Os pontos de aquecimento registrados nas termografias, mantiveram-se dentro de padrões de trabalho dos componentes do circuito eletrônico de acionamento do motor do PDCG-M e periféricos (fontes de tensão).

Os experimentos com o DSC demonstraram a viabilidade do uso da técnica preditiva de análise vibracional e balanceamento, para auxílio no desenvolvimento de dispositivos de alta velocidade para calibração de gravímetros. E também possibilitou a geração de um dispositivo didático para ensino desta técnica preditiva no LCMP I da FATEC:SP, bem como, projeto para construção de um dispositivo menor (portátil) para ser usado na efetuação de cursos externos pela Arnes Preditiva & Treinamento

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Expandir os estudos para que PDCG-M possa atingir rotações estáveis de 96.000 RPM (1600 Hz), na perspectiva de geração de sinais gravitacionais com grandeza laboratorial conhecidos, objetivando a calibração de detectores de massa ressonante, especialmente o detector brasileiro, Mário Schenberg e a mensuração da velocidade de interação gravitacional por antenas ressonantes massivas. Acrescente-se a inclusão de construção de blindagem com materiais balísticos para o PDCG-M e realização de experimentos em câmara de vácuo.

Desenvolvimento de um analisador de vibração e balanceamento de campo, em parceria com uma empresa do setor, com maior sensibilidade piezoelétrica e uso de menor pré-carga para balanceamento, para trabalhar com máquinas e dispositivos de alta rotação. Isto vem ao encontro com os referenciais teóricos, pois matematicamente, a aceleração é proporcional ao quadrado da frequência para um deslocamento dado, ou seja, a vibração de alta frequência produz muita aceleração (MIRSHAWKA, 1941; MEIROVITCH, 2001; KARDEC E NASCIF, 2013; TIPLER, 2014; DESIMONE, 2015).

Efetuar novos estudos com os pivôs do PDCG-M, utilizando-se novos materiais, variando-se a distância de interação ( $d_i$ ) entre o ímã do mancal magnético e o ímã da extremidade do eixo do protótipo e pastilha de anteparo para evitar o contato direto do pivô com o ímã de neodímio. Conforme ilustração da Figura 6.1

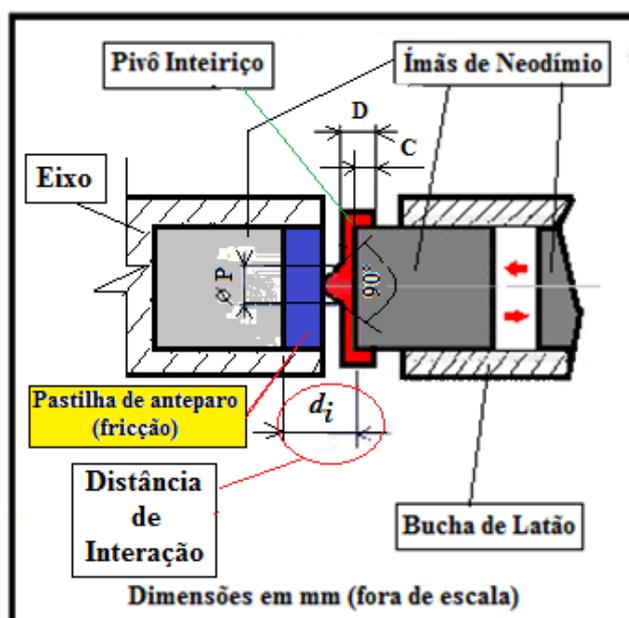


Figura 6.1: Ilustração de melhoria dos mancais magnéticos (Pastilha de anteparo/ fricção)

Fonte: Autor

Utilizar as modificações efetuadas no motor sem escovas no trabalho de Fernandes (2015), transformar o motor sem escovas em MRV, usar a usinagem não-convencional para construção e obtenção de um rotor balanceado para este MRV e testar a estabilidade e rotação máxima possível.

Construir blindagem balística e efetuar testes do protótipo dentro de uma câmara<sup>23</sup> de vácuo<sup>24</sup> (FERNANDES, 2015).

A Figura 6.2 mostra a câmara (diâmetro 400 x 300 mm) e bomba de vácuo disponíveis no Laboratório de Vácuo da FATEC/SP, que poderão ser utilizados para efetuar testes com o PDCG-M

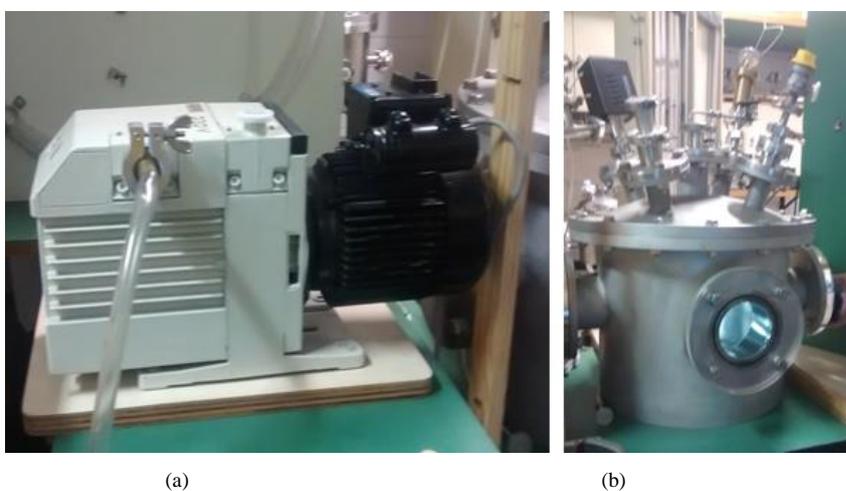


Figura 6.2: (a) bomba de vácuo; b) sistema de vácuo / Lab. Vácuo da FATEC/SP.

Fonte: Autor

---

<sup>23</sup> Cf., No trabalho de Fernandes (2015) uma das características necessárias desta câmara é a existência de escotilhas para observação visual e possibilidade de medição da velocidade do protótipo.

<sup>24</sup> Cf., Degasperri (2002) na ciência, como nas engenharias, o vácuo se estende por 15 ordens de grandeza, isto é, da pressão atmosférica de aproximadamente  $10^3$  mbar até pressões da ordem de  $10^{-12}$  mbar. O campo de aplicação da tecnologia do vácuo (pré-vácuo ou médio vácuo, ou seja, a  $10^{-2}$  ~  $10^{-4}$  mbar), é bastante amplo e de um modo geral podemos classificar as aplicações do vácuo em função das diferentes necessidades impostas pela indústria, pela pesquisa tecnológica e pela pesquisa científica. As pressões que estão abaixo da pressão atmosférica local são definidas tecnicamente como vácuo. Devido às diferentes tarefas e quantidades de gases a serem bombeados, os sistemas de vácuo têm inúmeras formas e dimensões. Os cálculos e projetos geralmente são de difícil execução em razão da diversificação dos sistemas de vácuo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOTT, B. P. et al. **Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger**. Physical Review Letters, p. 1-16, Fev. 2016.

\_\_\_\_\_ **Multi-Messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger**. Physical Review Letters, p. 1-34, October 6, 2017.

ABIPLAST. **Principais Tipos de Materiais Plásticos: propriedades**. Disponível em: <[www.abiplast.org.br](http://www.abiplast.org.br)> Acesso em agosto de 2017.

AGUIAR, O. D. **Parametric motion transducers for gravitational waves detectors**. Baton Rouge. 98p. Thesis (PhD in Physics) - Louisiana State University, 1990.

\_\_\_\_\_ **Na Onda do Gráviton**. Revista FAPESP – Ed. 61, p. 42-45, Jan/Fev 2001. Disponível em < <http://revistapesquisa.fapesp.br/revista/ver-edicao-editorias/?e=61> > acesso em março de 2018

\_\_\_\_\_ **Past, present and future of the Resonant-Mass gravitational wave detectors**. Research in Astronomy and Astrophysics, v. 11, n. 1, p. 1-42, Jan 2011. ISSN 1674-4527. Available at: < [://WOS:000286713600001](http://WOS:000286713600001) >.

\_\_\_\_\_; OLIVEIRA JR, Nei F. **Contribuição da supercondutividade na detecção de ondas Gravitacionais**. Revista USP, n. 92, p. 167-175. São Paulo, dezembro/fevereiro 2011-2012

ASHBY, Michael F. **Materials Selection in Mechanical Design**. 4<sup>th</sup> ed. United Kingdom: Butterworth-Heinemann, 2011.

ASSIS, Adam Smith G. B. **Excitação de Ondas Mhd Através da Emissão de Ondas Gravitacionais Produzidas por Binárias de Estrelas de Nêutrons**. São José dos Campos. 171 p. Mestrado (Astrofísica) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2016.

AZoM, the A to Z of Materials and AZojomo – The “Azo Journal of Materials Online”, 2000-2006. Disponível em: < <http://www.azom.com/default.asp>> acesso em fevereiro de 2017

BARROS, A. J. P.; LEHFELD, N. A. S. **Projeto de Pesquisa: propostas metodológicas**. Petrópolis: Vozes, 1997.

- BEJGER, M. **Gravitational waves from rotating neutron stars: Current limits and prospects**. Physics of Particles and Nuclei, v. 46, n. 5, p. 839-842, Sep 2015. ISSN 1063-7796. Available at: <://WOS:000360810400026 >.
- BONASSI, L. V. et al. **Desenho Técnico 2**. São Paulo: Tetra Tecnologia do Traço, 2011
- BORTOLI, Fábio da Silva. **Sistemas vibracionais do detector de ondas gravitacionais Mário Schenberg**. Tese de Doutorado — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- BRITES, F. G.; SANTOS V. P. A. **Motor de Passo**. Grupo PET-Tele. Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2008.
- CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. 8ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.
- CAPELLA, M. C. **Propriedades Mecânicas em Laminados Fibras de Vidro e Fibra de Carbono em Resina Epóxi**. 20º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Nov. 2012, Joinville, SC, Brasil.
- COCCIA, E. **Spherical Gravitational Wave Detectors and Coalescing Binaries**. Proceedings of First International Workshop for an Omnidirectional Gravitational Radiation Observatory. Edited by AGUIAR, O. D. et al (Word Scientific Publishing Co.) – 1995.
- COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008.
- CROCKER, K. et al. **Model of the stochastic gravitational-wave background due to core collapse to black holes**. Physical Review D, v. 92, n. 6, Sep 8 2015. ISSN 1550- 7998. Available at: <://WOS:000360886100003 >.
- D`Avila, C. E. P. et al. **Estudo de um motor CC brushless aplicado no acionamento de um carro elétrico de pequeno porte**. Revista Liberato, Novo Hamburgo, v. 12, n. 18, p. 107-206, jul./dez. 2011. Disponível em <[http://www.liberato.com.br/sites/default/files/arquivos/Revista\\_SIER/v.%2012,%20n.%2018%20\(2011\)/5.%20estudo%20de%20um%20motor%20CC.pdf](http://www.liberato.com.br/sites/default/files/arquivos/Revista_SIER/v.%2012,%20n.%2018%20(2011)/5.%20estudo%20de%20um%20motor%20CC.pdf)> Acesso agosto de 2017.
- DEGASPERI, Francisco T. **Modelagem e Análises Detalhadas de Sistemas de Vácuo**. Mestrado (Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação) FEEC – UNICAMP – Campinas – São Paulo, 2002.
- DE SORDI, J. O. **Elaboração de pesquisa Científica: Seleção, leitura e redação** - 1ª Ed. São Paulo: Saraiva, 2013.

- DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy** – SI Edition. Boston: McGraw, 3 ed., 1988.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 8ª ed. São Paulo: Artliber Editora, 2013.
- DESIMONE, A. **Machine Health Sensor and IoT Sensing Solutions**. North America Partner Training – NAPT. Analog Divices, 2015.
- EDWARDS, M. C. et al. **Bayesian semiparametric power spectral density estimation with applications in gravitational wave data analysis**. Physical Review D, v. 92, n. 6, Sep 9 2015. ISSN 1550-7998. Available at: <://WOS:000360886300009 >.
- EINSTEIN, Albert. In: VINHAS, Tânia. Frase da semana. Superinteressante, 3 out. 2011. Disponível em: <<http://super.abril.com.br/blogs/superblog/frase-da-semana-a-imaginacaoe-mais-importante-que-o-conhecimento-einstein/>>. Acesso em: 08 março 2018.
- FERNANDES, Paulo. **Desenvolvimento de dispositivo para calibração do detector Schenberg**. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2015.
- FRAJUCA, Carlos. **Otimização de Transdutores de Dois Modos Mecânicos para Detectores de Ondas Gravitacionais**. Tese (Doutorado em Física) – Instituto de Física da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.
- FRAJUCA, Carlos; BORTOLI, F. S.; MAGALHÃES, N. S. **Simulações Pelo Método de Elementos Finitos da Esfera Do Detector Mário Schenberg** - Sinergia, São Paulo, v. 12, n. 3, p. 254-258, set./dez. 2011.
- FRAJUCA, C.; SOUZA, M.A.; COPPEDÉ, D.; NOGUEIRA, P.R.M.; BORTOLI, F.S.; SANTOS, G.A. **Optimization of a composite quadrupole mass at high-speed rotation**. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v. 40, p. 319, 2018. Available at: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s40430-018-1239-9>> Access in July of 2018.
- FURTADO, S. R. **Desenvolvimento de Transdutores Paramétricos de Alta Sensibilidade Para o Detector de Ondas Gravitacionais Mário Schenberg**. Tese (Doutorado em Ciência Espacial/ Astrofísica). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2009.
- FURUKAWA, C. **Indução Eletromagnética | Experimento - Lei de Lenz: levitação magnética**. Univesp – USP, 2014. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=uZj67ghKJbo>> Acessado em janeiro de 2017

- GIERAS, WING, 2002, apud SILVA, J. P.; TIVES, M. H. Cuiabá, 2017, p. 23. **Estudo de Máquinas elétricas Não-Convencionais: Motor Brushless DC.** Disponível em: <[http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180500/tce-23042010-091439/publico/Trindade\\_Rafael\\_Henrique.pdf](http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180500/tce-23042010-091439/publico/Trindade_Rafael_Henrique.pdf)>. Acessado em: 15 de agosto de 2018
- GIL, Antônio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social.** 5ª. ed. São Paulo: Atlas, 2007.
- GRAHAM, P. W.; RAJENDRAN, S.; VARELA, J. **Dark matter triggers of supernovae.** Physical Review D, v. 92, n. 6, Sep 9 2015. ISSN 1550-7998. Available at: <://WOS:000360886300003 >.
- GROOVER, Mikell P. **Fundamentos da Moderna Manufatura - Vol. 1 .5ª Ed.** Rio de Janeiro: LTC, 2017
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física: eletromagnetismo.** vol. 3. Rio de Janeiro: LTC, 2013. ISBN 978-85-216-1905-5
- HAWKING, S.; MLODINOW, L. **A Briefer History of Time.** New York: Bantam Books, 2005. ISBN 0-553-80436-7
- HULL, D & CLYNE, T. W. **An Introduction to Composite Materials.** Cambridge University Press, 1996. ISBN 0-521-38190-8
- JET-CUTTING WATER. **Detalhe de um Processo de Jet-Cutting Water:** Disponível em < [http://: faculdades.sp.senai.br.](http://faculdades.sp.senai.br) > acesso em abril de 2017
- KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção Preditiva: fator de sucesso na gestão empresarial.** 1ª ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2013.
- KROKER, S.; NAWRODT, R. **The Einstein Telescope. Ieee Instrumentation & Measurement Magazine,** v. 18, n. 3, p. 4-8, Jun 2015. ISSN 1094-6969. Available at: <://WOS:000354953600002 >.
- LAKATOS, E. M.; MARCONI; M. A. **Metodologia do trabalho científico.** 8ª ed. São Paulo: Atlas, 2011.
- LINARES, H. **Suspensão Magnética com Motorização para Medição da velocidade da Interação Gravitacional.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Materiais e Processos) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, IFSP. São Paulo, 2016.
- LOCKERBIE, N. A.; TOKMAKOV, K. V. **A 'Violin-Mode' shadow sensor for interferometric gravitational wave detectors.** Measurement Science & Technology, v. 25, n. 12, Dec 2014. ISSN 0957-0233. Available at: <://WOS:000345286800020 >.

- LONGMAN Group Ltd. **Dictionary of Contemporary English, third edition – The Complete guide to Written and Spoken English.** British National Corpus, 1995
- MAGALHÃES, N. S. et al. **Determination of Astrophysical Parameters from de Spherical Gravitational Wave Detector Data.** Mon. Not. R. Astron. Soc., 274, 670-678 (1995)
- MARGALIT, B.; PIRAN, T. **Radio flares of compact binary mergers: the effect of nontrivial outflow geometry.** Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v. 452, n. 4, p. 3419-3434, Oct 1 2015. ISSN 0035-8711. Available at: <://WOS:000360862100011 >.
- MEIROVITCH, Leonard **Fundamental of Vibrations,** McGraw-Hill, 2001- ISBN-10: 1577666917.
- MIRSHAWKA, Victor. **Manutenção Preditiva: Caminho para Zero Defeitos.** São Paulo: McGraw-Hill, 1941
- MORAES, O. C. **Levitação Magnética.** Instituto de Física Gleb Wataghin, Universidade Estadual de Campinas. Disponível em <http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530\_F590\_F690\_F809\_F895/F809/F809\_sem1\_2005/OscarC-Pudenzi\_RF.pdf> acesso em nov. 2017.
- MOURA, M. F. S. F. et al. **Materiais Compósitos – Materiais, Fabricação e Comportamento Mecânico,** 2ª ed. Editora Publindústria, 2005
- MÜLLER, Alexei M. et al. **Forças Gravitacionais Diferenciais – Marés e precessão,** set. 2013. Disponível em <http://www.if.ufrgs.br/fis02001/aulas/aulafordif.htm> acesso em fev. 2016.
- NASA, USA. **Information on the American Recovery and Reinvestment Act of 2009.** Disponível em [http://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image\\_feature\\_793.html](http://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_793.html); White Dwarf Star Spiral> acesso em agosto de 2015
- NAPOLEÃO, André B. Controle de Um Experimento Para Medir a Velocidade da Interação Gravitacional Com o Detector Mario Schenberg. Dissertação (Mestrado Profissional em Controle e Automação de Processos) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2013.
- NORTON, M.P; KARCZUB, D.G. **Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers.** New York: Cambridge University Press, 2003 - ISBN:9781139163927.
- OLIVEIRA, Nei F.; Aguiar, Odylio D. **The Mario Schenberg Gravitational Wave Antenna.** Brazilian Journal of Physics, V 46, n.5, p 596–603, 2016

- PADILHA, A. F. **MATERIAIS DE ENGENHARIA: Microestrutura e Propriedades.** Curitiba: Hemus, 2000)
- PADOVANI, Débora. **Desenvolvimento de um experimento para medir a velocidade da interação gravitacional.** Dissertação (Mestrado Profissional em Controle e Automação de Processos) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2012.
- PAULA, L. A. N. **Otimização do Sistema de Transdução Paramétrica do Detector de Ondas Gravitacionais Mario Schenberg.** Tese (Doutorado em Ciências) Instituto de Física da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2013.
- PAVANI, R. A.; HORIKAWA, O. **Compact Magnetic and Sliding Hybrid Bearing for Low Axial Load Applications.** 22nd International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives (MagLev 2014), Rio de Janeiro, v. 1, Set. 2014.
- POLYA, G. **A Arte de Resolver Problemas: um novo aspecto do método matemático.** Rio de Janeiro: Interciência, 1995.
- PORTER, E. K. **Effects of different eLISA-like configurations on massive black hole parameter estimation.** Physical Review D, v. 92, n. 6, Sep 1 2015. ISSN 1550-7998. Available at: < ://WOS:000360333700002 >.
- RAMOS, L.; TOLEDO, L.; MACHADO, R. **Desenvolvendo jogos com Arduíno.** FATEC - São Caetano do Sul. São Caetano, 2014.
- RIBEIRO, K. L. **Estudo do sistema de transdução paramétrica para detectores de ondas.** Tese de Doutorado — INPE, São José dos Campos, 2003.
- RUIZ, Willian; FRAJUCA, Carlos. **Controle de um dispositivo para calibração do detector Mário Schenberg.** Sinergia, São Paulo, v. 15, n. 2, p. 91-98, abr./jun. 2014.
- SANTOS, G. A. **Tecnologia dos Materiais Metálicos: Propriedades, Estruturas e Processos de Obtenção.** São Paulo: Érica, 2015.
- SANTOS, K. A. M. D. **Protótipo de Experimento para medir velocidade de interação gravitacional.** São Paulo: Dissertação de Mestrado - IFSP, 2013.
- SERWAY, R. **Física 1- Mecânica e Gravitação: para Cientistas e Engenheiros.** 3ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.
- SERWAY, R.; JEWETT Jr., J. W. **Princípios de Física: Eletromagnetismo.** Vol. III. São Paulo: Cengage Learning, 2011. ISBN 85-221-0414-X
- \_\_\_\_\_. **Física 4 - Física Moderna: para Cientistas e Engenheiros.** 3ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

- SHAPIRO, Stuart L.; TEUKOLSKY, Saul A. **Black holes, white dwarfs and neutron stars: the physics of compact objects**. New York: Wiley-Interscience, Cap. 16, 1983, p. 466-498. ISBN-10: 0-471-87316-0.
- SILVA, J. P.; TIVES, M. H. **Acionamento E Controle De Motor Brushless De Usando O Microcontrolador ATmega328P**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso Instituto Federal de Tecnologia de Mato Grosso, IFMT, Cuiabá, 2017.
- SILVA, Melissa R. M. **Influência de Elementos de Liga na Microestrutura e Propriedades Magnéticas de Ímãs à Base de PrFeCoB**. São Paulo: Dissertação de Mestrado – IPEN/USP, 2017
- SILVA NETO, S.; FRAJUCA, C. **Protótipo de Dispositivo Para Calibração de Gravímetros: Uso de Técnica de Análise Vibracional e Balanceamento**. Boletim Técnico Faculdade de Tecnologia de São Paulo, v. 41, p. 42-47, 2016. ISSN 1518-9082.
- SOUZA, S. T. **O detector de ondas gravitacionais Mário Schenberg: uma antena esférica criogênica com transdutores paramétricos de cavidade fechada**. Tese (Doutorado em Ciências) Instituto de Física da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2012.
- TAYLOR. James L. **Dicionário metalúrgico: inglês-português, português-inglês/** James L. Taylor. 2º edição — São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2000
- TELLES, D. D.; NETTO, J. M. **Física com Aplicação Tecnológica: eletrostática, eletromagnetismo e fenômenos de superfície**. Vol. 3. São Paulo: Blucher, 2015. ISBN 978-85-2012-0929-4
- TIPLER, Paul A.; LLEWELLYN, Ralph A. **Física Moderna**. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. Cap. 2. p 68 à 70.
- TM C – 360. **Latão Corte Livre Americano**. Disponível em: <[www.termomecanica.com.br](http://www.termomecanica.com.br)> acesso em fevereiro de 2017.
- TRENTINI, M.; PAIM, L. **Pesquisa Em Enfermagem. uma modalidade convergente-assistencial**. Florianópolis: Editora da UFSC, 1999.
- TRUJILLO FERRARI, Alonso. **Metodologia da pesquisa científica**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1982.

