

MARINHA DO BRASIL
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA
ESCOLA DE FORMAÇÃO DE OFICIAIS DA MARINHA MERCANTE

LUCAS ROBERTO ALVES

MANCAIS MAGNÉTICOS

RIO DE JANEIRO

2015

LUCAS ROBERTO ALVES

MANCAIS MAGNÉTICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência para obtenção do título de Bacharel em Ciências Náuticas do Curso de Formação de Oficiais de Máquinas da Marinha Mercante, ministrado pelo Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

Orientador (a): Prof.Eng. José Barbosa da Silva Filho ESP

RIO DE JANEIRO

2015

LUCAS ROBERTO ALVES

MANCAIS MAGNÉTICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como exigência para obtenção do título de
Bacharel em Ciências Náuticas do Curso de
Formação de Oficiais de Máquinas da Marinha
Mercante, ministrado pelo Centro de Instrução
Almirante Graça Aranha.

Data da Aprovação: ____/____/____

Orientador: Prof.Eng. José Barbosa da Silva Filho ESP

Assinatura do Orientador

NOTA FINAL: _____

**Dedico este trabalho a meus familiares,
principalmente as minhas avós, que,
infelizmente, não poderão estar presente em
meus objetivos, porém foram partes ativas em
tudo que fiz até o presente momento.**

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem ele nada disso seria possível.

Posteriormente gostaria de agradecer a minha família, a qual sempre me apoio e me ajudou em minhas conquistas pessoais, servindo de base para toda minha formação, tanto profissional quanto moral.

Ao meu orientador que me ajudou e me incentivou neste projeto.

Cada homem que encontro é
superior a mim em alguma coisa;
e nisso posso aprender com ele.
(RALPH WALDO EMERSON)

RESUMO

Este trabalho tem em vista explicar o funcionamento dos mancais magnéticos, com enfoque em mancais magnéticos ativos. Utilizando para isso os princípios e teorias físicas que comprovam a funcionalidade desse sistema. Além disso, visa expor as principais dificuldades e aplicações dos sistemas, bem como suas vantagens e pontos a serem melhorados. Somado a isso o presente trabalho também faz uma alusão histórica a necessidade do uso de mancais magnéticos.

Palavras-chave: Magnetismo. Eletromagnetismo. Mancais Magnéticos. Mancais Magnéticos Ativos. Corrente Elétrica. Força Magnética. Levitação. Eixo. Rotação.

ABSTRACT

The present work aims to explain the working principle of magnetic bearings, with focus on active magnetic bearings. Using for this the physic principles and theory that assure the system functionality. Further, it aims to exposes the main difficulties and applications of the system, as it advantages and upgradable points. More than that, this work makes an historic allusion to the necessity for the use of magnetic bearings.

.

Keywords: Magnetism. Electromagnetism. Magnetic Bearings. Active Magnetic Bearings. Electric Current. Magnetic Force. Levitation. Axis. Rotation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Deslocamento sobre troncos	11
Figura 2- Momento angular e dipolo do elétron	14
Figura 3- Orientação das linhas de campo magnético	15
Figura 4- Linhas de campo em limalhas de ferro	16
Figura 5- Atração e repulsão entre os polos	17
Figura 6- Campo magnético em um condutor	18
Figura 7- Força magnética	19
Figura 8- Orientação do campo eletromagnético	20
Figura 9- Força magnética em um fio condutor	21
Figura 10- Força magnética entre dois fios condutores	22
Figura 11- Campo magnético no interior de um solenoide	23
Figura 12- Fórmula do campo magnético no interior de um solenoide	23
Figura 13- Magneto	24
Figura 14- Gráfico histerese x Densidade de Fluxo	25
Figura 15- Força de levitação em um mancal magnético	27
Figura 16- Composição de um mancal magnético	30
Figura 17- Disposição dos magnetos	31
Figura 18- Turbobomba com mancal magnético	33
Figura 19- Bomba com mancal magnético	34

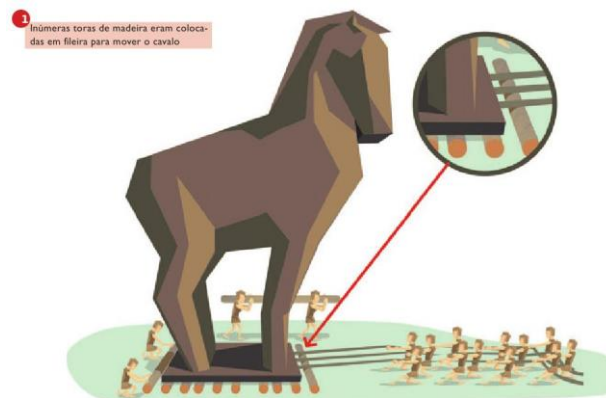
SUMÁRIO

1	REFERÊNCIAS HISTÓRICAS	11
2	MAGNETISMO	13
2.1	Generalidades	13
2.2	Tipos de imãs	14
2.3	Propriedades dos imãs	15
2.3.1	Linhas de Campo	15
2.3.2	Atração e repulsão	16
2.3.3	Inseparabilidade dos polos	17
2.4	Campo magnético de um fio	17
2.5	Força magnética	18
3	ELETROMAGNETISMO	20
3.1	Campo magnético produzido por um fio condutor	20
3.2	Força magnética em um fio condutor	21
3.3	Força magnética entre dois fios condutores	22
3.4	Campo magnético de um solenoide	22
3.5	Energia Magnética	23
3.6	Histerese e Saturação	25
3.6.1	Histerese magnética	25
4	Levitação	27
5	MANCAIS MAGNÉTICOS	29
5.1	Mancais magnéticos passivos	29
5.2	Mancais magnéticos ativos	29
5.2.1	Composição básica de um mancal magnético ativo	30
5.2.2	Funcionamento dos mancais magnéticos ativos	31
6	APLICAÇÕES	33
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	37
8	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

1 REFERÊNCIAS HISTÓRICAS

A redução de atrito em elementos deslizantes sempre foi algo de interesse à sociedade. Registros indicam que no antigo Egito, trabalhadores já se utilizavam de troncos para transportar objetos pesados de um ponto ao outro, apoiando o utensílio sobre o tronco, e deslizando-o até que se chegasse ao local desejado.

