

DIRETRIZES PARA O PROJETO DO CALIBRADOR DO DETECTOR MARIO SCHENBERG: O SISTEMA DE MANCAIS

DESIGN GUIDELINES FOR THE MARIO SCHENBERG DETECTOR CALIBRATOR: THE BEARING SYSTEM

Data de entrega dos originais à redação em: 25/11/2015
e recebido para diagramação em: 16/06/2016.

Paulo Fernandes Junior¹
Carlos Frajuca²
Oswaldo Horikawa³

Este trabalho apresenta diretrizes para o projeto do calibrador do detector de ondas gravitacionais "Mario Schenberg", com foco no sistema de mancais. Esse dispositivo deverá fazer girar dois objetos a uma rotação de 96.000 rpm e, portanto, se enquadra na classe das máquinas de alta velocidade. As diretrizes e soluções propostas neste trabalho constituem uma contribuição para essa classe de problemas de Engenharia e foram fundamentadas em ampla pesquisa na literatura, contatos com especialistas, na experiência dos orientadores e do autor, bem como em resultados experimentais. Foi proposto um mancal híbrido composto por um mancal radial magnético passivo combinado com um mancal axial de escora, aqui denominado MPS (Magnetic Passive and Sliding). Um protótipo físico reduzido foi construído e ensaiado. Embora o protótipo tenha sido testado em velocidades inferiores a 12.000 rpm, as diretrizes propostas foram parcialmente validadas.

Palavras-chave: Ondas Gravitacionais. Calibrador. Detector. Mario Schenberg. Gráviton. Máquina de Alta Velocidade. Mancais Magnético Passivo. Híbrido. Mancais Escora. Rotores.

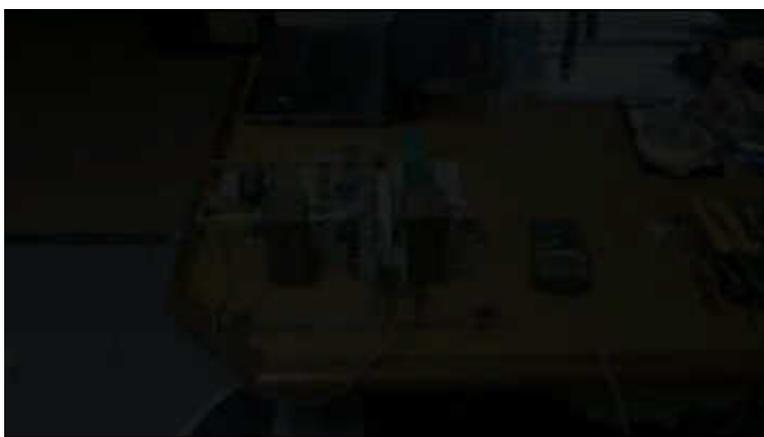
This paper presents design guidelines for the "Mario Schenberg" gravitational waves detector calibrator, focused on the bearing system. This device must symmetrically rotate two objects, with mass and at a radius as large as possible, at a speed of 96,000 rpm, and therefore falls into the high-speed machines category. The guidelines and solutions proposed in this paper constitute a contribution to this class of engineering problems and were based on an extensive literature search, contacts with experts, the tutor's and author's experience, as well as on experimental results. A hybrid bearing that combines a radial passive magnetic bearing with an axial sliding bearing, here called MPS (Magnetic Passive and Sliding), was proposed. A reduced physical prototype was built and tested. Although the prototype has been tested at speeds below 12,000 rpm, the proposed guidelines were partially validated.

Keywords: Gravitational Waves. Calibrator. Detector. Mario Schenberg. Graviton. High Rotation Machine. Passive Magnetic Bearing. Hybrid. Sliding Bearing. Rotors.

1 INTRODUÇÃO

Desde a previsão da existência de ondas gravitacionais feita por Einstein em 1916, cientistas de todo o mundo estão tentando sua detecção, ainda sem sucesso. Existem poucos detectores de ondas gravitacionais no mundo. O Brasil participa desse esforço internacional com seu detector do tipo massa ressonante denominado "Mario Schenberg", construído pelo grupo de pesquisa "Gráviton" e instalado na Universidade de São Paulo. Para realizar a calibração do detector Mario Schenberg faz-se necessário um dispositivo externo (calibrador) capaz de gerar um sinal gravitacional de maré periódico na frequência de 3200 Hz. Esse dispositivo, aqui designado pela sigla DCMS (Dispositivo para Calibração do detector

Mario Schenberg), deverá fazer girar simetricamente dois objetos iguais com a maior massa e no maior raio possíveis, numa frequência de 1.600 Hz ou 96.000 rpm



Video disponível em pdf: < <http://ojs.ifsp.edu.br> >. Testado com a última versão do Acrobat Reader 9 e Flash Player instalado.

1 - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP - Professor dos cursos de Mecânica do IFSP desde 1983 até a presente data - Especializado em Processos de Produção Mecânica - Mestrando em Engenharia Mecânica pelo IFSP - Câmpus São Paulo.

2 - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP - Doutor em Física pela Universidade de São Paulo - Professor Titular do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo.

3 - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP - Doutor em Engenharia pelo Tokyo Institute of Technology (Japão) - Livre-Docente pela Universidade de São Paulo - Professor Associado III do Departamento de Engenharia Mecatrônica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

(ANDRADE, 2006; PADOVANI, 2012; RUIZ, 2014; SANTOS, 2013). A Figura 1 apresenta um esquema básico desse dispositivo.

