



Mancais magnéticos: conceito e aplicações

Magnetic bearings: concept and application

Rogério Issamu Yamamoto (rogerio.yama@gmail.com)
Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade de São Paulo (USP) e professor da Faculdade de Tecnologia Termomecânica (FTT).

Marco Antonio Fumagalli (fumagallimarcoantonio@gmail.com)
Doutor pelo Institute of Robotics da Eidgenössische Technische Hochschule – ETH – Zurique e professor da Faculdade de Tecnologia Termomecânica (FTT).

**Engenharia de
Controle e Automação**

FTT Journal of Engineering and Business. •
SÃO BERNARDO DO CAMPO, SP

NOV. 2019 • ISSN 2525-8729

Submissão: 11 fev. 2019. **Aceitação:** 2 ago. 2019

Sistema de avaliação: às cegas dupla (*double blind review*).

FACULDADE TECNOLOGIA
TERMOMECANICA, p. 95-108

Resumo

Atualmente, o crescimento tecnológico está em ampla evolução; por outro lado, há uma busca generalizada por máquinas com novos requisitos, como por exemplo, a sustentabilidade. Dessa forma, os novos sistemas têm como objetivo aumentar o desempenho das máquinas produzidas, reduzindo suas perdas energéticas. Nesse cenário, novas tecnologias vêm sendo aplicadas às máquinas e dispositivos, como os mancais magnéticos, que são capazes de sustentar o rotor através da aplicação de forças magnéticas, dessa forma evitando o contato entre o rotor e o mancal, conseqüentemente reduzindo as perdas devido ao atrito. Com a levitação do rotor, também é possível reduzir significativamente seu desgaste, aumentando a vida útil do sistema assim como o seu desempenho. Com o intuito de promover a difusão do conhecimento acerca dos mancais magnéticos, este trabalho tem o propósito de apresentar o conceito por trás desses mancais, incluindo suas aplicações atuais e seu estado de arte, buscando assim o desenvolvimento de novas aplicações ou tecnologias de levitação magnética.

Palavras-chave: Mancais magnéticos. Aplicações. Sustentabilidade.

Abstract

Nowadays, the expansion of the technology increases the search for new requirements, such as sustainability. Therefore, the new systems have to increase the machine performance, reducing the energy losses. In this scenario, new technologies have been applied on machines and devices, like the magnetic bearings, which are capable of sustaining the rotor through magnetic forces, therefore avoiding contact between the rotor and the bearings, and consequently reducing the friction losses. The levitation of the rotor also allows a significantly reduction of the rotor wear, increasing the system's life cycle as well as its performance. In order to promote the diffusion of knowledge about the magnetic bearings, this paper aims to present the concept behind these bearings, including their current applications and its state of art, thus seeking the development of new applications or technologies of magnetic levitation.

Keywords: Magnetic bearings. Application. Sustainability.

Introdução

Mancais são elementos de máquinas responsáveis por posicionar e suportar as cargas sobre o rotor, gerando o mínimo de resistência para a sua rotação. O mancal de deslizamento representa a configuração mais simples de mancal mecânico e utiliza basicamente forças de contato entre sólidos para sustentar o rotor na posição desejada.

Porém, nesse tipo de mancal ocorre o atrito entre rotor e mancal, que gera uma resistência indesejada à rotação. Por esse motivo, outra configuração foi proposta, na qual foram utilizados elementos rolantes entre o rotor e a parte fixa do mancal. Com isso, foi possível reduzir o atrito entre o rotor e o mancal. Esses são os chamados mancais de rolamentos (BUDYNAS & NISBETT, 2011).

Posteriormente, tentando reduzir ainda mais o atrito, buscou-se usar fluidos entre a parte móvel e a fixa do mancal, gerando assim a configuração hidrodinâmica, em que uma camada de óleo é utilizada no lugar dos elementos rolantes do mancal de rolamento, o que permitiu reduzir ainda mais o atrito (BUDYNAS & NISBETT, 2011).

Percebe-se, portanto, a busca da engenharia em reduzir o atrito dos mancais sem comprometer o seu funcionamento. Por essa razão, foi proposto o uso da força de campos magnéticos ao invés das forças de contato. Dessa forma, os mancais não teriam atrito e nem desgaste. Seguindo esse princípio, foram desenvolvidos os mancais magnéticos.

Mancais magnéticos

Os mancais magnéticos são aqueles que utilizam forças magnéticas ao invés de forças de contato. Consequentemente, o rotor levita sem contato com o mancal. Diferentemente do mancal mecânico, existem diversas formas de gerar a força de levitação magnética, dentre as quais se destacam: a levitação por ímãs permanentes, a levitação eletrodinâmica, a levitação supercondutora e a levitação eletromagnética (SCHWEITZER, 2009).

A levitação por ímãs permanentes ocorre através das interações entre ímãs desse tipo para gerar as forças de levitação magnética, ou seja, as forças de atração ou repulsão são responsáveis por gerar as forças que vão sustentar o rotor, como pode ser visto na figura 1, que apresenta diferentes configurações de ímãs permanentes para sustentar radialmente rotores (YONNET, 1978).