Figura 1



Deslocamento sobre troncos

Fonte: <http://www.mecatronicaatual.com.br/educacao/1232-a-historia-dos-rolamentos>

Fazendo-se algumas modificações –substituição dos troncos por roletes–, isso é utilizado até hoje nas indústrias. No entanto, este tipo de mecanismo não se aplica a eixos rotativos. Logo, ao surgirem as primeiras máquinas rotativas, o homem se viu de frente a um novo problema, facilitar o movimento das máquinas rotativas.

As primeiras máquinas rotativas de que se tem registro são os moinhos, nas quais o eixo de rotação era feito de madeira e apoiado sobre o mancal de apoio. Conforme a rotação se iniciava, era observado uma forte força de oposição ao movimento. A solução imediata foi polir as peças, para que deslizassem com a menor fricção possível entre elas. Porém, com o decorrer do tempo, as peças se desgastavam com muita facilidade. Em vista disso, era necessário uma forma de evitar o contato entre elas.

O único tipo de lubrificante disponível na época era a banha animal, que não só evitava o desgaste dos equipamentos, como também aumentava a velocidade de rotação do conjunto.

Até então, o mecanismo existente era suficiente para o maquinário existente na época, uma vez que a velocidade de trabalho dos eixos era baixa.

Com a chegada da era industrial, os engenheiros da época se viram diante da necessidade de produzir e conduzir objetos com maior rapidez. Essa necessidade surgiu em função das altas velocidades de rotação dos eixos, que devido ao atrito – mesmo que baixo era existente-, geravam uma enorme quantidade de calor, superaquecendo os eixos e modificando a viscosidade do lubrificante, reduzindo seus efeitos.

Uma das alternativas criadas foram os rolamentos, que criavam o mesmo efeito dos troncos utilizados pelos egípcios. Embora os rolamentos ainda sejam utilizados até os dias atuais, o desgaste entre as superfícies do rolamento, a diferente dilatação térmica de seus materiais patentes e a maciez dos materiais de fabricação ainda são fatores limitantes ao uso dos rolamentos, principalmente em aplicações de grande porte ou que requerem um grande esforço da peça.

Outra alternativa foi o mancal mecânico com lubrificação forçada, semelhante aos mancais das rodas de apoio, os avanços desse tipo de equipamento foram sendo observados a medida que estudos a respeito de lubrificantes e metais patentes eram desenvolvidos. A busca por lubrificantes multiviscosos –apresentam a mesma viscosidade para diferentes faixas de temperatura-, e metais patentes de maior maciez são desenvolvidas até os dias atuais. Mas essa alternativa ainda apresenta elevado custo de operação devido a necessidade de bombas, desgaste dos materiais e vida útil dos lubrificantes.

Em meados dos anos 70, estudos passaram a ser desenvolvidos em busca dos mancais magnéticos, que, apresentavam como principal vantagem a inexistência de contato entre as peças, dispensando o uso de lubrificantes e minimizando a possibilidade de superaquecimento. Nos primeiros casos esses mancais eram utilizados apenas para testes. Embora possuam um alto valor aquisitivo, esses mancais já estão sendo empregados em larga escala, devido ao seu baixo custo de manutenção, que, a longo prazo, supera o valor final de operação dos mancais hidráulicos.

2 MAGNETISMO

2.1 Generalidades

Embora o magnetismo fosse conhecido desde o século VII a.C pelos gregos, somente na época do renascimento -mais precisamente quando os chineses trouxeram a bússola a Europa- esse efeito passou a ser de interesse de estudo dos cientistas da época.

O campo magnético pode ser definido como a região próxima a um ímã que influencia outros ímãs, ou materiais que possuem propriedades magnéticas. Tais propriedades podem ser divididas em ferromagnéticas, paramagnéticas e diamagnéticas, conforme definição a seguir:

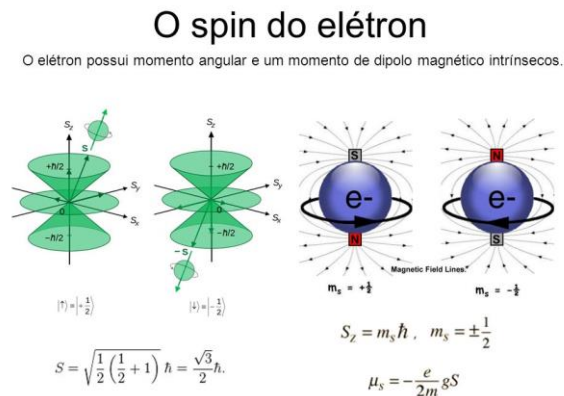
Ferromagnéticas: Materiais que, quando submetidos a um campo externo, adquirem um campo de mesmo sentido do campo a que se submeteram, o qual permanece após a remoção do material. Trata-se de algo semelhante a uma “memória magnética”. Os metais que possuem tais propriedades são fortemente atraídos pelos ímãs, alguns exemplos desses metais são: ferro, níquel, cobalto e alguns de seus compostos.

Paramagnéticos: Materiais que, quando submetidos a um campo magnético externo, geram um campo de mesmo sentido ao campo no qual foram introduzidos. No entanto, quando esse campo é retirado, o campo magnético do material desaparece. São exemplos desses materiais: alumínio, sódio, magnésio, cálcio, dentre outros.