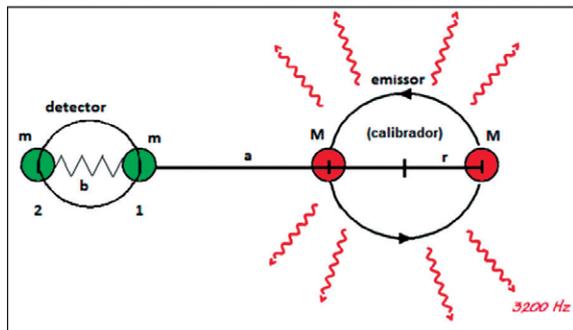


Figura 1 - Ilustração esquemática do gerador de sinais gravitacionais
Fonte: Adaptado de Padovani (2012).

O DCMS se enquadra na conhecida classe de problemas de Engenharia chamada "Máquinas Rotativas de Alta Velocidade" ou MAVs (WATSON, 1999). O projeto e a fabricação dessas máquinas trazem importantes desafios que envolvem diversas áreas da Engenharia. Segundo Choi (2015), entre esses problemas estão as perdas mecânicas, elétricas e magnéticas, as extremas tensões mecânicas oriundas das altas forças centrífugas, o aquecimento, as limitações de potência dos circuitos eletrônicos, a complexidade crescente dos algoritmos de controle e complexas questões ligadas à dinâmica dos rotores e vibrações.

O presente trabalho é parte de um estudo mais amplo que visa obter diretrizes para todo o projeto do DCMS (FERNANDES, 2015). Nesse trabalho preliminar foram abordados os principais desafios a serem vencidos para a construção de tal dispositivo. Isso envolveu estudos relativos a:

- a) **Estrutura de proteção:** Para garantir proteção contra os riscos inerentes às altas velocidades e, ao mesmo tempo, eliminar a resistência aerodinâmica foi proposta a operação do DCMS dentro de uma câmara de vácuo blindada com materiais balísticos;
- b) **Mancais:** Após criteriosos estudos comparativos entre diversos tipos de mancais apresentados na literatura, foi adotado o modelo de mancal magnético passivo híbrido de ímãs permanentes desenvolvido em Pavani (2014).
- c) **Projeto do rotor:** Para suportar a elevada carga centrífuga advinda das altas rotações, foi proposto um sistema de acionamento 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.
- d) **Acionamento:** Foi proposto o 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:** Foram propostas importantes diretrizes para evitar, ou pelo menos atenuar, as vibrações que causam instabilidades no rotor e frequentemente impedem o atingimento de altas velocidades.

A Figura 2 exibe um esboço do DCMS identificando seus principais elementos:

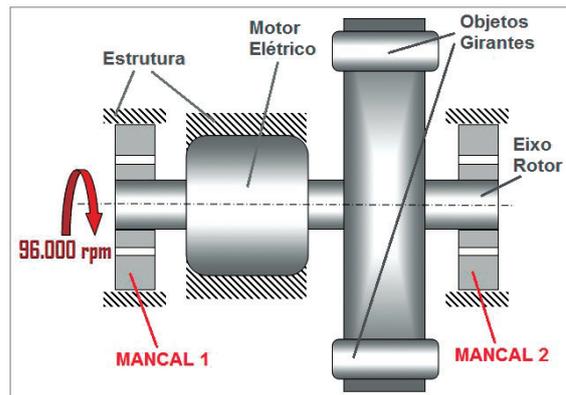


Figura 2 - Esboço prévio do DCMS

2 O MANCAL

2.1 Seleção do tipo de mancal

A seleção de mancais é geralmente focada na redução das perdas energéticas devidas ao atrito e desgaste, minimizando assim a manutenção, aumentando a vida útil e reduzindo as falhas do equipamento (HARNOY, 2003 *apud* PAVANI, 2014).

Entre os desafios mais críticos encontrados na construção do DCMS, está o desenvolvimento de um mancal resistente à altíssima rotação do DCMS, que apresente a menor perda mecânica possível e rigidez suficiente para manter a estabilidade do rotor, que seja capaz de atenuar vibrações, que apresente simplicidade construtiva e operacional, entre outras exigências.

Segundo Pereira (2005), é desejável em qualquer máquina rotativa que os mancais sejam mais flexíveis que o eixo do rotor. Os motivos para isso são:

- a) A baixa rigidez dos mancais reduz a transmissão das cargas dinâmicas para a sua fundação, prolongando a vida útil dos mancais e reduzindo as vibrações estruturais;
- b) A baixa rigidez dos mancais permite que o amortecimento opere com maior eficiência, atenuando a amplitude do rotor nas velocidades críticas.

De acordo com Borisavljevic (2011), além de operarem praticamente sem atrito, os mancais magnéticos facilitam a operação em regime supercrítico, ou seja, a velocidades extremamente elevadas, e podem se beneficiar do autobalanceamento, que é a capacidade do rotor suspenso girar em torno de seu centro de massa e não necessariamente em torno de seu centro geométrico, permitindo assim uma redução nas dimensões do rotor e o alcance de altas rotações. Whitley (1984) confirma que, para que o rotor possa se beneficiar do autobalanceamento é necessário utilizar um sistema de mancais mais flexíveis, tais como os mancais magnéticos.

Após criteriosa análise das vantagens e desvantagens apresentadas pelos diferentes tipos de mancais existentes, chegou-se à conclusão que os mancais magnéticos são os mais adequados para a alta velocidade requerida pelo DCMS.