A grande vantagem desse tipo de mancal é sua simplicidade construtiva, pois, basicamente, ele é constituído de dois ímãs permanentes: um fixado no rotor e outro na parte fixa do mancal. Com o advento de materiais como o neodímio ou samário, é possível produzir campos magnéticos elevados apenas utilizando ímãs permanentes (YAMAMOTO, 2017).

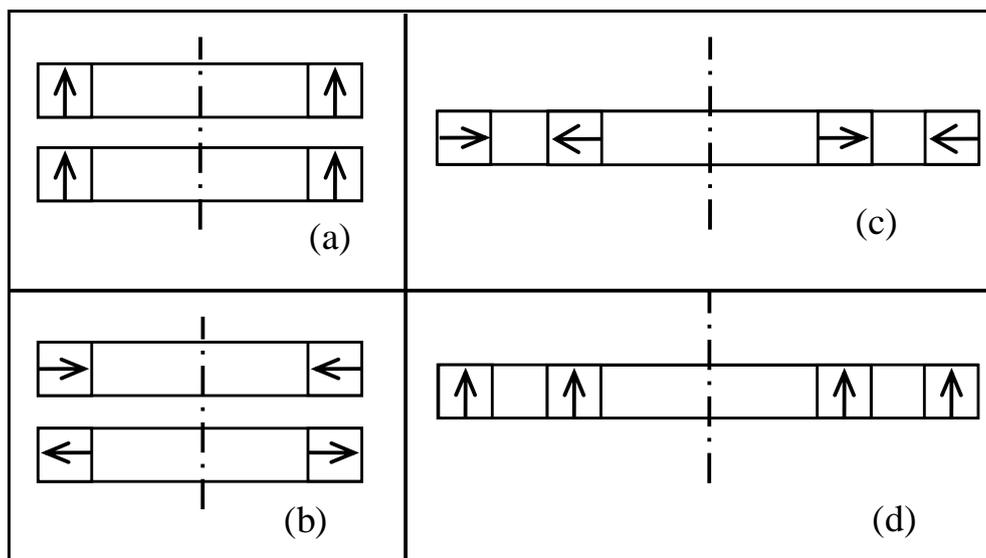


Figura 1: Quatro configurações básicas de mancais radiais magnéticos que utilizam ímãs permanentes – (a) e (b) modelos por atração e (c) e (d) por repulsão.

Fonte: Retirado do artigo de Yonnet (1978)

A levitação por ímãs permanentes apresenta um empecilho ao ser aplicada, pois não é possível estabilizar o rotor com 3 graus de liberdade apenas com essa estratégia. Por esse motivo, esse tipo de levitação vem sendo utilizado em conjunto com outras estratégias.

Um exemplo dessa combinação é proposto por Pavani (2015), que acoplou o mancal magnético a um mancal axial mecânico. Esse tipo de mancal híbrido utiliza uma esfera para estabilizar axialmente o rotor, como apresentado no esquema da Figura 2, gerando o mínimo de resistência à rotação.

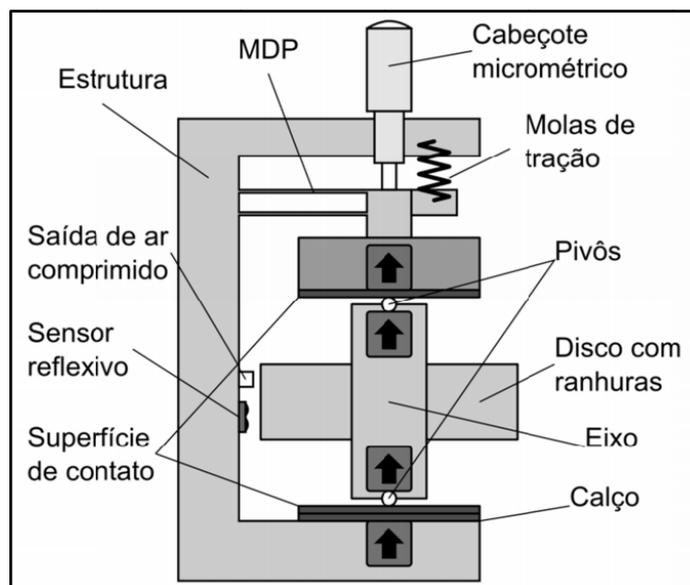


Figura 2: Esquema do mancal magnético e mecânico proposto por Pavanni (2015).
 Fonte: Retirado da dissertação de Pavani (2015)

A segunda estratégia, a levitação eletrodinâmica, utiliza o princípio da indução eletromagnética para gerar as forças de levitação. Por exemplo, suponhamos um disco feito de material condutor e que, próximo a ele, exista um ímã permanente fixado por um braço como mostra a figura 3 (LOPES, 2004).