Diamagnéticos: Materiais que, introduzidos em um campo magnético, criam um campo em sentido contrário ao campo em que estão introduzidos, o qual desaparece assim que o material é removido.

De modo sucinto, os campos magnéticos dos materiais são um resultado da combinação do momento angular do orbital e do momento angular de spin do mesmo elétron.

Figura 2



Momento angular e dipolo do elétron

Fonte: http://images.slideplayer.com.br/5/1595566/slides/slide_61.jpg

2.2 TIPOS DE IMÃS

Um ímã é definido como qualquer objeto capaz de criar um campo magnético a sua volta, podendo este ser natural ou artificial.

Um ímã natural é feito de minerais com substâncias magnéticas em sua composição, como a magnetita por exemplo. Enquanto que artificial é feito de matérias sem propriedades magnéticas, que, no entanto, pode adquirir temporariamente ou permanentemente propriedades de um ímã natural. Os ímãs artificiais podem, ainda, ser divididos em:

Permanentes: Feito de um material capaz de manter as propriedades magnéticas, mesmo após o fim do processo de imantação.

Temporal: Possui propriedades magnéticas apenas quando se encontra sob ação de outro campo magnético, geralmente composto de materiais paramagnéticos.

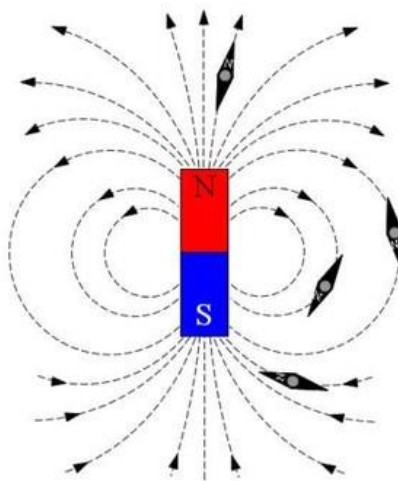
Eletroímã: Objeto composto de um condutor e um núcleo, cujas propriedades magnéticas dependem da passagem de corrente pelo condutor.

2.3 Propriedades dos ímãs

2.3.1 Linhas de campo

Pode-se dizer que um campo magnético existe em uma região, quando uma força(magnética) pode ser exercida num ímã. As linhas de campo são linhas imaginárias que representam a direção e força de um campo. Vão do Polo Norte ao Polo Sul, no exterior do ímã. Conforme essas linhas se aproximam dos polos, sua intensidade aumenta, aumentando o campo ali existente. Essas linhas não possuem origem nem fim, é observado que no interior dos materiais, elas os atravessam formando uma malha fechada. Isso pode ser observado colocando-se limalha de ferro em uma folha de papel sobre o ímã, o padrão de linhas formado continua na parte do papel que está sobre o ímã, fechando-se.

Figura 3

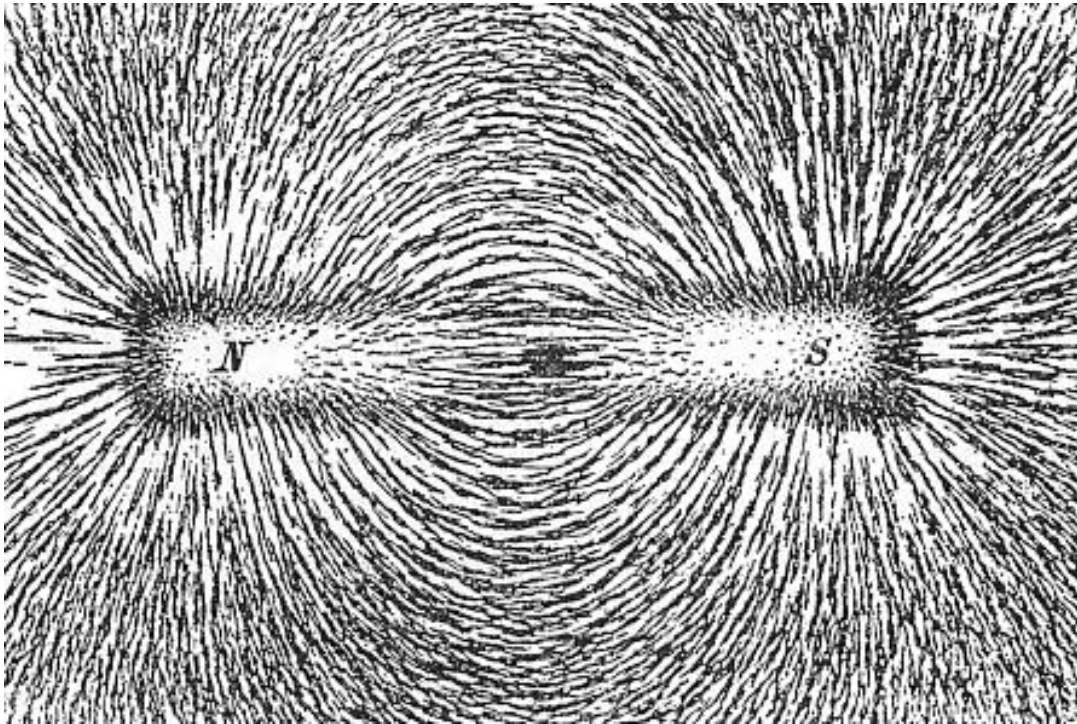


Orientação das linhas de campo magnético

Fonte:

http://s2.glbimg.com/YDk39Wlua7MHSWziuuFbgZnKs=/0x0:400x496/300x372/s.glbimg.com/po/ek/f/original/2013/08/26/magnetismo_fisica_enem_8.jpg