Em Ruiz (2014) foi realizado um estudo sobre o DCMS, recomendando o uso de mancais magnéticos

passivos conjuntamente com o MRV que, segundo Lembke, 2005, traria as seguintes vantagens:

- Alta confiabilidade;
- Baixas perdas, mesmo em velocidades muito altas;
- Ausência de desgaste, uma vez que não há contato mecânico entre as partes do mancal;
- Ausência de ruídos acústicos e vibracionais;
- Maior simplicidade quando comparados aos mancais magnéticos ativos;
- Relato de mancais testados em bombas de vácuo com velocidades acima de 90000 rpm.

Os mancais magnéticos passivos (MMPs) de ímãs permanentes apresentam a mais extrema simplicidade, confiabilidade e durabilidade, não requerendo fontes de energia externa (YONNET, 1978), nem sistemas de resfriamento para seu funcionamento.

Considerando-se sua maior simplicidade, foi escolhido o MMP. Todavia, os MMPs necessitam de estabilização em pelo menos uma direção (EARNSHAW, 1842). Isso frequentemente requer o uso de complexos sistemas ativos.

2.2 O mancal MPS (Magnetic Passive and Sliding)

Pavani (2014) apresenta uma estratégia mais simples para a estabilização axial de um MMP. O MMP proposto pelos autores destina-se a aplicações onde as forças axiais são muito pequenas ou constantes, como no caso do DCMS. Esse mancal combina um MMP radial e um mancal axial de deslizamento (escora) por pivôs. O MMP radial é composto por dois pares de ímãs permanentes cilíndricos em atração axial. Em cada par, um dos ímãs é fixado na extremidade do eixo e o outro numa base fixa. O rotor é autocentrado na direção radial por ação da atração entre os ímãs de cada par. Devido à rigidez negativa na direção axial, o mancal proposto contém um espaçador (esfera de aço ou pivô de PVC) entre os ímãs. Ajustando-se adequadamente o espaçamento entre os ímãs é possível minimizar a força axial resultante das atrações dos dois mancais. Segundo relatam os autores, quanto menor for essa força resultante, menor serão as perdas por atrito e o desgaste das superfícies em contato (Figura 3).

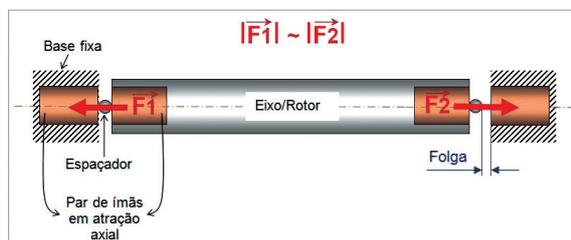


Figura 3 - Equilíbrio das forças axiais e folga dos mancais MPS

Esse mancal, aqui chamado de MPS (sigla em inglês de *Magnetic Passive and Sliding*), apresenta uma série de características vantajosas para o DCMS, tais como a extrema simplicidade construtiva e operacional, dimensões compactas, ausência de manutenção, baixíssimo atrito, durabilidade e confiabilidade. Diante do exposto, foi adotado esse conceito de mancal híbrido para o DCMS.

2.3 Mancais magnéticos e motores sem escovas

São amplamente conhecidas as vantagens do uso de motores elétricos sem escovas e de mancais magnéticos em altas velocidades. No entanto, a adoção conjunta dessas duas soluções implica num importante desafio. Conforme explicado em RUIZ, 2014, o entreferro rotor/estator deve ser o menor possível para assegurar a eficiência de um motor elétrico. Por outro lado, se o rotor é suspenso por um MMP radial, o rotor poderá se deslocar do seu eixo de rotação ao enfrentar vibrações e outras instabilidades (LI, 2012). Caso o entreferro seja menor que a amplitude dessas oscilações, ocorrerá o choque do rotor com o estator.

O entreferro do motor projetado em Ruiz (2014) foi especificado em 0,25 mm, no entanto a menor medida conseguida nos experimentos deste trabalho foi de 0,75 mm, devido às colisões do rotor com o estator.

2.4 Os mancais de aterrissagem

A rigidez limitada dos mancais magnéticos requer o uso de mancais auxiliares de aterrissagem destinados a conter eventuais oscilações temporárias do rotor dentro do limite estabelecido pela folga radial (Figura 4). Esses mancais podem ser construídos com rolamentos de elementos cerâmicos (híbridos). Rolamentos com gaiola não são recomendados devido à sua menor resistência aos repetidos choques com o rotor (KÄRKKÄINEN, 2007).

A Figura 4 ilustra a aplicação dos mancais de emergência.

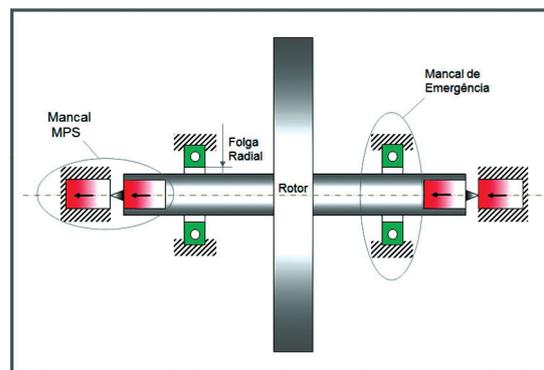


Figura 4 - Mancais de emergência de rolamentos conjuntos com os mancais MPS

Segundo Halminen et al. (2015), é recomendável que haja um bom alinhamento entre os rolamentos, pois um desalinhamento grande poderá causar graves danos aos mancais e ao rotor.

Como o DCMS deve funcionar no vácuo, os rolamentos deverão ser lubrificadas com lubrificantes sólidos como, por exemplo, aqueles feitos à base de polímeros fluorados, incluído aí o politetrafluoretileno (PTFE) conhecido comercialmente como teflon (NISHIMURA, 1999).