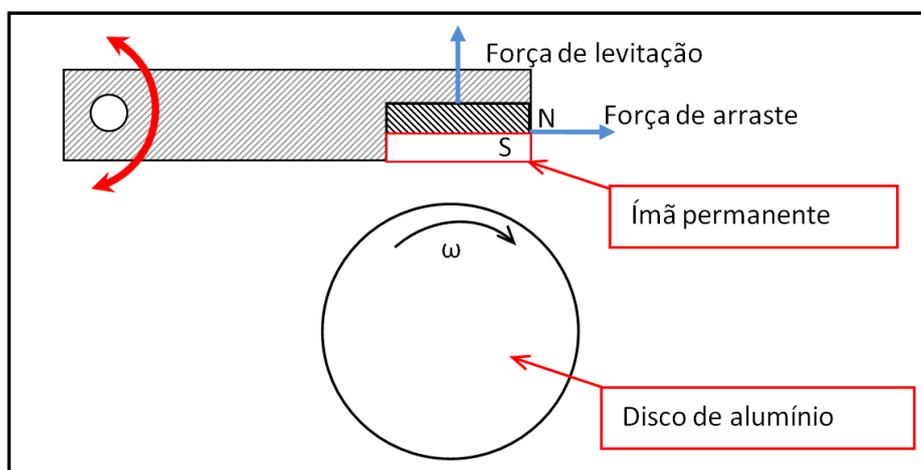


Figura 3: Esquema da levitação eletrodinâmica.
 Fonte: Adaptado da dissertação de Lopes (2004)

Considerando que o disco de alumínio está em rotação em torno de seu eixo, a aproximação do ímã permanente altera o fluxo magnético que atravessa o disco condutor. Devido a essa variação do fluxo magnético, uma corrente elétrica é induzida no disco, que gera um segundo campo magnético, repelindo o campo magnético produzido pelo ímã permanente, o qual, por sua vez, vai criar uma força de levitação (LOPES, 2004).

Portanto, a força de levitação é gerada devido à variação do campo magnético que atravessa o condutor. Essa variação pode ser obtida de duas formas: através do movimento relativo entre

condutor e o campo magnético ou criando um campo magnético que varia com o tempo, como por exemplo, um campo gerado por um eletroímã (CHEN *et. al.*, 2009).

Segundo Lopes (2004), a força de levitação tem uma relação direta com a frequência de variação do campo magnético que atravessa o material condutor, de forma que, quanto maior a frequência de variação do fluxo magnético, maior será a força de levitação e menor será a força de arraste, como está apresentado no gráfico da Figura 4.

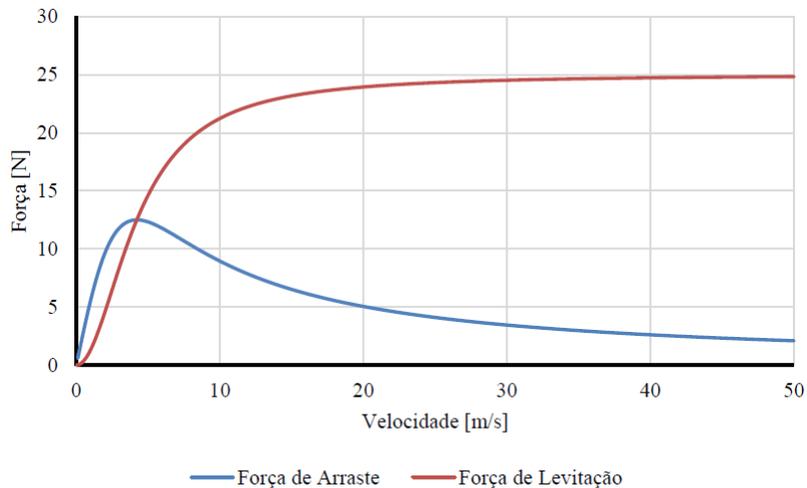


Figura 4: gráfico do comportamento das forças na levitação eletrodinâmica.
Fonte: Adaptado da dissertação de Lopes (2004)

Essa estratégia permite estabilizar 3 graus de liberdade, porém, como foi descrito, existe uma limitação para sua aplicação, que seria a frequência de variação do campo magnético, ou seja, para se obter uma elevada força de levitação é necessário que exista uma elevada frequência de variação do campo magnético. Portanto, é necessária uma alta rotação do rotor ou uma frequência de variação do campo magnético para que esse mancal funcione adequadamente.

A terceira estratégia, a levitação supercondutora, recebe esse nome devido ao uso da propriedade supercondutora. Essa propriedade está presente em alguns materiais quando mantidos em temperaturas baixas, por volta de 100 K, o que reduz significativamente a sua resistência elétrica; através do efeito Meissner-Oschensfeld, os materiais supercondutores conseguem repelir campos magnéticos que atravessam o interior desse material, como pode ser visto no esquema apresentado na figura 5 (CALLISTER, 2002).

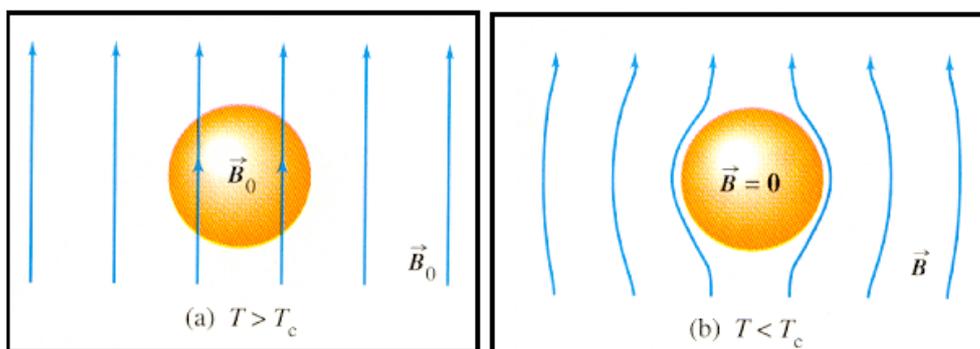


Figura 5: (a) Material supercondutor acima da temperatura crítica e (b) material supercondutor abaixo da temperatura crítica (T_c).