Figura 4



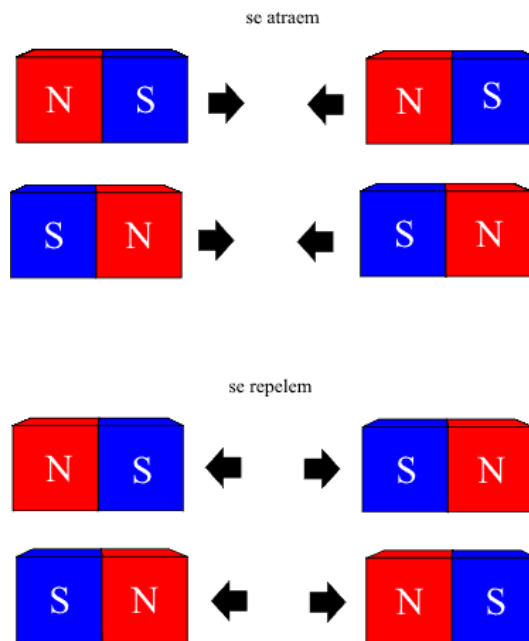
Linhas de campo em limalhas de ferro

Fonte: <http://portaldoprofessor.mec.gov.br/storage/discovirtual/aulas/1196/imagens/ima.png>

2.3.2 Atração e repulsão

Empiricamente, foi observado no manuseio de dois ímãs que existem quatro formas de interagi-los, criando forças de atração e repulsão, de acordo com a forma em que foram colocados. Isto se deve ao fato de que polos semelhantes se repelem e polos opostos se atraem.

Figura 5



Atração e repulsão entre os polos

Fonte : http://macao.communications.museum/por/exhibition/secondfloor/moreinfo/2_2_1_MagneticFields.html

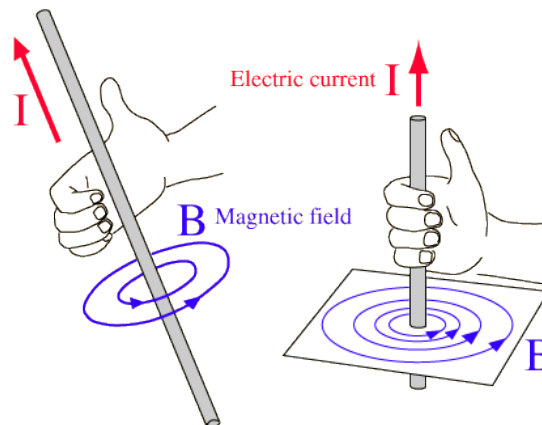
2.3.3 Inseparabilidade dos polos

Os polos magnéticos de um ímã são inseparáveis, ou seja, se uma pessoa cortasse um ímã ao meio, este ímã irá dar origem a dois novos ímãs, com dois polos cada um. Essa propriedade é decorrente das linhas de campo do ímã, que o atravessam mesmo em seu interior. Tais linhas dão a origem aos dois novos polos, sendo os polos definidos como Polo Norte quando as linhas se originam desse polo, e Polo Sul quando as linhas adentram ao material por esse polo.

2.4 Campo Magnético em um fio

Toda partícula eletricamente carregada, quando em movimento, produz um campo magnético a sua volta, sendo o sentido desse campo definido pela regra da mão direita. Sendo as linhas de campo concêntricas ao fio.

Figura 6



Campo magnético em um condutor

Fonte: http://fisica.ufpr.br/viana/fisicab/aulas2/a_24.htm

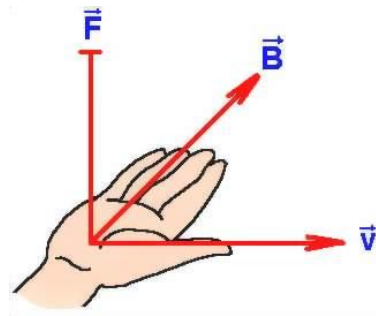
2.5 Força magnética

A força magnética pode ser definida como o resultado da interação entre dois corpos dotados de propriedades magnéticas, como ímãs ou cargas elétricas em movimento. Em se tratando de partículas elétricas, a força magnética passa a existir quando uma partícula eletricamente carregada q , passa a se movimentar em uma região do espaço onde atua um campo magnético $\vec{B}$. A força magnética resultante pode ser, segundo a lei de Lenz, matematicamente expressa por: $\vec{F}_{mag} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$.

O que nos possibilita chegar as seguintes conclusões:

- Se a partícula se movimenta na mesma direção do campo magnético, a força magnética resultante será nula.
- O maior módulo possível que esse vetor F pode adquirir, acontece quando a partícula se desloca em direção transversal à direção do campo magnético.

Figura 7



Força magnética

Fonte: http://2.bp.blogspot.com/_ASy3Yb_qbv8/TJTHSPuXAVI/AAAAAAAAAio/jX8y_7ErPks/s1600/regramao.jpg

3 ELETROMAGNETISMO

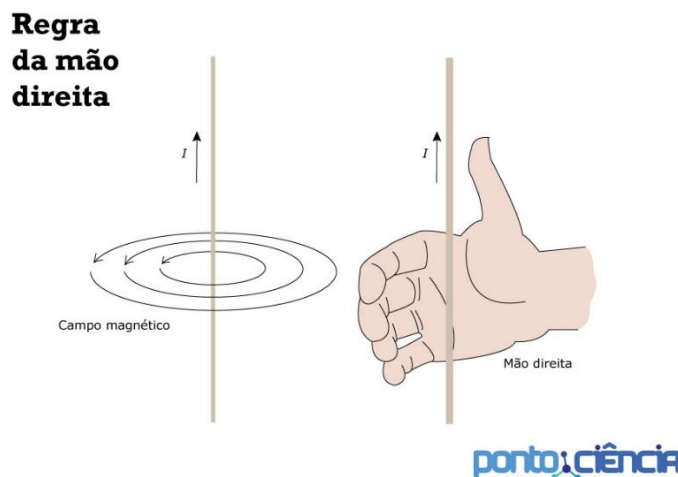
3.1 Campo magnético produzido por um fio condutor

Até certo ponto da história, o magnetismo e a eletricidade eram estudados separadamente. Esse estudo passou a ser unificado após Cristian Oersted ter comprovado a relação entre as duas matérias. Oersted aproximou uma bússola de um fio conduzindo corrente elétrica, e verificou que ela se orientava em um sentido diferente do sentido que ela assumia quando cessavam-se as correntes no fio.