3 EXPERIMENTOS, RESULTADOS E DISCUSSÕES

De modo a se confirmar a viabilidade de obtenção de um DCMS com o emprego do mancal MPS acima descrito, assim como identificar os diversos problemas a serem vencidos para a obtenção do DCMS, foi construído um protótipo contendo um rotor apoiado por mancais MPS e um motor elétrico para o seu acionamento.

Nesta etapa da pesquisa, não se almejou a rotação de 96.000 rpm, especificada para o DCMS.

3.1 A construção do protótipo

A Figura 5 mostra a configuração do protótipo e seus elementos principais.

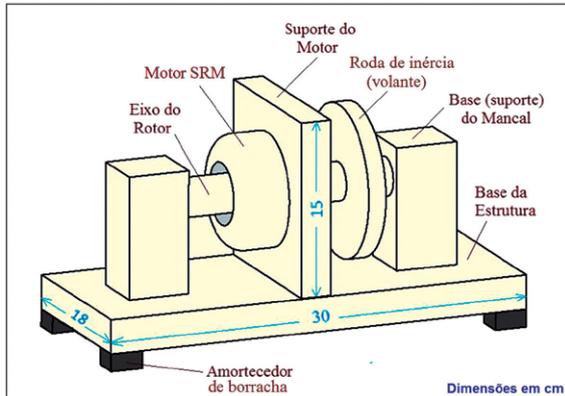


Figura 5 - Esboço do protótipo reduzido

3.1.1 Os mancais

Dois mancais MPS idênticos foram construídos com base no princípio apresentado em Pavani (2014). Cada mancal contém dois ímãs cilíndricos ($Nd_2Fe_{14}B$, $\varnothing 14 \times 14$ mm) em atração axial, e um pivô de polímero (PVC), conforme exibido na Figura 6. O dispositivo centralizador proporciona maior facilidade e rapidez na substituição dos pivôs. A Figura 7 apresenta os detalhes das bases dos mancais que permitem fácil instalação e remoção dos ímãs e ajuste da distância entre mancais, o que permite o ajuste do entreferro nos mancais. Por facilidade de construção, foram implementados em madeira.

3.1.2 O acionamento

O acionamento do rotor foi feito através de um motor do tipo relutância variável constituído por um núcleo em peça única de ferro doce, contendo 4 ressaltos, cada uma atuando como um polo magnético do motor. Para o acionamento deste núcleo, foi

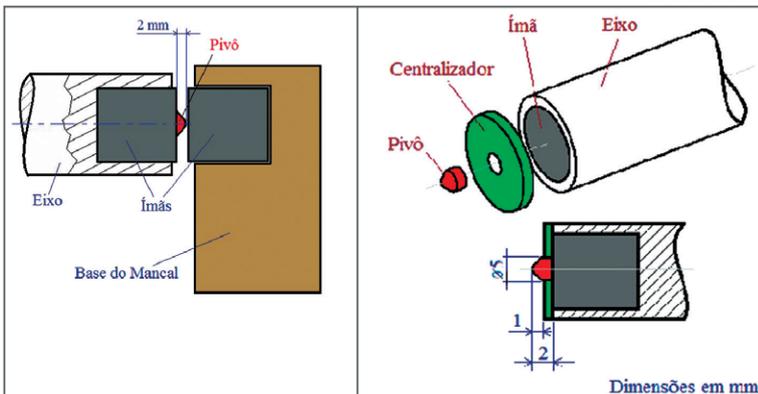


Figura 6 - Esboço do mancal híbrido construído

empregado o estator de um motor comercial de 12 polos magnéticos (bobinas). Essas 12 bobinas foram interligadas de modo a compor 3 fases de 4 bobinas. As fases do estator são energizadas sequencialmente, com base em sinais gerados por fotodetectores

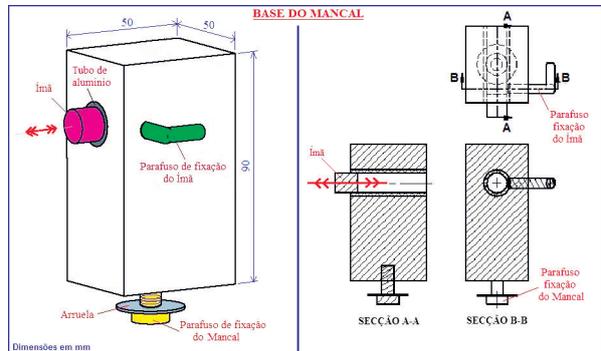


Figura 7 - Configuração projetada para as bases dos mancais

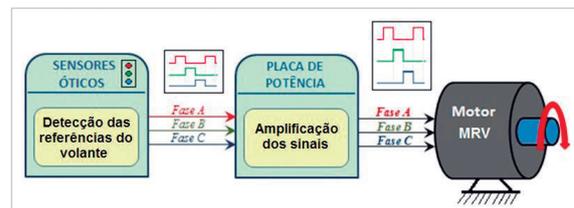


Figura 8 - Esquema do circuito de acionamento

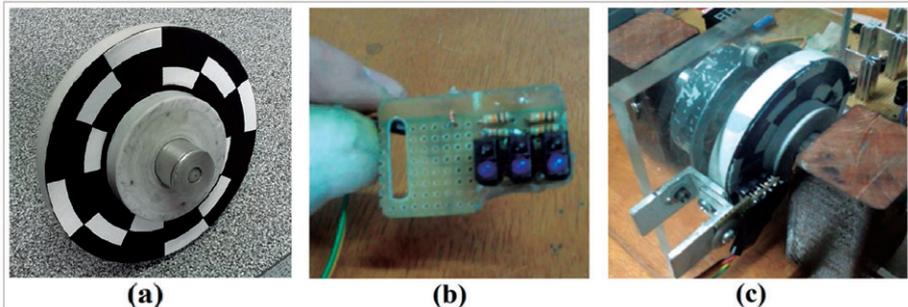


Figura 9 - Sistema sensoriado de sincronismo. (a) Volante com 12 referências; (b) Fotodetectores óticos; (c) Sistema montado no protótipo