Fonte: Retirado do livro do Callister (2002)

Essa estratégia é capaz de produzir levitação de forma estável com 5 graus de liberdade, ou seja, é possível fazer o rotor levitar de forma estável, suportando as forças radiais, axiais e as duas inclinações indesejadas, mantendo apenas um movimento possível que é a rotação do rotor sem atrito, pois não há contato entre o rotor e o mancal, como foi proposto por Ichihara *et. al.* (2005).

Por fim, tem-se a levitação eletromagnética, que utiliza o campo magnético gerado por um eletroímã, porém diferente da levitação por ímãs permanentes. Nesse tipo de levitação, é possível controlar a força de levitação monitorando a corrente elétrica que atravessa o eletroímã. Para isso, é necessário utilizar um sistema de controle em malha fechada, como é ilustrado na figura 6 (SCHWEITZER, 2009).

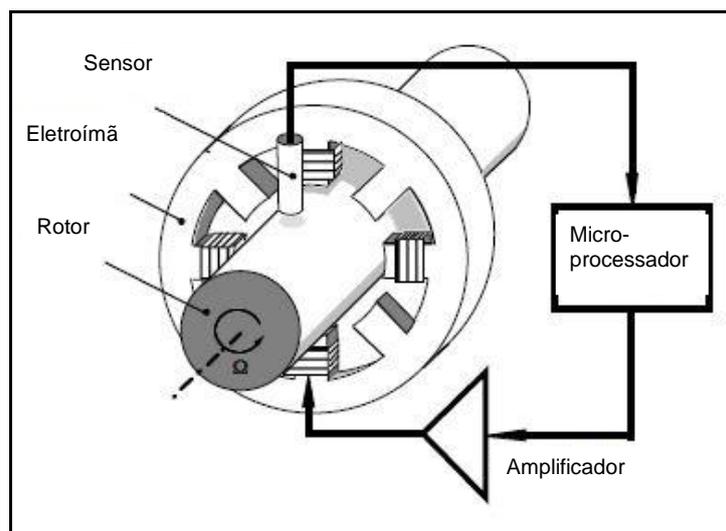


Figura 6: Esquema do princípio de funcionamento de um mancal eletromagnético radial para o controle de um grau de liberdade de um rotor.

Fonte: Adaptado do artigo de Schweitzer (2009)

A figura 6 mostra o funcionamento básico dessa estratégia de levitação, em que um sensor mede a posição do rotor. Baseado nessa medição, o controlador determina a intensidade da corrente elétrica sobre os eletroímãs, controlando dessa forma a força magnética sobre o rotor. Devido ao sistema de controle, é possível obter uma levitação estável com 5 graus de liberdade, pois mesmo que o eletroímã interaja com um ímã permanente, será possível estabilizar a levitação devido ao sistema de controle.

Pesquisas em mancais magnéticos

As pesquisas em mancais magnéticos buscam melhorar seu desempenho e eficiência para aumentar a aplicabilidade desses componentes. Com esse objetivo, os estudos feitos seguiram duas vertentes: a melhoria da estratégia de levitação e a busca em unificar duas ou mais estratégias de levitação.

As pesquisas que visam melhorar as estratégias de levitação apresentam os seguintes objetivos:

- A tentativa de aumentar a força de levitação gerada pela interação de ímãs permanentes. Entre essas pesquisas, tem-se a configuração *halbach*, que aumenta o campo magnético gerado pelos ímãs permanentes (PAVANI, 2015).
- A busca de novos materiais que possuam propriedade supercondutora em temperaturas mais altas e com melhorias no sistema de refrigeração (ARSÉNIO *et. al.*, 2018).
- Novas técnicas de controle visando aumentar o desempenho dos mancais magnéticos (NOSHADI *et. al.* 2015).

As pesquisas de unificação das estratégias de levitação buscam desenvolver mancais magnéticos com duas ou mais dessas estratégias para melhorar o desempenho de cada uma delas.

Por exemplo, o mancal proposto por Silva (2005) unifica a levitação de ímãs permanentes com a levitação eletromagnética; assim o rotor é sustentado radialmente por ímãs anelares trabalhando em atração, e para estabilizar a direção axial utiliza-se a levitação eletromagnética. Dessa forma, é possível estabilizar os 5 graus de liberdade com um sistema simplificado em relação à levitação usando apenas eletromagnetismo, como mostra a Figura 7.