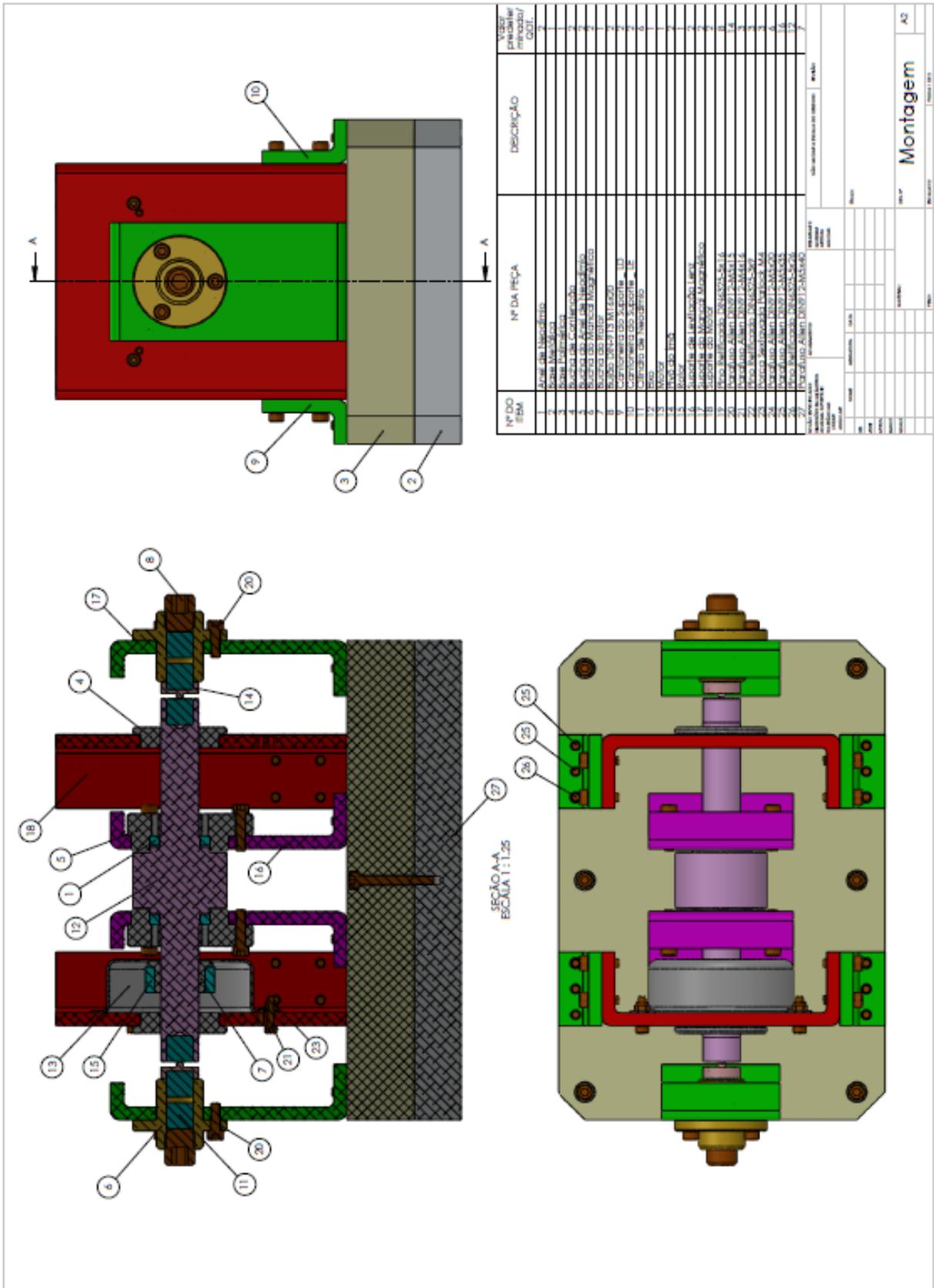
## APÊNDICES

### APÊNDICE A - Tabela: Equipamentos Disponíveis e Laboratórios FATEC/SP.

<b>Equipamento</b>	<b>Modelo/ Fabricante</b>	<b>Localização/ FATEC-SP</b>
Torno Mecânico	MS 205 / Nardini	Lab. CMP I
Fresadora Ferramenteira	Veker	Lab. CMP I
Fresadora de Coordenadas	Mikromat	Lab. CMP I
Fluorescência de Raios – X	Bruker – S2 Ranger	Lab. PCM
Máquina de medição em três dimensões	Mitutoyo	Lab. Metrologia
MEV	JEM 1200EX II/ Jeol	Lab. PCM
MO	Axio Vision LE / Zeiss	Lab. PCM
Máquina de Ensaio	DL-1000/ Emic	Lab. MCM
Torno CNC	Hardinge GS150/ Ergomat	Lab. CNC
Metalografia	PL 02 ET/ Teclago	Lab. TTSM
Ensaio de Microdureza	MHV-2000/ Time	Lab. TTSM
Espectrômetro Emissão Óptica	Expectromax-x / Ametek	Lab. Metrologia
Bomba e Câmara de Vácuo	Laybold	Lab. Vácuo
Simulador de balanceamento	Dispositivo Construído	Lab. CMP I/

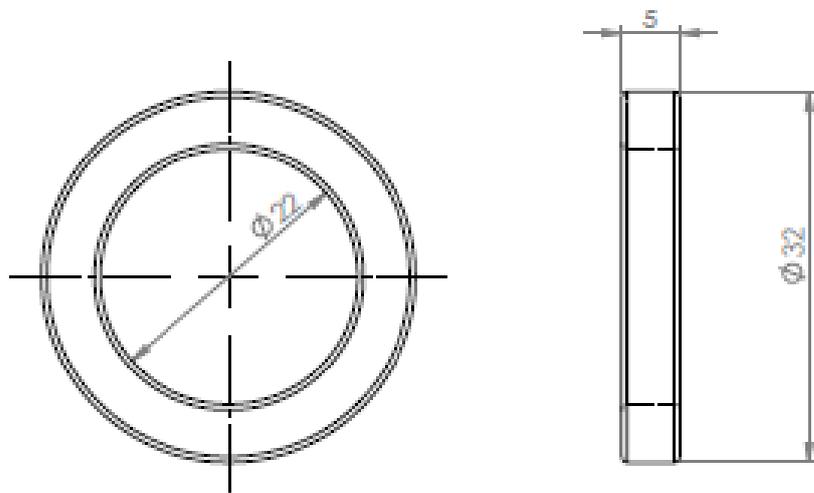


APÊNDICE C – Vistas Ortogonais da Montagem do PDCG-M



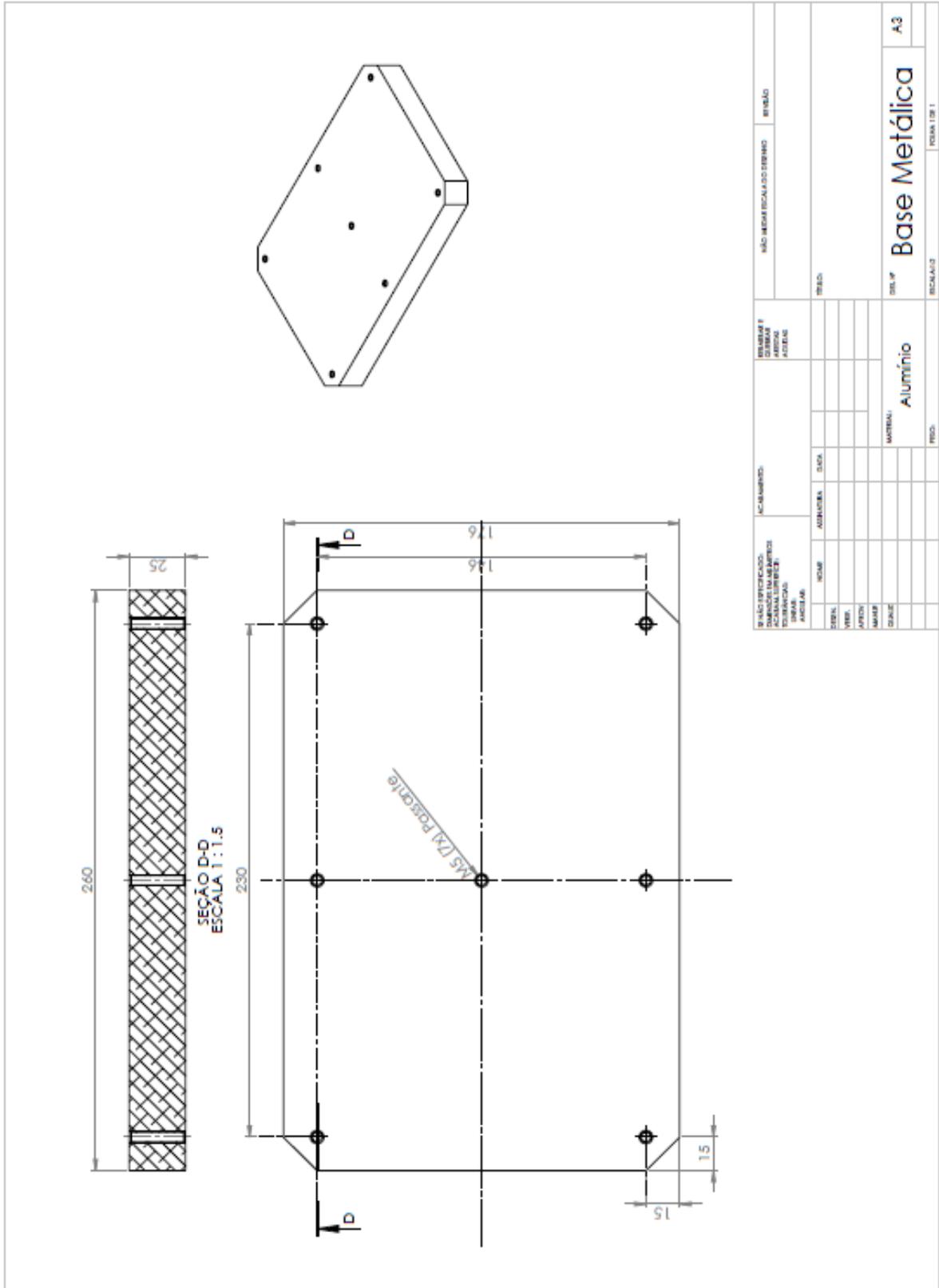


APÊNDICE E\_1 - Vistas Ortogonais PDCG-M – Anel de Neodímio (LENZ)