do tipo reflexivo que detectam a passagem de referências estampadas sobre a face lateral do volante. Ao detectar uma referência, o fotodetector transmite um sinal de baixa tensão à placa de potência que o envia devidamente amplificado à fase correspondente do motor, de modo sincronizado com a posição angular do rotor.

3.1.3 O rotor

O rotor do protótipo é constituído pelo eixo, o volante e o núcleo (rotor) do motor. O núcleo do motor e os dois ímãs de neodímio foram acoplados ao eixo por meio de ajuste com interferência. A Figura 10 mostra as principais dimensões e os materiais utilizados.

Em rotações especialmente elevadas, como a necessária no DCMS, é preciso uma série de considerações para que a

roda de inércia (volante) não se desintegre devido a elevadas forças centrífugas. Os estudos a este respeito serão apresentados em trabalho posterior. Conforme já mencionado, neste trabalho não será considerada uma rotação especialmente elevada e, portanto, é empregada uma simples roda em material polimérico.

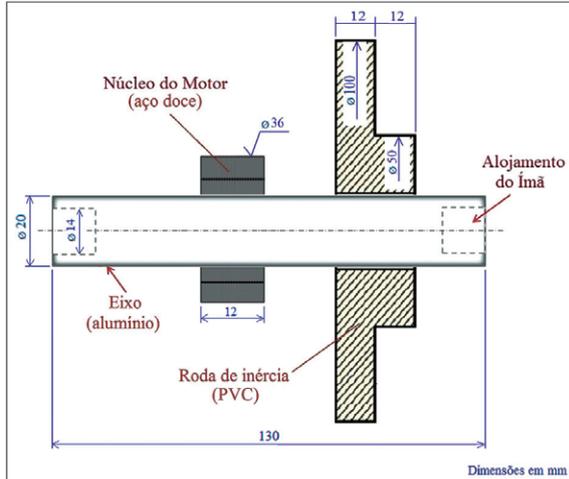


Figura 10 - Esboço do conjunto do rotor

A Figura 11 mostra a bancada de testes com o conjunto do protótipo montado.

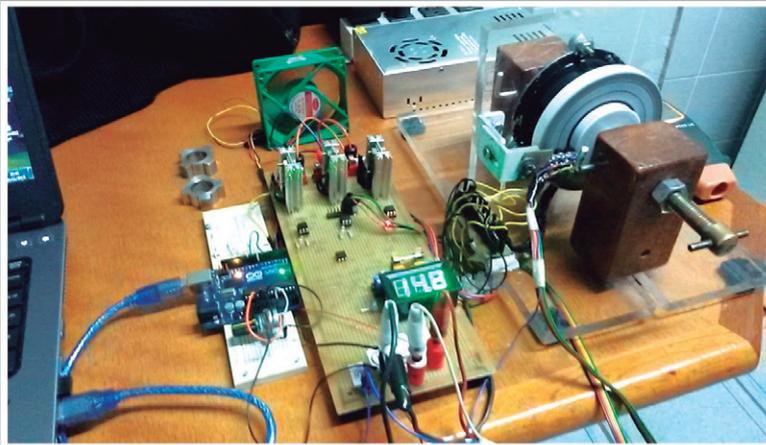


Figura 11 - Fotografia do arranjo experimental

3.2 Experimentos, resultados e discussões

Neste item serão apresentados os principais experimentos realizados no protótipo e as conclusões obtidas. Os experimentos foram conduzidos somente pelo uso de um tacômetro digital a laser. Outros aspectos como vibrações do rotor foram somente observados visualmente.

No primeiro acionamento do protótipo foi possível atingir apenas 2.200 rpm, devido à amplitude das oscilações cilíndricas/cônicas que desestabilizavam o rotor. Constatou-se que essas vibrações foram causadas por desbalanceamento e outras imprecisões na fabricação do rotor. Parte desses problemas foi resolvido com um rotor mais preciso.

O desempenho do protótipo melhorou sensivelmente ao se minimizar a folga nos mancais.

O mesmo foi observado com o rotor em posições não horizontais, porém nesse caso houve a necessidade de se compensar o peso próprio do rotor por meio de ajustes no entreferro dos mancais. A Figura 12 exibe as forças magnéticas e o peso próprio do rotor para o equilíbrio axial do rotor na horizontal e na vertical.

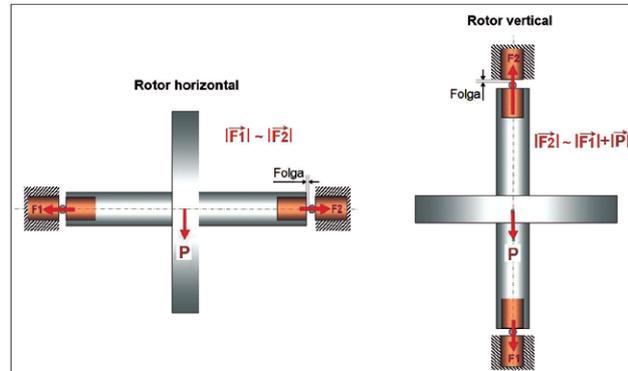


Figura 12 - Equilíbrio das forças axiais sobre o rotor

Com o ajuste dessa folga para um valor mínimo e outros ajustes, foi possível alcançar rotações mais altas.