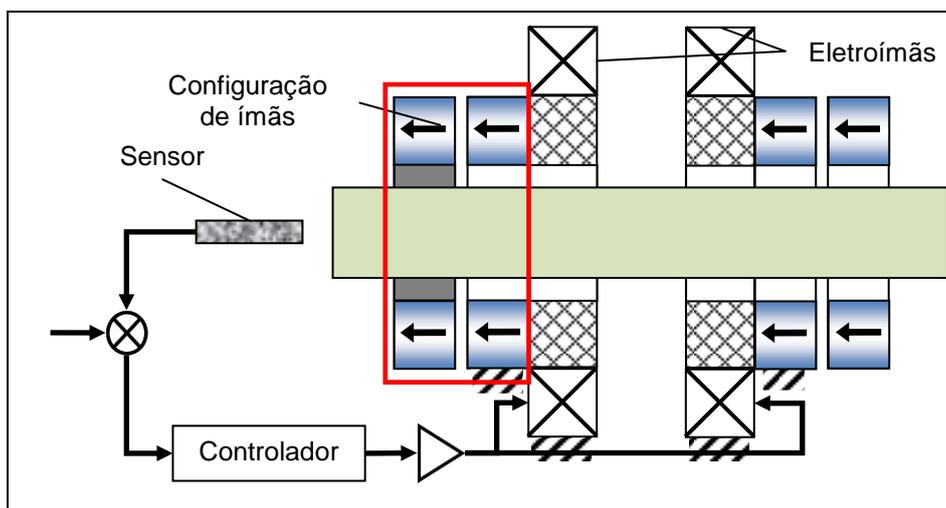


Figura 7: Esquema do mancal híbrido proposto por Silva (2005).
Fonte: Adaptado do artigo de Silva (2005)

Outro exemplo é o mancal proposto por Minami *et. al.* (2016), que realiza um estudo comparativo entre um mancal híbrido supercondutor de ímãs permanentes e um mancal puro supercondutor, mostrando as vantagens de se utilizar uma arquitetura híbrida para se obter uma rigidez maior e reduzir os efeitos da vibração.

Outra proposta que busca unificar as estratégias de levitação é apresentada por Yamamoto (2017), em que se buscou um mancal magnético híbrido com três estratégias de levitação. Sua proposta unificou a levitação radial com ímãs permanentes obtendo uma levitação eletromagnética para garantir a estabilidade com 5 graus de liberdade. Com o intuito de fornecer amortecimento passivo ao sistema, foi aplicado um mancal eletrodinâmico. O protótipo desenvolvido está representado na figura 8. Ele apresentou amortecimento radial contra impactos radiais, aumentando a estabilidade do mancal magnético.

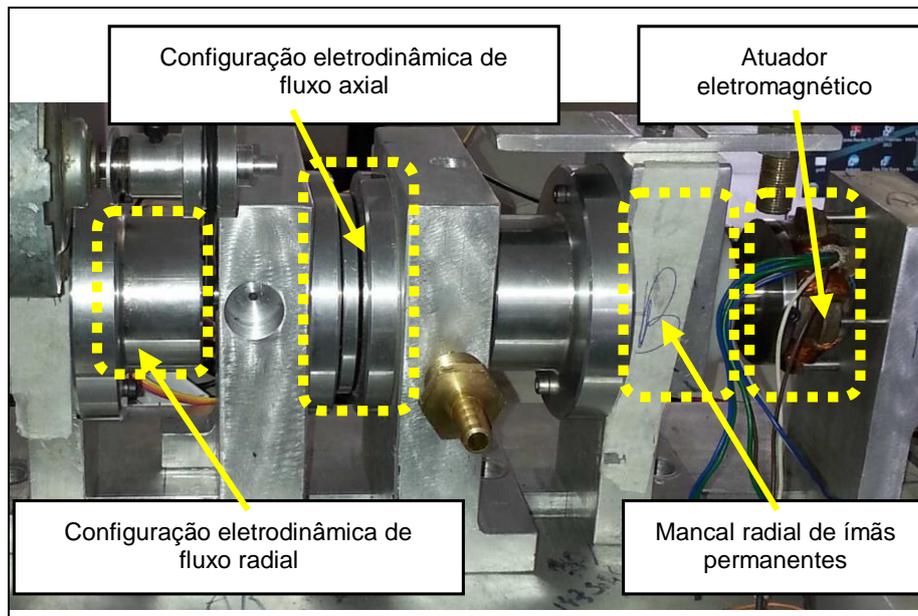


Figura 8: Foto do mancal magnético híbrido proposto por Yamamoto (2017).
 Fonte: Retirado da tese de Yamamoto (2017)

De acordo com o que foi apresentado, as pesquisas de mancais magnéticos buscam aumentar o desempenho desses componentes visando ampliar a sua gama de aplicações e até mesmo gerar novas aplicações.

Mancais magnéticos: aplicações e inovação

Dentre as diferentes aplicações dos mancais magnéticos, podem ser citadas as que estão em fase de pesquisa como o desenvolvimento do trem maglev, que utiliza a levitação magnética para sustentar os vagões. Ele é movido por um motor magnético linear; devido à ausência de contato com os trilhos, ele move-se com um gasto mínimo de energia (SOTELO et. al., 2015; LANZARA et. al., 2014). Um protótipo do maglev é apresentado na Figura 9 e está sendo desenvolvido para ser utilizado no transporte de pessoas em larga escala.