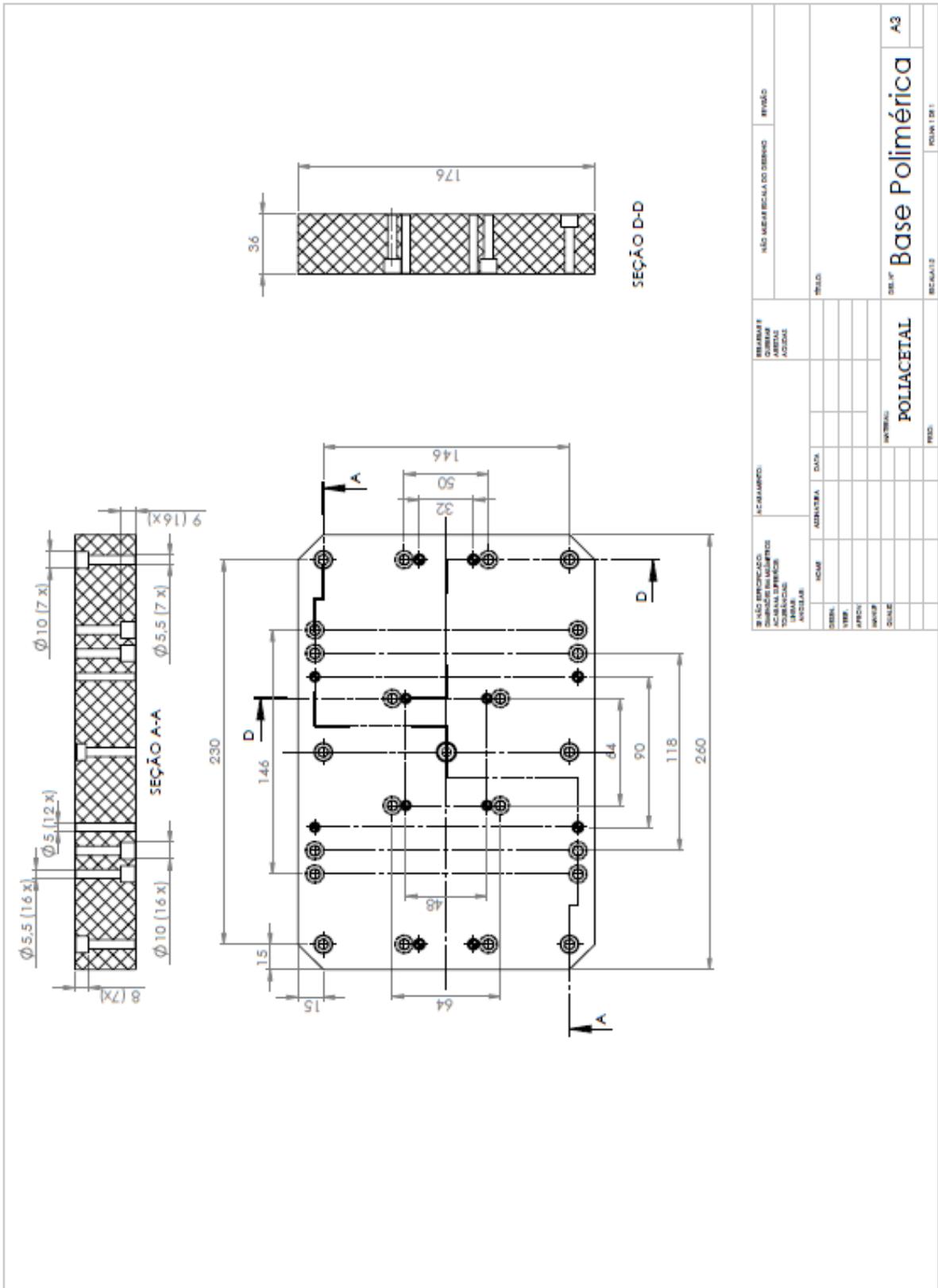


SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAMENTO: TOLERÂNCIAS: LINHAS: ANGULAR:		ACABAMENTO:		DESENHO AND SERIAL QUANT FOLHAS		NÃO MEDIR A ESCALA DO DESENHO		REVISO	
	NUMERO	ADICIONA	DATA			TITULO			
DEL						DEL Nº <b>Anel de Neodímio</b> A4			
VERB									
APROV									
ANALIS									
QUANT									
					MATERIAL:				
					FECH:	ESCALA: 1		FOLHA 1 DE 1	

APÊNDICE E\_2 - Vistas Ortogonais PDCG-M – Base Metálica de Alumínio



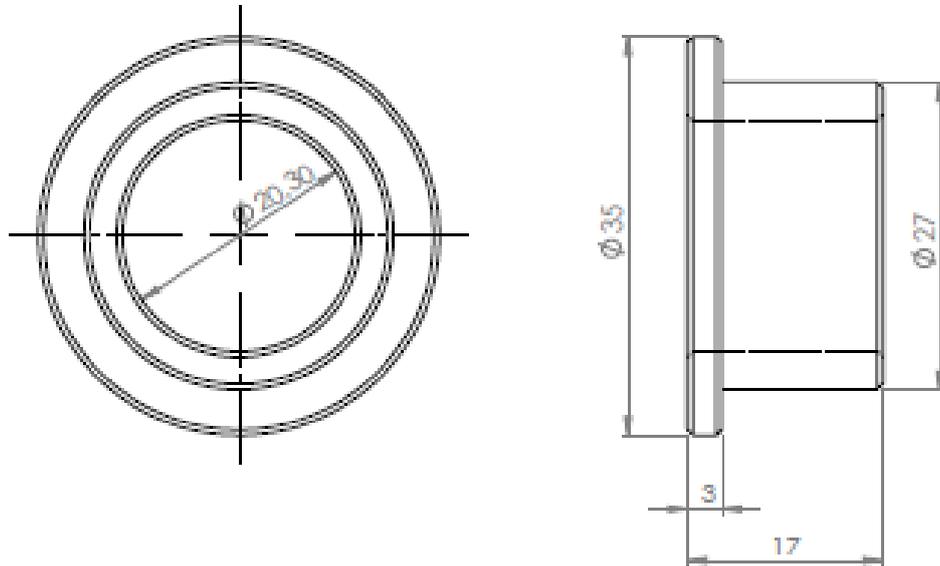
APÊNDICE E\_3 - Vistas Ortogonais PDCG-M – Base Polimérica de Poliactal



NOME DO PROJETO: NOME DO CLIENTE: NOME DO PROJETO: NOME DO PROJETO: NOME DO PROJETO:		NOME DO PROJETO: NOME DO PROJETO: NOME DO PROJETO: NOME DO PROJETO:		NOME DO PROJETO: NOME DO PROJETO: NOME DO PROJETO: NOME DO PROJETO:	
DATA: DATA: DATA: DATA:	DATA: DATA: DATA: DATA:	DATA: DATA: DATA: DATA:	DATA: DATA: DATA: DATA:	DATA: DATA: DATA: DATA:	DATA: DATA: DATA: DATA:
MATERIAL: <b>POLIACETAL</b>			MATERIAL: <b>Base Polimérica</b>		
PROJETO:			PROJETO:		