Esse resultado experimental foi concordante com a afirmação feita em Pavani (2014): "Quanto menor for essa força resultante menor será o atrito e o desgaste das superfícies em contato".

São apresentados a seguir os principais experimentos diretamente relacionados com os mancais.

3.2.1 Testes de novos materiais para os pivôs

No intuito de investigar o desempenho de outros materiais para os pivôs, foram testados 5 diferentes polímeros (Nylon, Poliacetal, Teflon, PVC e borracha dura). Primeiramente os 5 pivôs foram testados quanto à rotação máxima atingida. Posteriormente foram submetidos à rotação de 2.000 rpm por duas horas, todos sob iguais condições. Os desgastes foram avaliados com o auxílio de um projetor de perfis. Os resultados estão expostos na Tabela 1.

Tabela 1 - Desempenho dos diferentes polímeros usados como pivôs

Polímero	Rotação máxima (rpm)	Desgaste (mm) 2.000 rpm/120 min
PVC	2.7	0,05
Nylon 6	2.95	0,03
Teflon	2.8	0,10
Borracha	2.6	0,05
Poliacetal	2.7	0,07

No caso específico do Teflon, o desgaste foi devido, aparentemente, mais à deformação permanente do que à fricção com a superfície do ímã. A Figura 13 mostra imagens obtidas da tela do projetor de perfis.

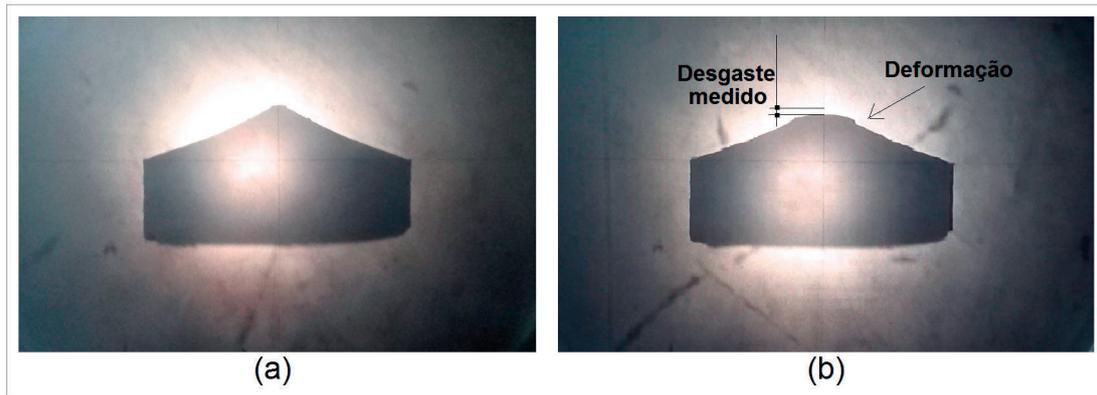


Figura 13 - Imagens obtidas no projetor de perfis. (a) Pivô antes do ensaio; (b) Pivô depois do ensaio

Diante dos resultados obtidos, foi adotado o Nylon 6 como material dos pivôs.

A lubrificação dos pivôs com grafite em pó permitiu um incremento médio de 10% velocidade de rotação.

3.2.2 Entreferro mínimo rotor/estator

Visando descobrir o menor entreferro possível, foram realizados alguns experimentos com núcleos de motor de diferentes diâmetros.

O entreferro mínimo que ainda permitiu rotação sem que houvesse contato físico do rotor com o estator foi de 0,75 mm.

3.2.3 O dispositivo magnético equilibrador

Foi desenvolvido um dispositivo para equilibrar mais precisamente as forças axiais sobre o rotor. Esse dispositivo foi constituído por um ímã cilíndrico colado na ponta de um parafuso. Girando-se o parafuso, esse ímã se aproxima (ou se distancia) do ímã do mancal, proporcionando assim um ajuste fino da força magnética exercida por esse mancal (Figura 13).

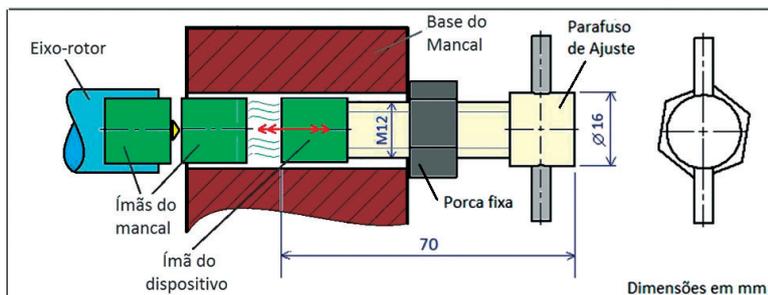


Figura 14 - Esboço do Dispositivo Magnético Equilibrador

Com esse dispositivo relativamente simples foi obtido um aumento de 15% na rotação. Além desse benefício, foi possível “contornar” as instabilidades do rotor nas rotações críticas, ou seja, quando a frequência de rotação coincide com a frequência natural de ressonância do sistema composto pela massa do rotor e a rigidez do mancal. Ao se variar o campo magnético do mancal altera-se também a frequência natural do sistema rotor-mancal. Durante o experimento, bastou girar ligeiramente o parafuso ao se aproximar de uma rotação crítica, para “contornar” as vibrações ressonantes.