Após muitos estudos, foi verificado que a corrente elétrica produz um campo magnético diretamente proporcional a intensidade de corrente. Isto significa que quanto mais intensa for a corrente, maior será a intensidade do campo magnético, o mesmo vale do contrário.

A orientação do campo magnético pode ser definida pela simples e empírica regra da mão direita, exemplificada em imagem abaixo.

Figura 8



Orientação do campo eletromagnético

Fonte: <http://objetoseducacionais2.mec.gov.br/bitstream/handle/mec/23236/Regra-da-mao-direita.jpg?sequence=1>

Após vários estudos, Ampère, através de sua lei nos permitiu determinar o módulo do campo magnético. A lei de Ampère ainda nos diz que “o vetor campo magnético é tangente as linha de campo magnético”. Dessa forma, o vetor campo

magnético sempre estará em uma direção perpendicular ao fio. O módulo do campo magnético pode ser dado pela seguinte equação:

$$B = \frac{\mu \cdot i}{2\pi \cdot R}$$

Sendo: $\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A}$

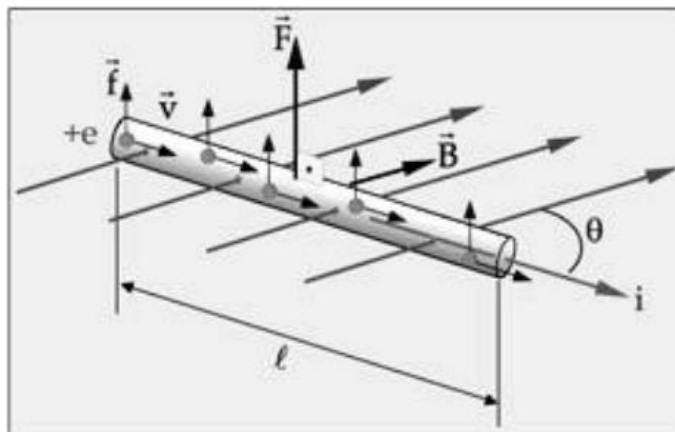
3.2 Força magnética sofrida por um fio condutor imerso em um campo magnético

A partir da lei de Lenz, sabendo que a corrente elétrica trata-se do movimento de partículas elétricas em um condutor, podemos chegar a outra fórmula importante no estudo do magnetismo:

$\vec{F}_{mag} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$; $v = l/dt$, e $i = q/dt$; substituindo temos:

$\vec{F}_{mag} = q \cdot (\frac{L}{dt} \times \vec{B})$, chegaremos a seguinte fórmula: $\vec{F}_{mag} = |L| \cdot (\vec{i} \times \vec{B})$

Figura 9. Força magnética em um fio condutor.



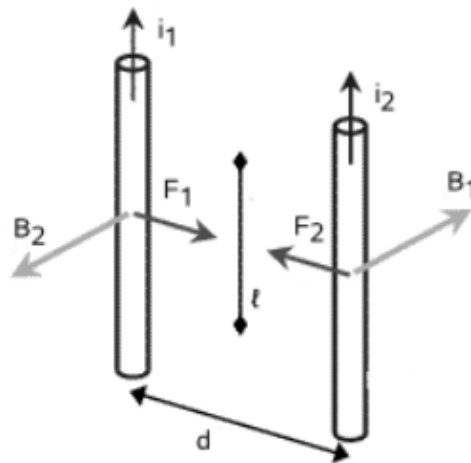
Força magnética em um fio condutor

Fonte: <http://www.sofisica.com.br/conteudos/Eletromagnetismo/ForcaMagnetica/fio.php>

3.3 Força magnética entre dois fios condutores

Quando dois fios condutores retilíneos são percorridos por corrente elétrica, há uma força magnética entre eles, cujo módulo e direção pode ser definido conforme demonstração a seguir.

Figura 10



Força magnética entre dois fios condutores

Fonte: <http://www.aulasdefisica.com.br/wp-content/uploads/2011/09/For%C3%A7a-Magn%C3%A9tica.pdf>

$$\vec{F}_2 = |L| \cdot (\vec{i} \times \vec{B}) = -\vec{F}_1 ; \text{ sendo o campo magnético definido por: } \vec{B} = \mu \cdot \vec{i} / 2\pi R$$

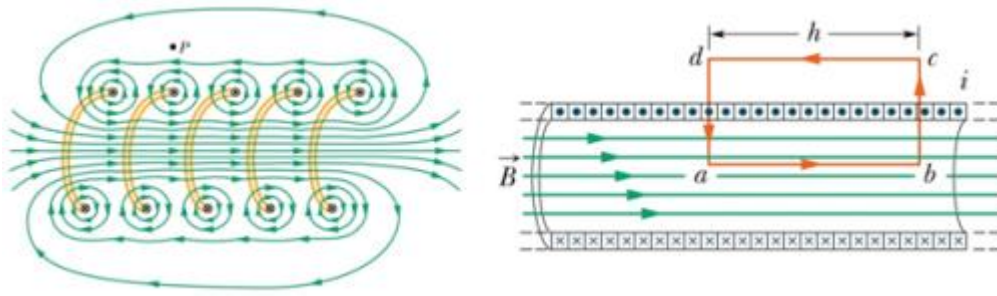
$$\text{Temos: } \vec{F}_2 = |L| \cdot (\vec{i}_1 \times \mu \cdot \vec{i}_2 / 2\pi R) = -\vec{F}_1$$

3.4 Campo magnético de um solenoide

Um solenoide pode ser definido como um fio condutor enrolado de forma helicoidal, percorrido por uma corrente elétrica i . O solenoide ideal possui o comprimento relativamente muito maior que o diâmetro do fio. Sua principal função é criar um campo magnético uniforme em seu interior. Sendo esse campo a soma vetorial dos campos magnéticos criado por cada uma das espiras, sendo o sentido desse campo definido pela regra da mão direita.