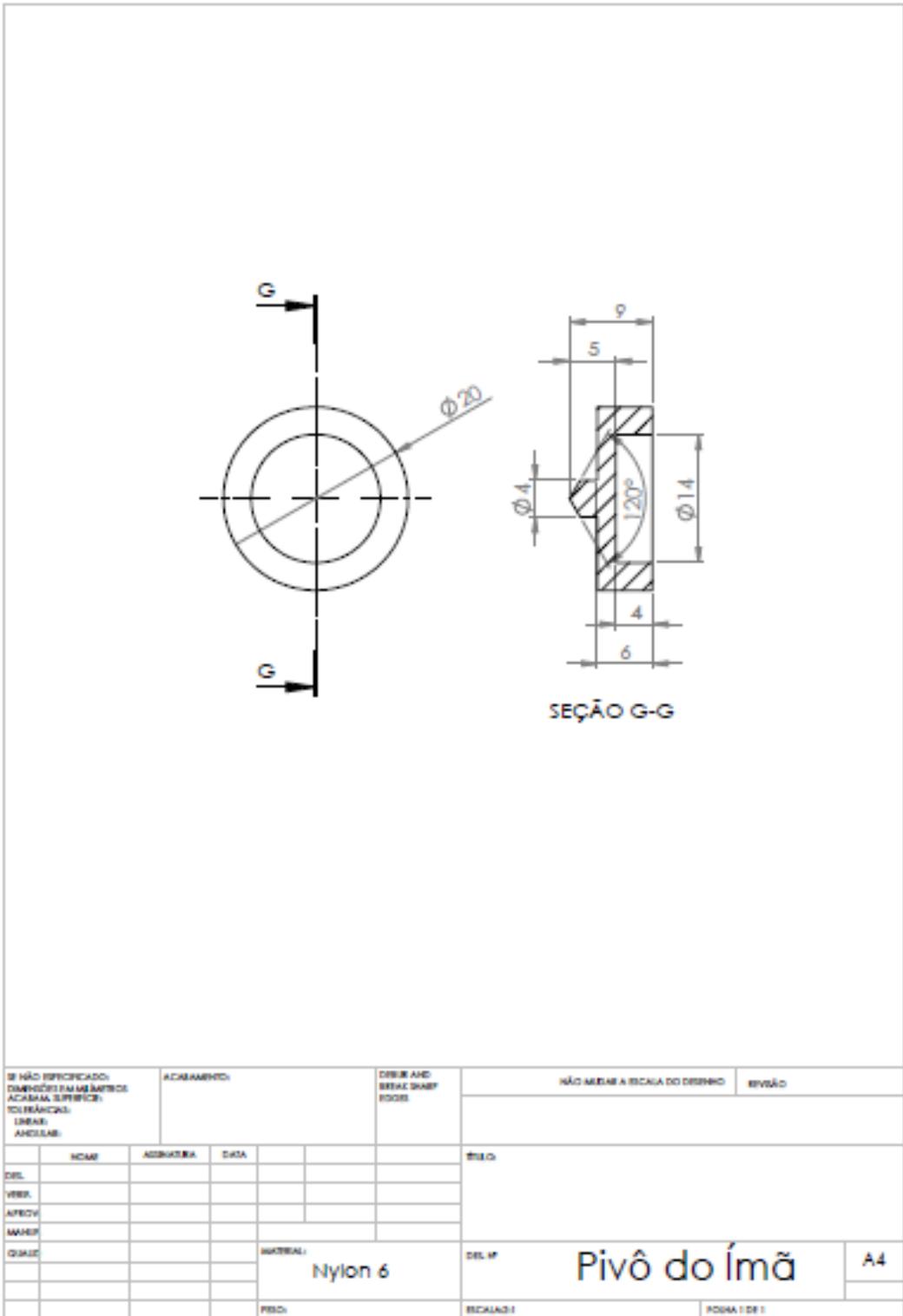


APÊNDICE E\_5 - Vistas Ortogonais PDCG-M – Bucha do Rotor



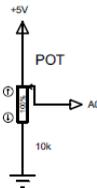
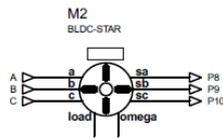
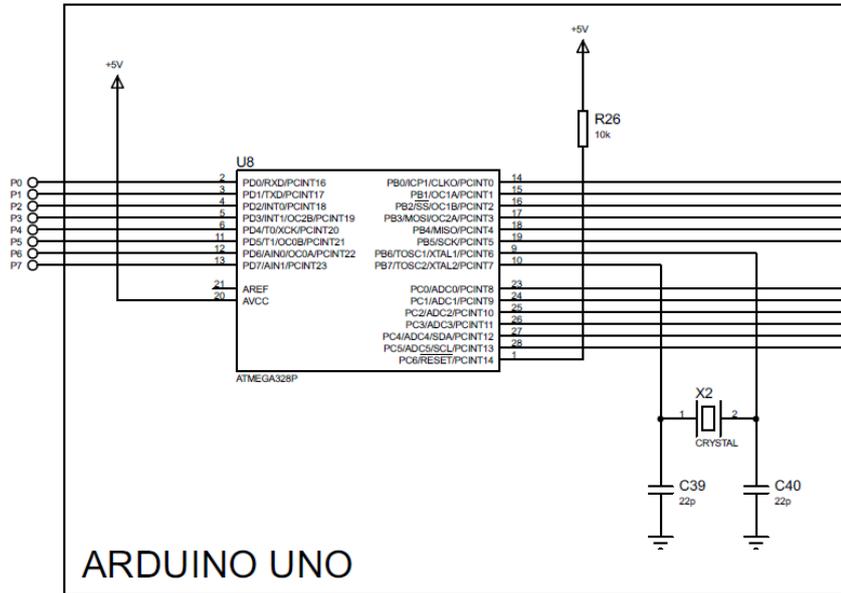
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSIONADO PARA BASTON ACORDADA (SE ENFORÇAR) TODAS AS PARTES LIGADAS ANEXADAS		ACABAMENTO:		DIREÇÃO DESENVOLVIMENTO DO EIXO		NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
AUT.		ACABAMENTO		DATA		TÍTULO			
DEL.									
VEND.									
APROV.									
MATER.									
QUALC.				MATERIAL:		DEL. Nº		A4	
				POLIACETAL		Buchha do Rotor			
				PESO:		ESCALA: 1		FOLHA 1 DE 1	

APÊNDICE E\_6 - Vistas Ortogonais PDCG-M – Pivô/ Ponteira Distanciadora (5 mm)





APÊNDICE F\_2 – Circuito Elétrico do Controle do Motor do PDCG-M – Versão Final



Título:	Controle / Conexões	DATE:	28/05/2018
PROJETO:	Projeto Motor BLDC	PAGE:	1 of 2
BY: Davinson M. Silva	REV: 1	TIME:	12:51:40

## APÊNDICE G – Código de Acionamento do Motor do PDCG-M

```

// Código de controle de motor do PDCG-M
// Responsável pelo Projeto: Silvestre
// Autor: Davinson M. Silva
// Data: maio/2018

byte motor_speed, bldc_step, pwm_pin = 2;

void setup() {

//Serial.begin(9600);
  DDRD |= 0xFC;          // Configura os pinos 2, 3, 4, 5, 6 and 7 como saídas
  PCICR = 1;            // Habilita interrupção para os pinos 8 to 13
  PCMSK0 = 7;          // Habilita interrupção para os pinos 8, 9 and 10

// Timer2 configuration
  TCCR2A = 0;
  TCCR2B = 2;          // Timer2 prescaler = 1/8 (Timer2 clock = 2MHz)
  TCNT2 = 0;          // Timer2 preload value = 0

// ADC module configuration
  ADMUX = 0x60;        // Configura o módulo ADC e seleciona o canal 0
  ADCSRA = 0x84;      // Configura o módulo ADC com um fator de divisão 16 (ADC clock =
1MHz)

// BLDC motor first move
  bldc_step = PINB & 7; // Lê o status dos sensores de Efeito Hall (PINB: lê a partir da PORTB
que corresponde aos pinos 8..13)
  bldc_move();          // Move o motor BLDC (primeiro movimento)
}

ISR (PCINT0_vect){
  bldc_step = PINB & 7; // Lê e salva o status dos sensores de efeito hall (PINB: lê a partir da
PORTB que corresponde aos pinos 8..13)
  bldc_move();          // Move o motor BLDC
}

void bldc_move(){      // Função de movimentação do motor BLDC de acordo com o status dos
sensores de efeito hall
  switch(bldc_step){
    case 1:
      PORTD = 0x48;
      pwm_pin = 6;
      break;
    case 2:
      PORTD = 0x24;
      pwm_pin = 2;
      break;
    case 3:

```

```

    PORTD = 0x60;
    pwm_pin = 6;
    break;
case 4:
    PORTD = 0x90;
    pwm_pin = 4;
    break;
case 5:
    PORTD = 0x18;
    pwm_pin = 4;
    break;
case 6:
    PORTD = 0x84;
    pwm_pin = 2;
    break;
default:
    PORTD = 0;
    break;
}
}

void loop() {
    ADCSRA |= 1 << ADSC;           // Inicia a conversão
    while(ADCSRA & 0x40);          // Aguarda a finalização do processo de conversão
    motor_speed = ADCH;            // Lê os dados do ADC (8 bits)

    // Software PWM - Procedimentos para controle de velocidade do motor (PWM)
    if(motor_speed < 250){
        while(TCNT2 < motor_speed) ;
        digitalWrite(pwm_pin, LOW);
    }
    if(motor_speed > 0){
        while(TCNT2 >= motor_speed) ;
        digitalWrite(pwm_pin, HIGH);
    }
}

```

ANEXOS

ANEXO A\_1 – Relatórios de Análise Vibracional – Arnes Preditiva e Treinamento

**ARNES PREDITIVA & TREINAMENTO** CNPJ 19.626.318/0001-00 IE 635.735.971.118  
 Rua Pindorama,17 – Bairro Jordãoópolis - São Bernardo do Campo São Paulo  
 CEP 09892-120 Cal: (11) 9 9885-3550 (Vivo)  
 Fone e Fax: ++ (11) 4330-9708 Email: [sargiosaura@uol.com.br](mailto:sargiosaura@uol.com.br)

Data  
05/2018

**ANÁLISE VIBRATÓRIA**

*Relatório*

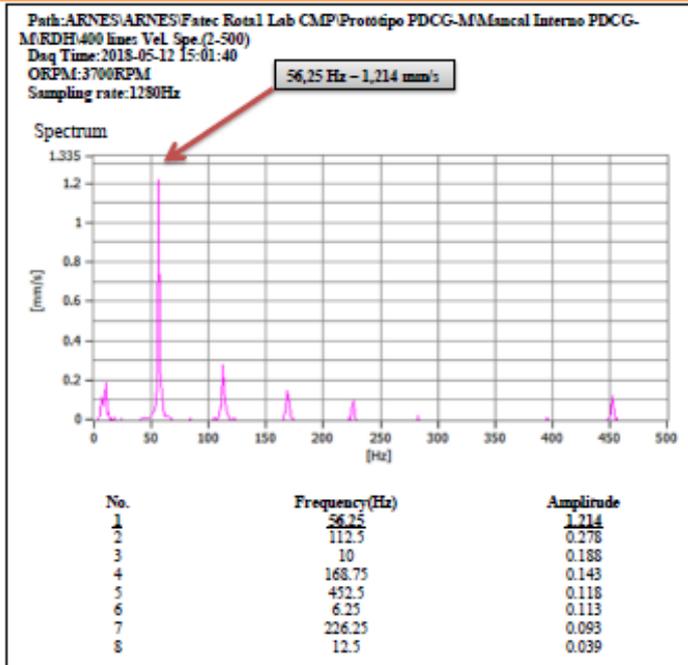
*Arnes – VaibroSmartCHI*

**Próxima Medição**  
**Indeterminado**

**FATEC – Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo** CEP 01124-060  
**End: Pç. Cel. Fernando Prestes, 30 -Bairro Bom Retiro - São Paulo SP**  
**Resp.: Prof. Silvestre Neto - Lab. CMPI - Tel: 11 3322-2226**

*Analista Arnes: Eng Sérgio A. Senra*

**ARNES PREDITIVA & TREINAMENTO** CNPJ 19.626.318/0001-00 IE 635.735.971.118  
 Rua Pindorama,17 – Bairro Jordãoópolis - São Bernardo do Campo São Paulo  
 CEP 09892-120 Cal: (11) 9 9885-3550 (Vivo)  
 Fone e Fax: ++ (11) 4330-9708 Email: [sargiosaura@uol.com.br](mailto:sargiosaura@uol.com.br)

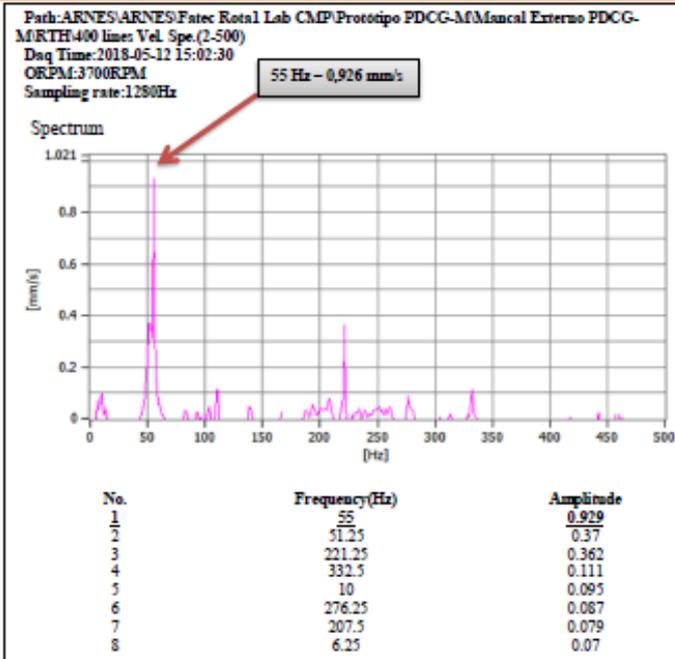


**Comentário:**  
**Equipamento:** PDCGMMME1 Mancal Interno  
**PDCG-M**  
**Demonstrando:** Desbalanceamento incipiente.  
**Ação Corretiva:** Recomendo revisar montagem dos mancais.  
**- Outros pontos com a mesma anomalia.**

Ponto	Hz.	Valor mm/s
RDH	56,25	1,214
RTH		0,705
RDA	55	0,396
RTA		0,274
RDH	465	0,150 m/s <sup>2</sup>

## ANEXO A\_2– Relatório de Análise Vibracional – Arnes Preditiva e Treinamento

**ARNES PREDITIVA & TREINAMENTO** CNPJ 19.626.318/0001-00 IE 635.735.971.118  
 Rua Pindorama, 17 – Bairro Jordãoópolis - São Bernardo do Campo São Paulo  
 CEP 09892-120 Cal.: (11) 9 9885-3550 (Vivo)  
 Fone • Fax: ++ (11) 4330-9708 Email: [sergiossara@uol.com.br](mailto:sergiossara@uol.com.br)



Comentário:

Equipamento: PDCG\MEMEM1 Mancal Externo  
 PDCG-M

Demonstrando: Desbalanceamento e  
 desalinhamento, ambos incipientes.