3.2.4 Outras constatações importantes

Em todos os experimentos realizados neste trabalho, observou-se uma interação magnética indesejável entre os ímãs dos mancais e o material ferromagnético do rotor/estator, que causou instabilidades no rotor. Embora o posicionamento do motor mais próximo do ponto central entre os mancais tenha proporcionado uma significativa melhora, ainda assim observou-se a influência negativa dessas forças magnéticas desestabilizadoras.

Após cerca de 10 horas submetidos a experimentos em diferentes rotações e condições de carregamento, os pivôs apresentaram um desgaste extremamente pequeno, menor que 0,1 mm. Não foi percebida qualquer influência desse desgaste no desempenho do sistema.

Foi observado o fenômeno do autobalanceamento quando, em rotações mais altas, o rotor saía do seu eixo geométrico de rotação e passava a girar em torno do seu eixo de inércia. Foi perceptível uma significativa redução na amplitude das vibrações, com o rotor passando a girar mais suavemente. Confirmou-se

experimentalmente essa vantagem dos mancais magnéticos.

A rotação máxima alcançada nos experimentos foi de 11.700 rpm. Nos primeiros ensaios, o aumento da rotação foi limitado por vibrações e instabilidades do rotor. Posteriormente, o fator limitador foi a potência requerida do motor para vencer o grande entreferro que teve que ser ajustado no motor MRV

visando evitar choques entre rotor e estator. Isso indicou a necessidade de se aperfeiçoar as estratégias para atenuar as oscilações do rotor, e aumentar a rigidez dos mancais. O aumento da rigidez pode ser facilmente conseguido de várias formas como, por exemplo, com ímãs maiores e/ou menores espaços entre eles (pivôs mais curtos). Um motor mais potente também é requerido.

4 CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho é parte de um estudo que objetiva obter diretrizes para o projeto do DCMS. Nesse estudo

mais amplo foram tratados desafios relativos à estrutura de proteção, aos mancais, ao projeto do rotor, ao acionamento e aspectos envolvendo a dinâmica do rotor. O presente trabalho teve seu foco voltado aos mancais.

Considerando as características vantajosas tais como a simplicidade extrema, o tamanho compacto, a ausência de manutenção, o baixíssimo atrito e a confiabilidade, e a perfeita adequação ao DCMS, o modelo de mancal magnético híbrido apresentado em Pavani (2014) foi adotado neste trabalho.

Foi construído um protótipo físico em escala reduzida e o desempenho do mancal foi investigado experimentalmente. Foram investigados novos materiais para os pivôs e o melhor resultado foi obtido com o nylon 6. Foi desenvolvido com sucesso um dispositivo magnético para equilibrar com precisão as forças de atração dos 2 mancais. Essas duas soluções, aliadas ao ajuste de uma folga mínima nos mancais, proporcionaram atrito e desgaste baixíssimos. A lubrificação com grafite em pó melhorou o desempenho. Apesar de limitada, a rigidez radial desse mancal magnético se mostrou suficiente para manter a estabilidade do rotor.

Esse modelo de mancal se mostrou bastante promissor para o DCMS. Mesmo utilizando-se um protótipo reduzido e relativamente simples, foram alcançadas rotações próximas de 12.000 rpm. Certamente poderão ser alcançadas rotações muito mais altas com um protótipo de maiores dimensões, fabricado com elementos mais rígidos e precisos e materiais mais avançados, sendo acionado por um motor mais potente controlado por um sistema digital/eletrônico mais avançado. A obtenção de velocidades mais próximas às exigidas para o DCMS (96.000 rpm) requer mais estudos não somente sobre os mancais mas sobre todo o conjunto do DCMS. Atingindo rotações maiores, passam a ser mais relevantes os estudos realizados no trabalho maior: projeto do rotor para resistir aos esforços centrífugos, a dinâmica dos rotores, projeto da estrutura, etc. Esses estudos serão apresentados em artigos posteriores.

A seguir são apresentadas, de forma consolidada, as principais diretrizes e recomendações para o sistema de mancais do DCMS:

- ✓ O mancal deve ser do tipo magnético, preferencialmente passivo. Neste trabalho foi testado com sucesso o modelo de mancais magnéticos passivos híbridos de ímãs permanentes (MPS) apresentado em Pavani (2014).
- ✓ Recomenda-se o Nylon6 como material dos pivôs.
- ✓ Deve-se ajustar uma folga (entreferro) menor possível nos mancais.
- ✓ A lubrificação com grafite em pó melhora o desempenho tribológico dos mancais.
- ✓ Visando minimizar as interações magnéticas dos mancais com outros componentes ferromagnéticos do DCMS, é recomendável o fechamento (blindagem) dos circuitos magnéticos dos ímãs. Esse fechamento deverá proporcionar também uma elevação da rigidez dos mancais.
- ✓ É importante o ajuste fino do equilíbrio das forças magnéticas dos mancais, o que pode

ser conseguido com um dispositivo similar ao apresentado neste trabalho. Esse dispositivo pode ser utilizado também como estratégia para evitar a passagem por rotações críticas.

- ✓ Caso se projete um rotor que opere em posição diferente da horizontal, as forças magnéticas atrativas do mancal MPS devem ser ajustadas de forma a compensar a ação do peso próprio do rotor.
- ✓ Devem ser adotadas estratégias visando a minimização de vibrações e instabilidades do rotor.
- ✓ Se necessário, pode ser adotado algum sistema de amortecimento externo.
- ✓ Como medida de precaução, os mancais magnéticos requerem o uso de mancais de aterrissagem. Recomenda-se o alinhamento preciso entre esses mancais auxiliares.