Aplicando a Lei de Ampere a um solenóide, com um número de espiras n , percorrido por uma corrente i , conforme a figura abaixo:

Figura 11



Campo magnético no interior de um solenoide

Fonte: <https://donaatraente.wordpress.com/enquadramento-teorico/campo-magnetico/campo-magnetico-de-um-solenoide-e-de-uma-bobina-toroidal/>

Temos:

Figura 12

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 i_{enc}$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \int_a^b \vec{B} \cdot d\vec{s} + \int_b^c \vec{B} \cdot d\vec{s} + \int_c^d \vec{B} \cdot d\vec{s} + \int_d^a \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

$$i_{enc} = i(nh)$$

$$Bh = \mu_0 i n h$$

$$B = \mu_0 i n$$

Fórmula do campo magnético no interior de um solenoide

Fonte: http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/mod09/m_s05.html

Um magneto, ou eletroímã, nada mais é que uma bobina com uma material ferromagnético em seu interior, afim de melhor conservar o campo magnético.

3.5 Energia Magnética

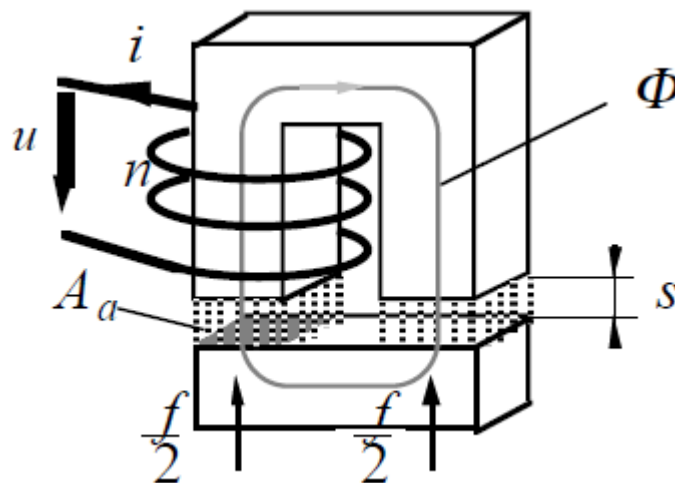
A energia magnética, por definição, é a energia presente na oposição de dois polos iguais, que criam uma força repelente entre eles. Caso os ímãs fossem combinados em polos diferentes, haveria uma atração em um ciclo contínuo. No

entanto, colocando os ímãs em combinação de polos iguais, haverá uma repulsão entre eles. Logo, é perceptível uma energia que impossibilita a junção dos polos.

Ao observarmos o campo magnético no interior da bobina u , produzido pela corrente i ; notaremos que sua orientação segue conforme a seta cinza da imagem, com fluxo constante, por estar no interior de um material ferromagnético. Sendo H a intensidade do campo magnético, B a densidade do fluxo (A qual é diretamente dependente da intensidade do campo $B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$), e V o volume do objeto em análise, temos a energia magnética do objeto dada pela seguinte fórmula:

$$E = (B \cdot H \cdot Vol)/2$$

Figura 13



Magneto

Fonte: http://mcemechanical2006.pbworks.com/f/AMB-chances_and_limit.pdf

Considerando a área atravessada pelas linhas de campo expressa pelo termo A_a , S o comprimento de uma seção qualquer retirada desse magneto, podemos aplicar a fórmula, obtendo a seguinte expressão:

$$E = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot B \cdot H \cdot A_a \cdot S$$

Nesse contexto, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am, sendo a permeabilidade magnética do vácuo. Além disso, μ_r trata-se da permeabilidade magnética relativa do meio em que ao campo magnético atua. Possuindo, portanto, valor 1 no vácuo e também aproximadamente no ar. No entanto, em materiais ferromagnéticos, onde μ_r é

geralmente muito maior que 1, o loop das linhas de campo se concentra no núcleo no material.

3.6 Histerese e Saturação

Histerese pode ser, de forma sucinta, definido como a tendência de um material, ou um sistema, de conservar suas propriedades na ausência de um estímulo que as gerou.

3.6.1 Histerese magnética

O comportamento de materiais ferromagnéticos pode ser visualizado no diagrama B-H abaixo, demonstrando o comportamento dos fenômenos de histerese e saturação.