Ação Corretiva: Recomendo revisar montagem  
 dos mancais.

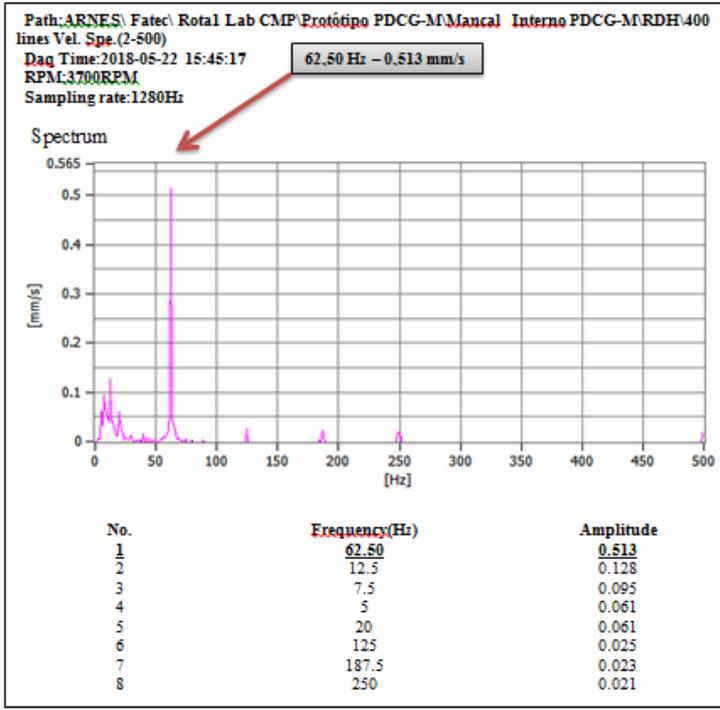
- Outros pontos com a mesma anomalia.

Ponto	HZ.	Valor mm/s
RTH	55	0,929
RDV		0,518
RTA	56,25	0,766
RDH		0,699
RTA	11,25	0,865
	278,25	0,493
	282,50	0,122 m/s <sup>2</sup>

- Nota: O mancal externo traseiro é o que apresenta  
 maior degradação.

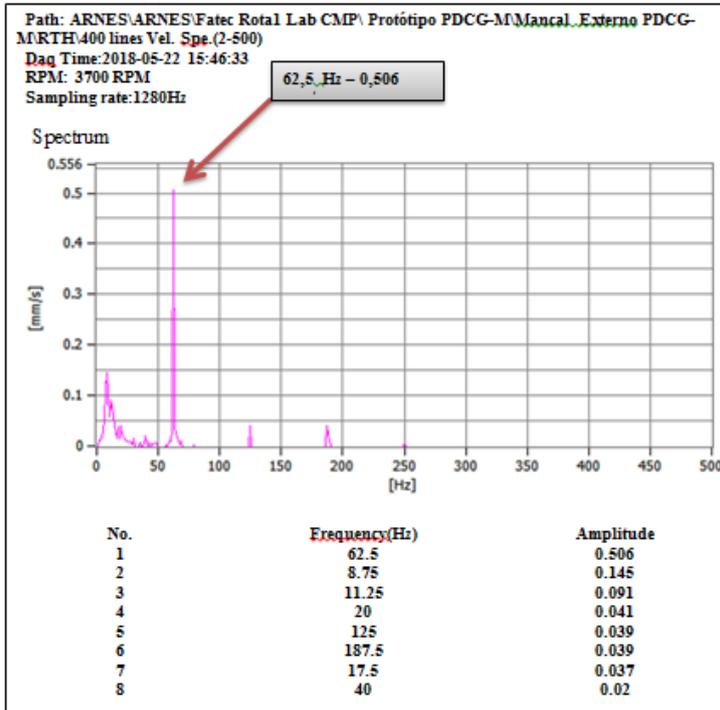
ANEXO A\_3 - Relatórios de Análise Vibracional – Arnes Preditiva e Treinamento

**ARNES PREDITIVA & TREINAMENTO** CNPJ 19.626.318/0001-00 IE 635.735.971.118  
 Rua Pindorama,17 – Bairro Jordanópolis - São Bernardo do Campo São Paulo  
 CEP 09892-120 Cel.: (11)9 9885-3550 (Vivo)  
 Fone e Fax: ++(11)4330-9708 Email [sergiosenra@uol.com.br](mailto:sergiosenra@uol.com.br)



**Comentário:**  
**Equipamento:** PDCGMMIME1 Mancal Interno  
**PDCG-M**  
**Demonstrando:** Desbalanceamento admissível.  
**Ação Corretiva:** Recomendo acompanhar as próximas medições para verificação dos valores vibracionais.  
 - Outros pontos com a mesma anomalia.

Ponto	Hz	Valor mm/s
RDH	62,50	0,513
RTH		0,440
	7,50	0,214
RTA		0,345
RTV	61,25	0,308
RTA		0,222
RDV		0,205



**Comentário:**  
**Equipamento:** PDCGMMIME1 Mancal Externo  
**PDCG-M**  
**Demonstrando:** Desbalanceamento admissível  
**Ação Corretiva:** Recomendo acompanhar as próximas medições para verificação dos valores vibracionais.  
 - Outros pontos com a mesma anomalia.

Ponto	Hz	Valor mm/s
RTH	62,50	0,506
RDH		0,323
RTV		0,287
RDA		0,220
RTA	61,25	0,450
RDV	63,75	0,378
RTA	7,50	0,380
RDV		0,121

## ANEXO B\_1 – Relatório da Análise Termográfica do PDCG-M e do Circuito

<b>ARNES PREDITIVA &amp; TREINAMENTO</b>	CNPJ 19.626.318/0001-00	I E 635.735.971.118
Rua Pindorama, 17 – Bairro Jordanópolis - São Bernardo do Campo São Paulo		
CEP 09892-120	Cel.: (11) 9 9885-3550 (Vivo)	
Fone e Fax: ++ (11) 4330-9708	Email <a href="mailto:sergiosebra@uol.com.br">sergiosebra@uol.com.br</a>	

## Relatório de Anomalias

### Análise Termográfica

Data  
05/2018

*FATEC – Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo*      *CEP 01124-060*  
*End: Pç. Cel. Fernando Prestes, 30 -Bairro Bom Retiro - São Paulo*      *SP*  
*Resp.: Prof. Silvestre Neto*      *- Lab. CMPI -*      *Tel: 11 3322-2226*

Ref.: Maio de 2018

Próxima Medição  
Indeterminado

Analista: Eng. Sérgio A. Senra  
Arnes Preditiva & Treinamento

<b>ARNES PREDITIVA &amp; TREINAMENTO</b>	CNPJ 19.626.318/0001-00	I E 635.735.971.118
Rua Pindorama, 17 – Bairro Jordanópolis - São Bernardo do Campo São Paulo		
CEP 09892-120	Cel.: (11) 9 9885-3550 (Vivo)	
Fone e Fax: ++ (11) 4330-9708	Email <a href="mailto:sergiosebra@uol.com.br">sergiosebra@uol.com.br</a>	

#### OBJETIVOS DA TERMOGRAFIA

Técnica de sensoriamento remoto que possibilita a medição da radiação (Termo visores não medem temperatura e sim radiação) e a formação de imagens térmicas, denominadas de Termogramas, de um componente, equipamento ou processo a partir da radiação infravermelha, naturalmente emitida pelos corpos.

Auxilia na detecção precoce de problemas elétricos como: mau contato, superaquecimento entre partes oxidadas ou não, fugas de correntes em contatores, disjuntores, bases de fusíveis, chaves trifásicas, condutores, transformadores, quadros de distribuição em média, baixa e alta tensão, réguas de bornes, cabos, induções, dentre outros.

#### DADOS TÉCNICOS DO TERMOVISOR UTILIZADO NAS INSPEÇÕES

##### Apresentação do InfraCAM

###### Características Gerais:



Faixas de medição: -20°C -> 350°C  
 Resolução Térmica: 0,20°C a 25°C  
 Detector de Matriz de Plano Focal:  
120x120 pixels  
 Faixa espectral: 7,5 a 13 microns  
 Frequência de imagens: 9 Hz  
 Memória de imagens: 50 imagens  
 Peso: 0,56 kg  
 Isolamento: IP54, EC359  
 Choque: 25G, IEC 66-2-29  
 Vibração: 2G, IEC 66-2-6

Certificado de Calibração:  
Modelo Aparelho FLIR E6 - Série nº 63901812  
Site: FLIR Systems OU, Estonia - 12/2013

## ANEXO B\_2 – Classificação dos tipos de intervenções - Análise Termográfica

<b>ARNES PREDITIVA &amp; TREINAMENTO</b>	CNPJ 19.626.318/0001-00	IE 635.735.971.118
Rua Pindorama, 17 – Bairro Jordanópolis - São Bernardo do Campo São Paulo		
CEP 09892-120	Cel.: (11) 9 9885-3550 (Vivo)	
Fone e Fax: ++ (11) 4330-9708	Email <a href="mailto:sergiosebra@uol.com.br">sergiosebra@uol.com.br</a>	

## CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE INTERVENÇÕES

**T<sub>m</sub>** = Temp. Máx. Admissível p/ componente com 100 % de Carga

**T<sub>a</sub>** = Temperatura ambiente ou local

Aquecimento para 100% de Carga	Diagnóstico	Tipo de Intervenção
Acima de 0,9 T <sub>m</sub>	Severamente Aquecido	Manutenção Imediata
0,6 a 0,9 de T <sub>m</sub>	Aquecido	Manutenção Programada
0,3 a 0,6 de T <sub>m</sub>	Normal	Acompanhar Coletas
Abaixo de 0,3 T <sub>m</sub>	Abaixo do Limite	

A Legenda (tabela de abreviações) acompanha cada equipamento inspecionado, através de cores padronizadas:

	Severamente Aquecido
	Aquecido
	Normal
	Não Inspeccionado
	Temperaturas Abaixo do Limite

<b>ARNES PREDITIVA &amp; TREINAMENTO</b>	CNPJ 19.626.318/0001-00	IE 635.735.971.118
Rua Pindorama, 17 – Bairro Jordanópolis - São Bernardo do Campo São Paulo		
CEP 09892-120	Cel.: (11) 9 9885-3550 (Vivo)	
Fone e Fax: ++ (11) 4330-9708	Email <a href="mailto:sergiosebra@uol.com.br">sergiosebra@uol.com.br</a>	

## ORIENTAÇÕES

As solicitações para intervenção imediata ou programada estão contidas no Relatório de Anomalias Detectadas (**RAD**), ilustradas por fotos das partes onde os termogramas foram coletados, indicados por uma seta, no ponto problemático e também qual ou quais fases encontram-se severamente aquecidas (Fase **R**, Fase **S**, Fase **T** – nessa ordem, da esquerda para a direita).