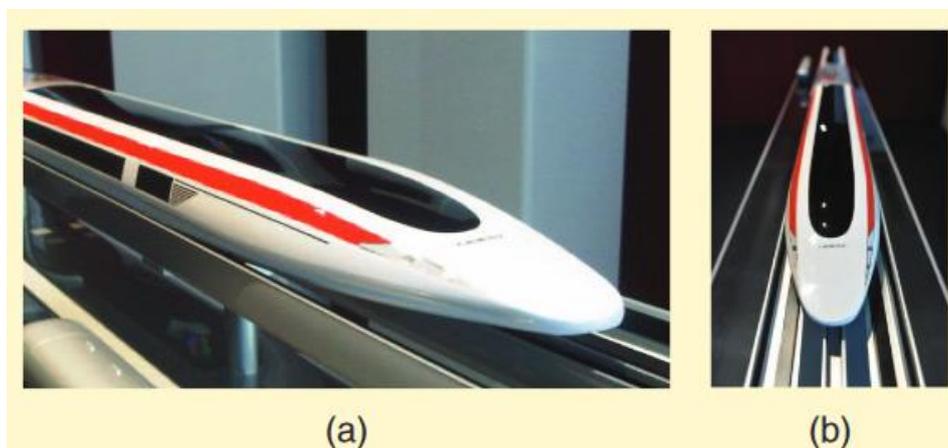


Figura 9: Protótipo do maglev.
 Fonte: Retirado do artigo de Lanzara (2014)

Além do sistema de transporte, pode ser mencionado o Dispositivo de Assistência Ventricular (DAV), comumente chamado de “coração artificial”. Horikawa *et. al.* (2008) propõem o desenvolvimento de uma bomba cujo rotor levita graças aos mancais magnéticos, como mostra o esquema da figura 10.

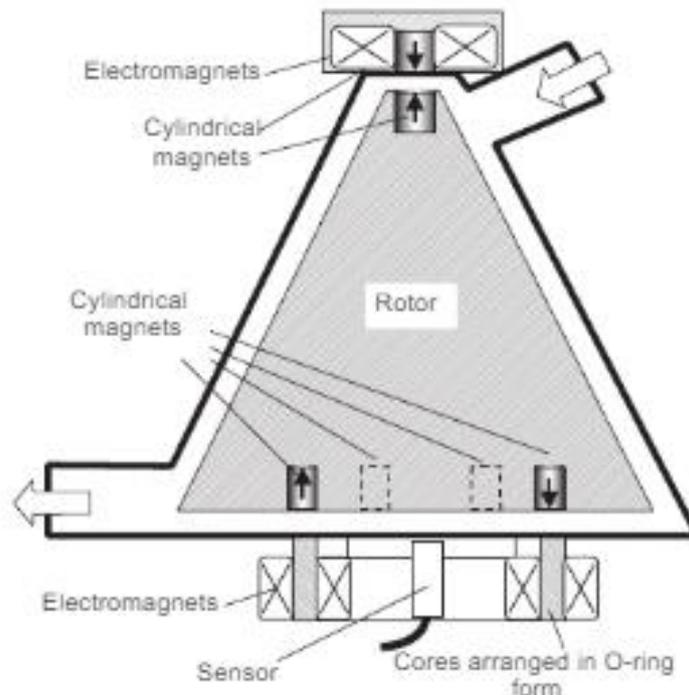


Figura 10: DAV proposto por Horikawa *et. al.* (2008)
Fonte: Retirado do artigo de Horikawa *et. al.* (2008)

Essa bomba é utilizada para promover o bombeamento do sangue em paralelo com o coração, reduzindo o seu esforço e possibilitando a recuperação do órgão. A maior vantagem do mancal magnético neste caso é reduzir a ocorrência de danos às células sanguíneas. (HORIKAWA, *et. al.*, 2008).

Outra possível aplicação dos mancais magnéticos é em baterias eletromecânicas, também chamadas de “flywheel”, que são capazes de armazenar energia cinética transformando-a em eletricidade quando necessário (RAGHEB, 2013; NGUYEN *et. al.*, 2008).

A constituição básica de uma bateria eletromecânica é baseada em um rotor com um volante de massa acoplado; estando ele em rotação, armazena energia cinética e, através de um gerador, transforma a rotação em energia elétrica.

A aplicação de mancais magnéticos permitiu ao flywheel aumentar a sua rotação, ampliando a potência armazenada, chegando a superar inclusive baterias de NiMH, que são utilizadas em carros híbridos. Na Figura 11, temos um flywheel para elevadas rotações (GERADA *et. al.*, 2014).