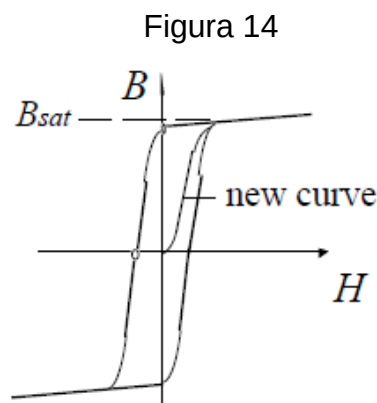


Figure 3. B-H diagram, hysteresis loop, saturation

Gráfico histerese x Densidade de Fluxo

Fonte: http://mcemechanical2006.pbworks.com/f/AMB-chances_and_limit.pdf

Quando um material é submetido a um campo magnético H que o leve até seu ponto de saturação B_{sat} , isto é, até o ponto em que um aumento no campo não produz um aumento na densidade de fluxo; a densidade de fluxo não diminui da mesma maneira que o campo. Assim, quando o campo chega ao seu valor nulo, ainda existe uma densidade de fluxo remanescente. Para que a densidade B chegue a zero, se

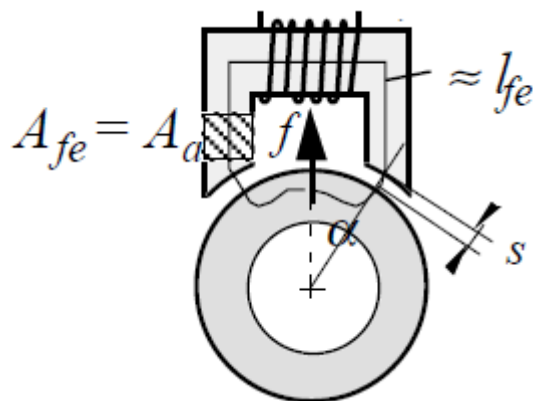
faz necessário a aplicação de um campo em sentido oposto ao primeiro, conhecido por força coercitiva. Se o campo coercitivo continuar aumentado no sentido oposto, o material se torna magnetizado com polaridade oposta, aumentando-se o campo, o material fica novamente saturado, mas dessa vez no sentido oposto. Ao fenômeno causador do atraso entre a densidade de fluxo e campo magnético é chamado de histerese magnética.

Ao se observar a figura 13, pode-se perceber duas curvas de magnetização diferentes partindo de cada ponto de saturação. Tais curvas são conhecidas por ciclo de histerese.

4 LEVITAÇÃO MAGNÉTICA DE EIXOS ROTATIVOS

Conforme foi dito no decorrer do capítulo 2, existe uma energia magnética responsável pela força magnética entre dois corpos. A levitação magnética consiste, em sua essência, em utilizar essa força em sentido oposto a força gravitacional, a fim de fazer com que o somatório das forças resultantes em um corpo seja nula.

Figura 15



Força de levitação em um mancal magnético

Fonte: http://mcemechanical2006.pbworks.com/f/AMB-chances_and_limit.pdf

Considerando da figura acima, A_a como a área do ímã presente, S a distância entre o ímã e o eixo, podemos encontrar a energia magnética presente no espaço entre o ímã e eixo descrita pela fórmula abaixo:

$$E = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot B \cdot H \cdot A_a \cdot S$$

Sendo H a intensidade do campo magnético em S , e B a densidade de fluxo, também em S .

Como a força f é proveniente dessa energia, pode-se calcular a força resultante, derivando-se a energia. No entanto, não se deve ser esquecido que a força provem de dois espaços de ar. Logo, o volume deve ser multiplicado por dois, o que nos permite chegar as seguintes expressões:

$$E = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot B \cdot H \cdot A_a \cdot 2S = B \cdot H \cdot A_a \cdot S$$

$$f = \frac{dE}{ds} = \frac{d(B \cdot H \cdot A \cdot S)}{dS} = \frac{B^2 A_a}{\mu_0}$$

Com isso, conseguimos explicar que a levitação magnética pode ocorrer em função de uma força que se opõe a força gravitacional. Sendo essa força dependente da densidade de fluxo magnético no espaço entre o eixo e a base, e da área no mesmo espaço.

5 MANCAIS MAGNÉTICOS

Mancais magnéticos são dispositivos utilizados em substituição aos mancais mecânicos e hidráulicos, tendo como a principal vantagem a inexistência de contato entre o eixo e a base de apoio. Com a falta de contato, foram eliminados os problemas de atrito, superaquecimento das peças, limitações quanto ao uso de lubrificantes, entre outros.

Basicamente esses mancais podem ser divididos em duas categorias, de acordo com a origem do campo magnético responsável pela levitação do eixo. São classificados em mancais magnéticos passivos (MMP ou PMB do inglês passive magnetic bearings) e mancais magnéticos ativos (MMA ou AMB do inglês active magnetic bearings).

5.1 Mancais magnéticos passivos

Os MMP's possuem como fonte de magnetismo ímãs permanentes. Como principal vantagem desse tipo de mancal temos a auto sustentabilidade, isto é, não necessita de nenhuma energia externa para seu funcionamento. No entanto, devido à sua densidade de fluxo ser constante (Em função dos campos provenientes dos ímãs serem constantes), esse tipo de mancal não consegue manter o eixo flutuando de forma estável, pois, conforme forças externas agem sobre estes, a resultante das forças se modifica, uma vez que a força de levitação é constante.

5.2 Mancais magnéticos ativos

Os MMA's possuem um sistema de funcionamento muito mais complexo, porém muito mais aplicável. Sua fonte de magnetismo tratam-se de eletroímãs, que, por sua vez, conseguem produzir campos magnéticos muito mais intensos que os ímãs naturais. Daí vem um dos motivos de sua maior aplicabilidade: suportam eixos de maiores peso e esforços.