A Arnes Preditiva & Treinamento, por questões de segurança, não utiliza qualquer tipo de marcadores, quer seja etiquetas auto adesivas coladas nos painéis, quadros de distribuição, fusíveis, contadores ou qualquer outro componente, evitando assim choques ou descargas elétricas acidentais.

Portanto, as marcações são feitas somente nos relatórios através de indicadores (setas) nos componentes apresentados pelos termogramas coletados em campo.

Eng. Sérgio A. Senra

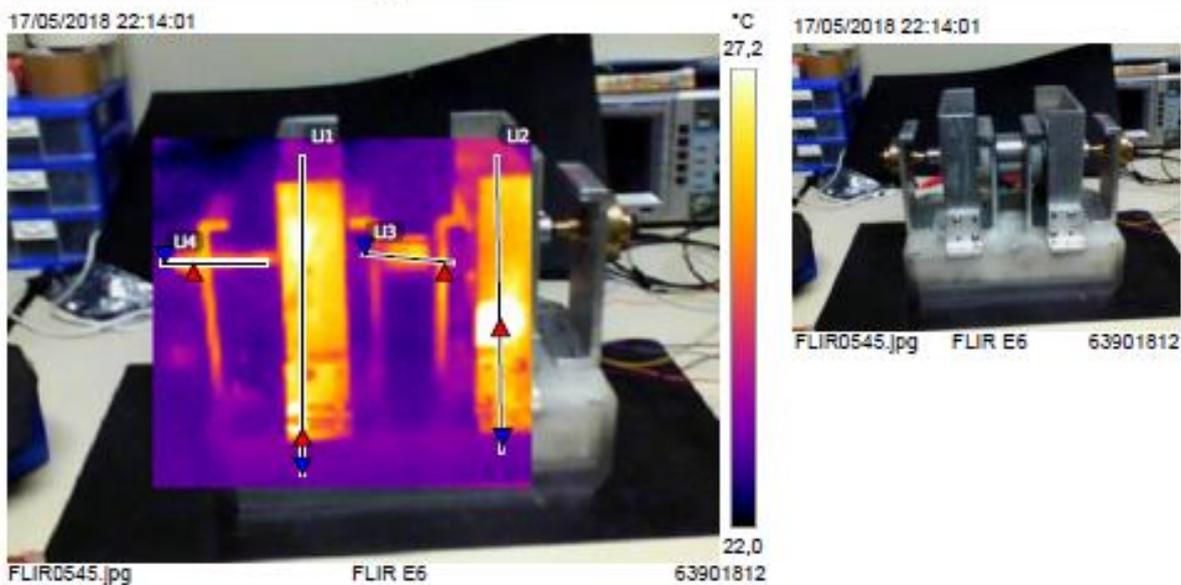


Analista: Arnes Preditiva & Treinamento  
CREA 0600403400

## ANEXO B\_3 – Relatório da Análise Termográfica do PDCG-M



ARNES PREDITIVA & TREINAMENTO  
Rua Pindorama,17 SBC SP CEP 09892-120  
Fone: (11) 4330-9708 Cel.: (11) 9 9885-3550 (Vivo)



Measurements		°C
LI1	Max	28,1
	Min	23,0
	Average	25,8
LI2	Max	30,3
	Min	23,0
	Average	26,1
LI3	Max	26,2
	Min	23,2
	Average	24,9
LI4	Max	26,2
	Min	23,1
	Average	24,9
Parameters		
Emissivity		0.95
Ref. temp.		20 °C

Ciente:

FATEC – Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo  
End: Pç. Cel. Fernando Prestes, 30 -Bairro Bom Retiro  
- São Paulo SP CEP 01124-060 Data - 22/05/2018

Resp.: Prof. Silvestre Neto - Lab. CMPI - Tel: 11 3322-2226  
Contato: - Prestador da Informação - Prof. Silvestre Neto  
Analista - Eng. Sérgio A. Senra  
- Firma Arnes Preditiva & Treinamento

Descrição: - Protótipo PDCG M  
Maior aquecimento no suporte do Mancal Interno RT.

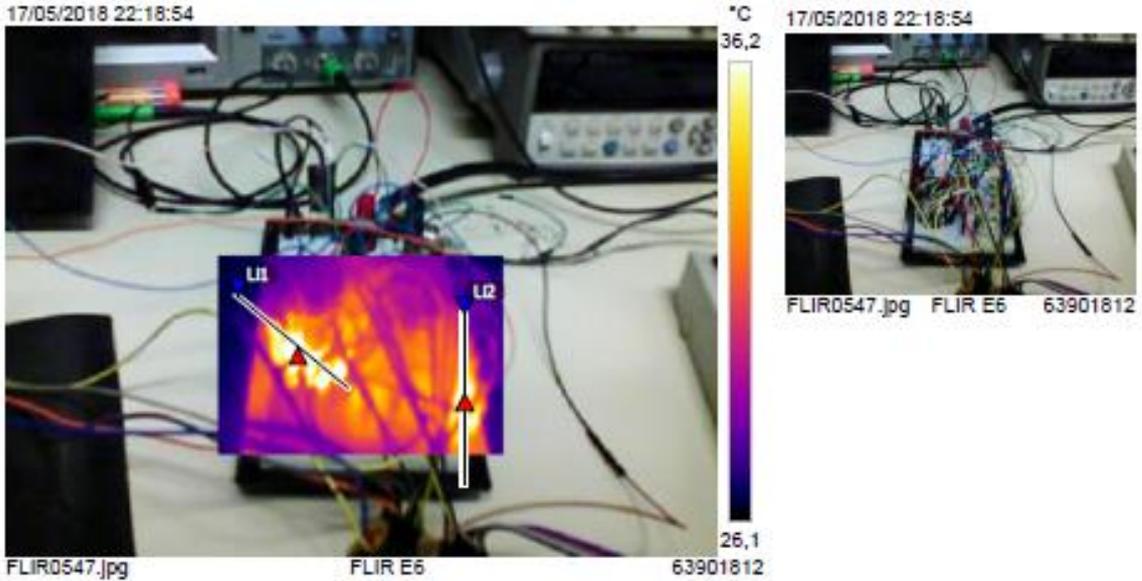
Ação Corretiva: Acompanhar as próximas medições.  
Trata-se de uma refração. Portanto é um registro falso.

Conforme norma MIL- STD 2194 (SH)  
falha provável 25° C ↔ Ac < 40° C  
Certificado de Calibração:  
Modelo Aparelho FLIR E6 - Série nº 63901812

ANEXO B\_4 – Relatório da Análise Termográfica do Circuito do PDCG-M



ARNES PREDITIVA & TREINAMENTO  
 Rua Pindorama,17 SBC SP CEP 09892-120  
 Fone: (11) 4330-9708 Cel.: (11) 9 9885-3550 (Vivo)



Measurements		°C
LI1	Max	40,2
	Min	26,5
	Average	33,9
LI2	Max	37,2
	Min	29,6
	Average	33,3

Parameters	
Emissivity	0.95
Ref. temp.	20 °C

Cliente:

FATEC – Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo  
 End: Pç. Cel. Fernando Prestes, 30 -Bairro Bom Retiro  
 - São Paulo SP CEP 01124-060 Data - 22/05/2018

Resp.: Prof. Silvestre Neto - Lab. CMPI - Tel: 11 3322-2226  
 Contato: - Prestador da Informação - Prof. Silvestre Neto  
 Analista - Eng. Sérgio A. Senra

- Firma Arnes Preditiva & Treinamento

Descrição: - Protótipo PDCG M  
 Maior aquecimento na placa mãe do circuito eletrônico.

Ação Corretiva: Acompanhar as próximas medições.

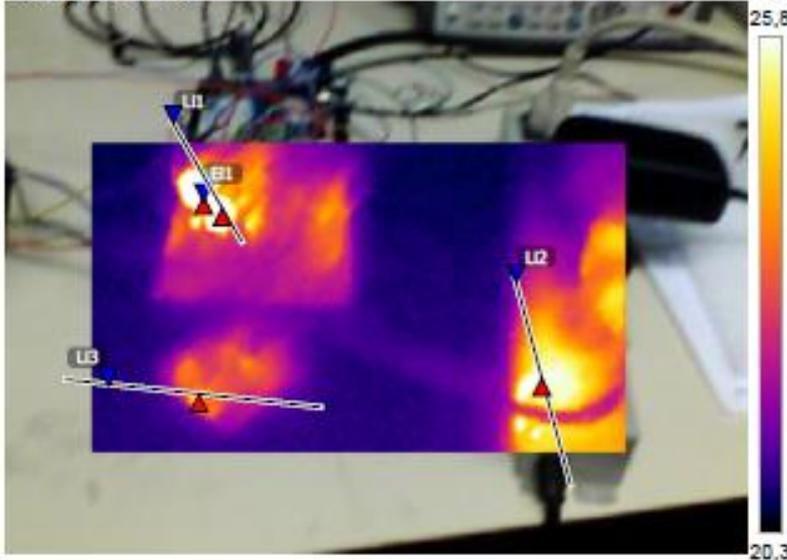
Conforme norma MIL- STD 2194 (SH)  
 falha provável 25° C <= Ac < 40° C  
 Certificado de Calibração:  
 Modelo Aparelho FLIR E6 - Série nº 63901812

ANEXO B\_5 – Relatório da Análise Termográfica do Circuito PDCG-M

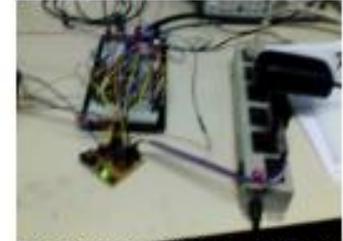


**ARNES PREDITIVA & TREINAMENTO**  
 Rua Pindorama,17 SBC SP CEP 09892-120  
 Fone: (11) 4330-9708 Cel.: (11) 9 9885-3550 (Vivo)

22/05/2018 16:25:25



22/05/2018 16:25:25



FLIR0557.jpg FLIR E6 63901812

FLIR0557.jpg

FLIR E6

63901812

Measurements		°C
E1	Max	34,3
	Min	32,9
	Average	33,6
L1	Max	40,8
	Min	20,5
	Average	25,4
L2	Max	25,7
	Min	21,5
	Average	24,0
L3	Max	24,4
	Min	20,7
	Average	21,7

Parameters	
Emissivity	0.95
Ref. temp.	20 °C

Ciente:

FATEC – Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo  
 End: Pç. Cel. Fernando Prestes, 30 -Bairro Bom Retiro  
 - São Paulo SP CEP 01124-060 Data - 22/05/2018

Resp.: Prof. Silvestre Neto - Lab. CMPI - Tel: 11 3322-2226  
 Contato: - Prestador da Informação - Prof. Silvestre Neto  
 Analista - Eng. Sérgio A. Senra  
 - Firma Arnes Preditiva & Treinamento

Descrição: - Protótipo PDCG M  
 Maior aquecimento na placa mãe do circuito eletrônico.