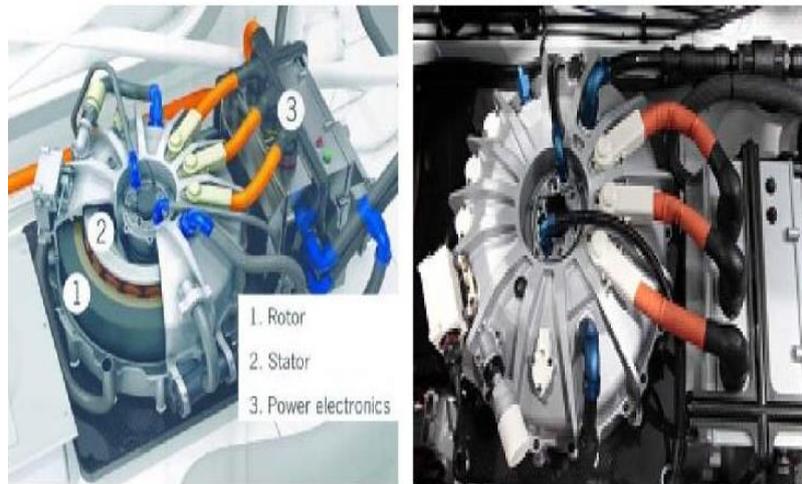


Figura 11: *Flywheel* para elevadas rotações (Williams Hybrid Power)
 Fonte: Retirado do artigo de Gerada *et. al.* (2014)

Devido à ausência de contato, e contando com uma rotação elevada, os mancais magnéticos são comumente aplicados em sistemas como as bombas turbomoleculares, que trabalham sob elevadas rotações, próximo de 100.000 rpm. Essas bombas são utilizadas para gerar e manter alto vácuo, cerca de 10^{-10} mbar, e precisam trabalhar a vácuo. Nesse cenário, a aplicação de mancais magnéticos permite uma levitação no vácuo sem a necessidade de lubrificantes ou outros contaminantes (GERADA *et. al.*, 2014).

Outra aplicação em que se deseja eliminar completamente os lubrificantes é na área de compressores de gás, pois o uso de reduções e mancais mecânicos muitas vezes acarreta a dispersão de lubrificantes junto com o gás comprimido, causando contaminação do sistema, que pode ser grave em aplicações como as das indústrias química e de óleo, ou mesmo na produção de gás. Com o intuito de gerar compressores sem a utilização de óleo, aplicou-se o sistema integrado em que o motor elétrico é acoplado diretamente ao compressor. Utilizando mancais magnéticos, foi possível eliminar completamente a lubrificação. Um comparativo entre os dois sistemas é apresentado na

figura 12.

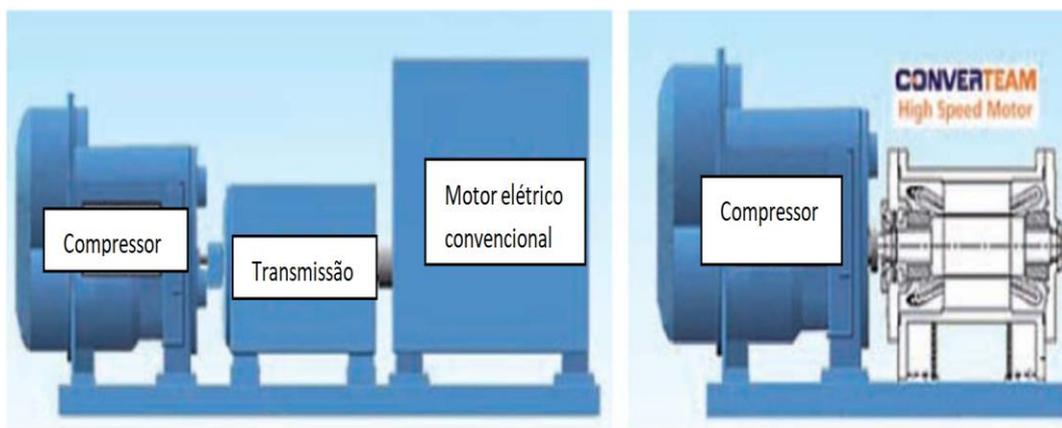


Figura 12: compressor convencional e compressor integrado (livre de óleo)
 Fonte: Retirado do artigo de Gerada *et. al.* (2014)

Além dos compressores e da bomba turbomolecular, os mancais magnéticos podem ser utilizados também em microturbinas, que funcionam através de combustão e podem ter sua eficiência aumentada mesmo que apresentem tamanho reduzido. A busca por tamanhos reduzidos se deve ao aumento do consumo de energia elétrica, exigindo uma maior produção com espaço limitado (GERADA *et. al.*, 2014). O protótipo apresentado na figura 13 demonstra a possibilidade de produzir 50 kW a 80.000 rpm com uma microturbina, que poderia ser usada para carregar as baterias de carros híbridos, representando apenas 5% do tamanho e peso do um motor de pistão com potência equivalente. (GERADA *et. al.*, 2014).



Figura 13: Microturbina de gás de 50 KW a 80.000 rpm (Bladon)
Fonte: Retirado do artigo de Gerada *et. al.* (2014)

Foi possível, portanto, observar algumas aplicações para os mancais magnéticos, e perceber a evolução desse tipo de componente e seus possíveis usos, inclusive em produtos que são considerados inovadores, como o carro híbrido.

Assim, podemos concluir que os mancais magnéticos representam uma linha de pesquisa em desenvolvimento que pode ser destinada tanto para a melhoria de aplicações conhecidas como na exploração de novas utilizações, além do desenvolvimento de mancais melhores e mais eficazes.