Finalmente, considera-se que a proposta de mancal aqui apresentada foi validada, ainda que parcialmente para rotações até 12.000 rpm.

Embora motivado pela necessidade de se construir o DCMS, acredita-se que o presente trabalho representa uma contribuição mais ampla para a Engenharia Mecânica, devido às muitas aplicações atuais que envolvem massas girando a elevadas rotações, tais como ultracentrífugas, giroscópios, turbocompressores, *flywheels*, entre tantas outras.

Seguem abaixo algumas propostas interessantes para trabalhos futuros visando o aperfeiçoamento do mancal MPS:

- Desenvolvimento da blindagem magnética (circuito magnético fechado) recomendada.
- Investigação de novos materiais e/ou revestimentos para as superfícies em contato do mancal MPS.
- Investigação do espaçamento ideal (mínimo) entre os ímãs do mancal.
- Pesquisas envolvendo a utilização de ímãs permanentes com diferentes topologias.
- Determinação mais precisa das vibrações e das perdas por atrito no mancal MPS.
- Realização de pesquisa experimental envolvendo técnicas de amortecimento externo.

AGRADECIMENTOS

Aos caros amigos Me. Kauê Aparecido Mello dos Santos, Prof. Fabio Miranda, Prof. Aumir Antunes, Prof. Me. Wilson Ruiz e Prof. Dr. Eduardo Alves da Costa, pela valiosa assessoria técnica no desenvolvimento do protótipo.

Ao IFSP e à EPUSP pela disponibilização das oficinas, laboratórios e biblioteca.

Ao Magnífico Reitor do IFSP, Eduardo Antonio Modena, e ao Pró-Reitor de Desenvolvimento Institucional, Whisner Fraga Mamede, pelo importante apoio na reta final deste trabalho.

Ao Gerente Comercial da empresa Koimãs Produtos Magnéticos Ltda., Manoel Neves Filho, pela presteza e apoio material.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, L. A. **Desenvolvimento de Osciladores em 10 GHZ de Ultrabaixo Ruído de Fase e Análise de seus Desempenhos nos Transdutores Paramétricos do Detector de Ondas Gravitacionais Mário Schenberg**. São José dos Campos: Tese de Doutorado – INPE, 2006.
- BORISAVLJEVIC, A. **Limits, Modeling and Design of High-Speed Permanent Magnet Machines**. Delft: TESE DE DOUTORADO - Universidade Técnica de Delft, 2011.
- CHOI, W.; LI, S.; SARLIOGLU, B. Core Loss Estimation of High Speed Electric Machines: An Assessment. **Wisconsin Electric Machines and Power Electronics Consortium (WEMPEC)**, Madison, 2015.
- EARNSHAW, S. On the nature of the molecular forces which regulate the constitution of lumiferous ether. **Trans. Camb. Phil. Soc.**, p. 97-112, jul. 1842.
- FERNANDES, P.; FRAJUCA, C.; HORIKAWA, O. **Diretrizes para o projeto do dispositivo para calibração do detector Mario Schenberg**. São Paulo: Dissertação de Mestrado - IFSP, 2015.
- HALMINEN, O. et al. Active magnetic bearing-supported rotor with misaligned cageless backup bearings: A dropdown event simulation model. **Mechanical Systems and Signal Processing** v. 50-51, p. 692–705, 2015.
- KÄRKKÄINEN, A. **Dynamic Simulations of Rotors During Drop on Retainer Bearings**. Lappeenranta: TESE de PhD - Lappeenranta University of Technology, 2007.
- LI, P.; SAHINKAYA, M. N.; KEOGH, P. S. ACTIVE RECOVERY OF CONTACT-FREE LEVITATION IN MAGNETIC BEARING SYSTEMS. **Proceedings of the ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE**, Chicago, 12-15 Ago. 2012.
- NISHIMURA, M.; SUZUKI, M. Solid-lubricated ball bearings for use in a vacuum — state-of-the-art. **Tribology International**, v. 32, n. 11, p. 637–647, Nov. 1999.
- PADOVANI, D. M. **Desenvolvimento de um experimento para medir a velocidade da interação gravitacional**. São Paulo: Dissertação de Mestrado, 2012.
- 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.
- PEREIRA, J. C. **Introdução à Dinâmica de Rotores**. 1. ed. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, v. 1, 2005. ISBN APOSTILA - Introdução à Dinâmica de Rotores Prof. José Carlos Pereira Florianópolis, janeiro de 2005 Universidade Federal de Santa Catarina Departamento de Engenharia Mecânica Grupo de Análise e Projeto Mecânico.
- RUIZ, W. **EXPERIMENTO PARA MEDIR A VELOCIDADE DA INTERAÇÃO GRAVITACIONAL UTILIZANDO UM MOTOR DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL**. São Paulo: Dissertação de Mestrado, IFSP, 2014.
- SANTOS, K. A. M. D. **Protótipo de Experimento para medir velocidade de interação gravitacional**. São Paulo: Dissertação de Mestrado - IFSP, 2013.
- WATSON, J. The Control of High-Speed Machines. **Computing and Control Engineering Journal**, Burgess Hill, Dez. 1999. 245.
- WHITLEY, S. Review of the gas centrifuge until 1962. Part II: Principles of high-speed rotation. **Rev. Mod. Phys.**, Chester, v. 56, n. 1, p. 67-97, Jan. 1984.
- YONNET, J. P. PASSIVE MAGNETIC BEARINGS WITH PERMANENT MAGNETS. **IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS**, SAINT MARTIN D'HERES, v. MAG-14, n. 5, p. 803–805, set. 1978.