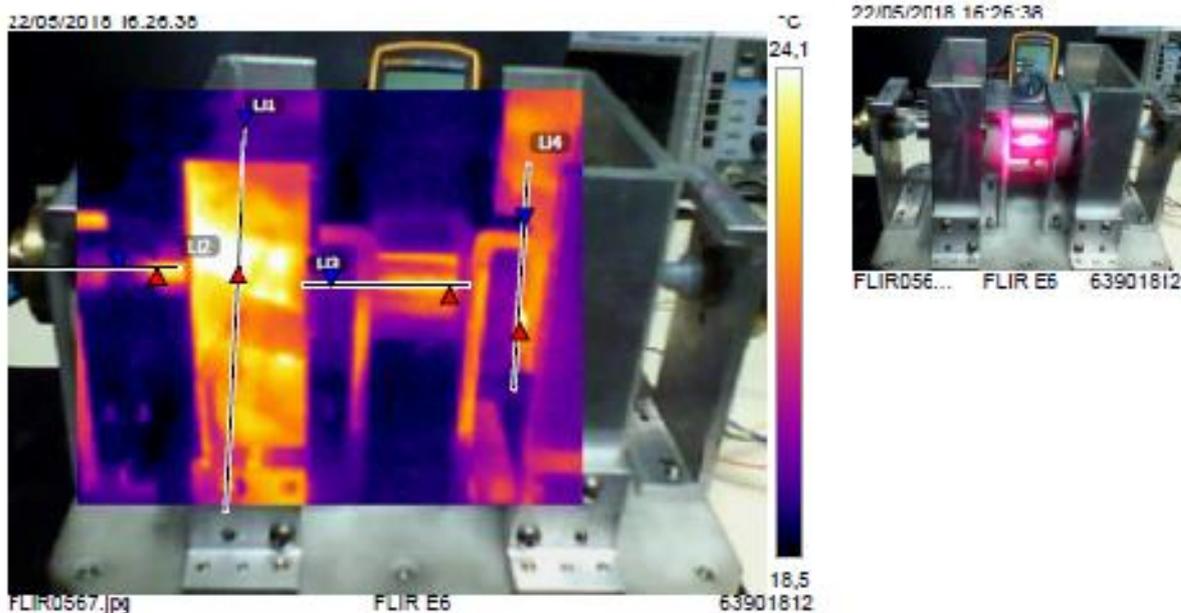
Ação Corretiva: Acompanhar as próximas medições.

Conforme norma MIL- STD 2194 (SH)  
 falha provável 25° C <- Ac < 40° C  
 Certificado de Calibração:  
 Modelo Aparelho FLIR E6 - Série nº 63901812

ANEXO B\_6 – Relatório da Análise Termográfica do PDCG-M



ARNES PREDITIVA & TREINAMENTO  
 ARNES PREDITIVA & TREINAMENTO  
 Rua Pindorama,17 SBC SP CEP 09892-120  
 Fone: (11) 4330-9708 Cel.: (11) 9 9885-3550 (Vivo)



Measurements		°C
LI1	Max	24,1
	Min	19,4
	Average	22,2
LI2	Max	23,8
	Min	19,3
	Average	21,2
LI3	Max	23,2
	Min	19,5
	Average	21,4
LI4	Max	25,4
	Min	19,1
	Average	21,3
Parameters		
Emissivity		0.95
Ref. temp.		20 °C

Ciente:

FATEC - Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo  
 End: Pç. Cel. Fernando Prestes, 30 -Bairro Bom Retiro  
 - São Paulo SP CEP 01124-060 Data - 22/05/2018

Resp.: Prof. Silvestre Neto - Lab. CMPI - Tel: 11 3322-2226  
 Contato: - Prestador da Informação - Prof. Silvestre Neto  
 Analista - Eng. Sérgio A. Serra  
 - Firma Arnes Preditiva & Treinamento

Descrição: - Protótipo PDCG M  
 Maior aquecimento no suporte do Mancal interno RD.

Ação Corretiva: Acompanhar as próximas medições.  
 Trata-se de uma refração. Portanto é um registro falso.

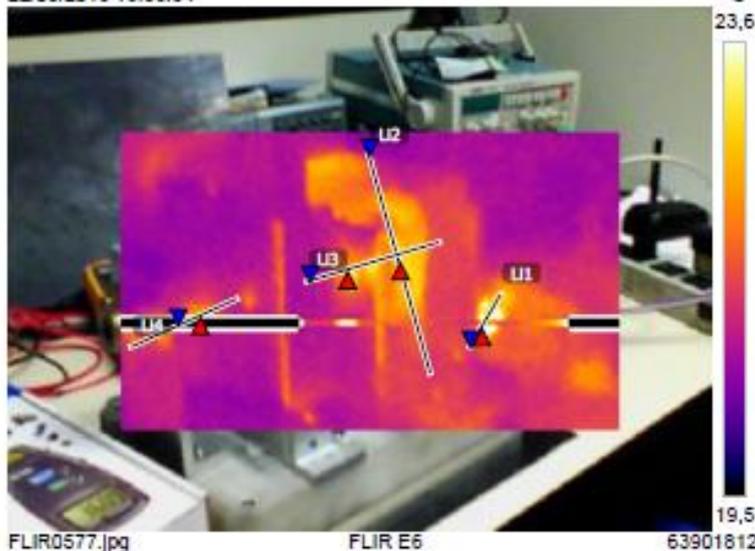
Conforme norma MIL- STD 2194 (SH)  
 falha provável 25° C <- Ac < 40° C  
 Certificado de Calibração:  
 Modelo Aparelho FLIR E6 - Série nº 63901812

## ANEXO B\_7 – Relatório da Análise Termográfica do PDCG-M

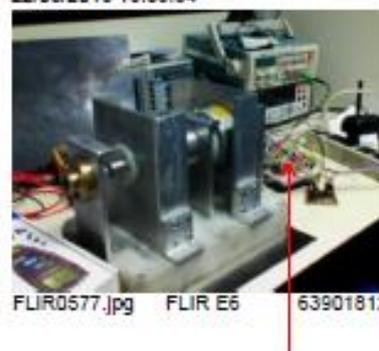


ARNES PREDITIVA & TREINAMENTO  
Rua Pindorama,17 SBC SP CEP 09892-120  
Fone: (11) 4330-9708 Cel.: (11) 9 9885-3550 (Vivo)

22/05/2018 16:56:34



22/05/2018 16:56:34



Measurements		°C
LI1	Max	24,5
	Min	21,3
	Average	22,7
LI2	Max	22,8
	Min	20,9
	Average	22,0
LI3	Max	23,0
	Min	20,8
	Average	22,1
LI4	Max	30,8
	Min	-40,0
	Average	11,5

Parameters	
Emissivity	0.95
Ref. temp.	20 °C

## Cliente:

FATEC – Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo  
End: Pç. Cel. Fernando Prestes, 30 -Bairro Bom Retiro  
- São Paulo SP CEP 01124-060 Data - 22/05/2018

Resp.: Prof. Silvestre Neto - Lab. CMPI - Tel: 11 3322-2226  
Contato: - Prestador da Informação - Prof. Silvestre Neto  
Analista - Eng. Sérgio A. Senra  
- Firma Arnes Preditiva & Treinamento

Descrição: - Protótipo PDCG M  
Malor aquecimento na placa mãe do circuito eletrônico.

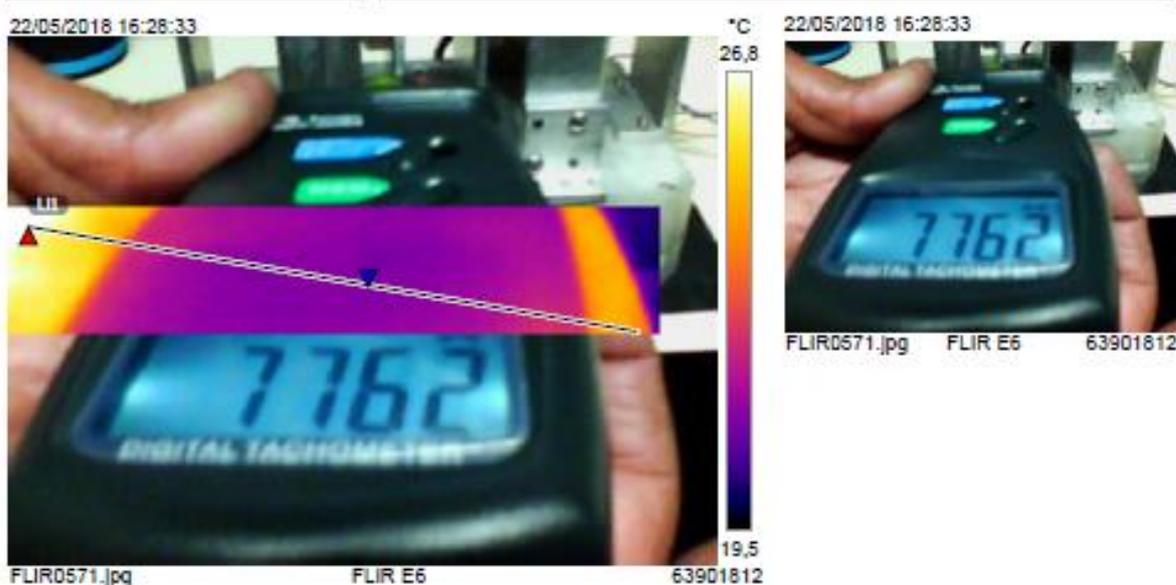
Ação Corretiva: Acompanhar as próximas medições.

Conforme norma MIL- STD 2194 (SH)  
falha provável 25° C <= Ac < 40° C  
Certificado de Calibração:  
Modelo Aparelho FLIR E6 - Série nº 63901812

## ANEXO B\_8 – Relatório da Análise Termográfica do Tacômetro



ARNES PREDITIVA & TREINAMENTO  
Rua Pindorama,17 SBC SP CEP 09892-120  
Fone: (11) 4330-9708 Cel.: (11) 9 9885-3550 (Vivo)



Measurements		°C
LI1	Max	26,9
	Min	21,2
	Average	22,6

Parameters	
Emissivity	0.95
Ref. temp.	20 °C

## Cliente:

FATEC – Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo  
End: Pç. Cel. Fernando Prestes, 30 -Bairro Bom Retiro  
- São Paulo SP CEP 01124-060  
Resp.: Prof. Silvestre Neto - Lab. CMPI - Tel: 11 3322-2226

Contato: - Prestador da Informação - Prof. Silvestre Neto  
Analista - Eng. Sérgio A. Senra  
- Firma Arnes Preditiva & Treinamento

Descrição: - TACÔMETRO 7762 RPM

Ação Corretiva:Ensaio

Conforme norma MIL- STD 2194 (SH)  
falha provável 25° C ↔ Ac < 40° C  
Certificado de Calibração:  
Modelo Aparelho FLIR E6 - Série nº 63901812