Considerações finais

Este artigo teve como objetivo apresentar a linha de pesquisa e o estado de arte de mancais magnéticos, uma vez que essa tecnologia permite aumentar a eficiência de sistemas mecânicos devido à redução de atrito e do desgaste.

Essa tecnologia permite também o desenvolvimento de novas máquinas e sistemas, que podem gerar grandes avanços tecnológicos tais como o trem *maglev*, que propicia um sistema de transporte mais eficiente e veloz, ou mesmo dos DAV (Dispositivos de Assistência Ventricular). Portanto, é importante a divulgação desse tipo de pesquisa para o desenvolvimento de novas propostas de aplicação ou de configurações para melhorar o desempenho desse produto, pois pode representar uma resposta sustentável para novas máquinas e equipamentos.

Referências

- ARSENIO, A., ROQUE, M., CARVALHO, M., CARDEIRA, C., RUI, M., & COSTA BRANCO, P. Implementation of YBCO Superconducting ZFC-Magnetic Bearing Prototype. *IEEE Transactions on Industry Applications*, ago. 2018.
- BUDYNAS, R. G. e NISBETT, J. K. Mancais de rolamento e Lubrificação e mancais de deslizamento. In BUDYNAS, R. G. e NISBETT, J. K., *Elementos de máquinas de Shigley: Projeto de Engenharia Mecânica*, Porto Alegre: Editora Mc Graw Hill, 2011, p. 575-674.
- CALLISTER, W. D. Jr. Propriedades Magnéticas: Supercondutividade. In CALLISTER W. D. Jr, *Ciência e Engenharia dos materiais*, Rio de Janeiro: LTC, 2002 p. 475-477.
- CHEN, J. Y.; ZHOU, J. B.; MENG, G.; ZHANG, W. M. Evaluation of Eddy-Current Effects on Diamagnetic Bearings for Microsystems, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 56, nº4, p. 964-972, abr. de 2009.
- MINAMI, T., SAKAI, S., & OHASHI, S. Improvement of stability against vibration at the mechanical resonance in attractive type HTS-permanent hybrid magnet bearing. *IEEE Region 10 Conference (TENCON)* nov. 2016.
- GERADA D., MEBARKI A., BROWN N. L., GERADA C., CAVAGNINO A. e BOGLIETTI A., High-Speed Electrical Machines: Technologies, Trends, and Developments *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 61, nº 6, jun. 2014.
- HORIKAWA, O.; ANDRADE, A.; SILVA, I.; BOCK, E. *Magnetic Suspension of the Rotor of a Ventricular Assist Device of Mixed Flow Type Artif Organs* 2008; 32:334–7, mai. 2008
- ICHIHARA, T., MATSUNAGA, K., KITA, M., HIRABAYASHI, I., ISONO, M., HIROSE, M. KOSHIZUKA, N. Application of Superconducting Magnetic Bearings to a 10 kWh-Class Flywheel Energy Storage System. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 15 Nº 2, pp. 2245–2248, jun. 2005.
- LANZARA, G.; D’OVIDIO, G.; CRISI, F. UAQ4 Levitating Train: Italian Maglev Transportation System. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, v. 9, n. 4, pp. 71–77, dez. 2014.
- LOPES, M. A. *Estudo de um mancal magnético eletrodinâmico* .2004. Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- NGUYEN, TD., TSENG, KJ., ZHANG, S. e ZHANG, C. A Flywheel Cell for Energy Storage System. *Sustainable Energy Technologies*, 2008. ICSET 2008. IEEE International Conference on, vol., no., pp.214-219, 24-27 nov. 2008.
- NOSHADI, A., SHI, J., LEE, W. S., SHI, P., & KALAM, A. Robust control of an active magnetic bearing system using H^∞ and disturbance observer-based control. *Journal of Vibration and Control*, pp. 1857–1870, set. 2015.
- PAVANI, R., A. *Mancal Magnético passivo radial por atração combinado com mancal de escoras*. 2015. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

RAGHEB, M. *Kinetic Energy Flywheel Energy Storage*. Documento disponível em <kineticenergyflywheelenergystorage - Mragheb> acesso em 01 de maio de 2019.

SCHWEITZER, G. Introduction and Survey: Classification of Magnetic bearings. In SCHWEITZER G e MASLEN E. H. *Magnetic Bearings: Theory, Design, and application to Rotating Machinery*. Zürich/Florianópolis e Charlottesville: Springer, 2009, p. 10-15.

SILVA, I. *Mancais Magnéticos Híbridos do tipo atração com controle uniaxial*. 2005. Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

SOTELO, G. G.; OLIVEIRA, R. A. H. de, COSTA, F. S. *et al.* A Full Scale Superconducting Magnetic Levitation (MagLev) Vehicle Operational Line. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 25, n. 3, jun. 2015.

YAMAMOTO, R. I. *Mancal magnético híbrido do tipo repulsão com controle uniaxial com amortecimento fornecido por mancal eletrodinâmico*. 2017. Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

YONNET, J. P., Passive magnetic bearing with permanent magnets. *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. MAG-14, nº5, p. 803-805, set. 1978.