A fim de explicar o funcionamento desse tipo de mancal, faremos algumas considerações:

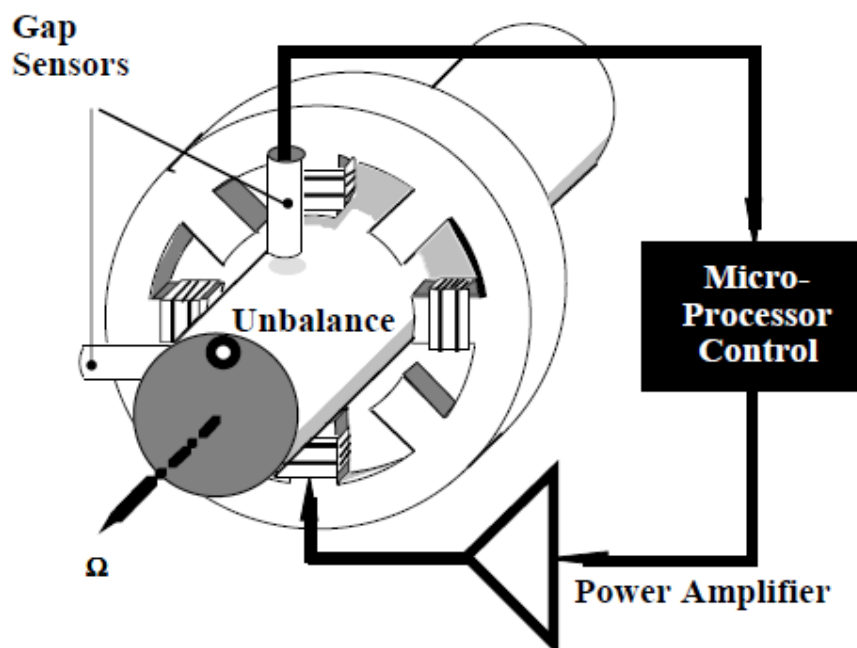
- a) Os níveis de densidade de fluxo magnético estarão sempre em valor inferior ao de saturação do material;
- b) Os movimentos oscilatórios do eixo são sempre pequenos comparados com o tamanho da folga entre o mancal e o eixo;

- c) A distribuição de fluxo magnético na seção transversal do pólo do estator pode ser considerada uniforme;
- d) A perda de corrente elétrica é pequena.

Sendo o estator a parte fixa do mancal, que não acompanha o movimento rotativo do eixo.

5.2.1 Composição básica de um mancal magnético ativo

Figura 16



Composição de um mancal magnético

Fonte: http://mcemechanical2006.pbworks.com/f/AMB-chances_and_limit.pdf

Os MMA's são compostos basicamente eletroímãs, a fim de causar a levitação do eixo, sensores de intervalo (Gap sensors), os quais visam medir o espaço entre os eletroímãs e o eixo. Ainda sobre a estrutura dos mancais, pode-se afirmar que os eletroímãs se distribuem de forma radial e simetricamente em relação ao eixo rotativo. Isso para que seja possível uma compensação de esforços em todos os sentidos radiais, reduzindo as vibrações.

Figura 17



Disposição dos magnetos

Fonte: http://mcemechanical2006.pbworks.com/f/AMB-chances_and_limit.pdf

5.2.2 Funcionamento dos mancais magnéticos ativos

Os MMA's possuem em seu funcionamento duas correntes. A primeira, circulante apenas em alguns magnetos, é chamada de corrente de sustentação. A qual visa vencer a força gravitacional sobre o eixo, mantendo-o levitando, porém não evitando o efeito de vibração. Devido ao problema desses mancais não exercerem a função de levitação do eixo em caso de falta de energia, na grande maioria dos mancais ativos existem ímãs permanentes dispostos radialmente a fim de manter o eixo levitando em caso de falta de energia elétrica. Evitando, assim, que o eixo repouse em movimento sobre os mancais, danificando estes permanentemente.

A segunda corrente, trata-se de uma corrente de vibração, que visa aumentar ou reduzir a corrente de sustentação, a fim de manter o eixo em uma posição fixa, sem que haja qualquer tipo de vibração. Com valor muito inferior, essa corrente é determinada por um sistema automático, que recebe o sinal elétrico do sensor de intervalo.

O sistema de controle de vibração geralmente é composto por um controlador PID (Controlador proporcional integral), que realiza ações derivativas e integrativas. O controlador recebe o sinal do sensor Gap, analisa o espaço e os valores anteriores deste, observando as vibrações do eixo. A partir dessa análise, com o uso

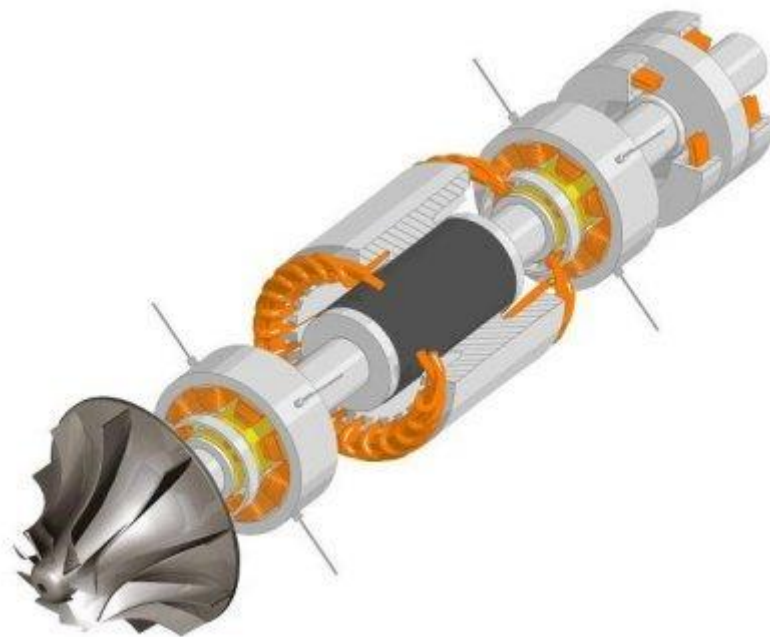
de sinais PWM (Pulsed width modulation- Modulação por largura de pulso) o controlador envia um sinal de resposta a fim de aumentar ou diminuir a intensidade do campo magnético dos eletroímãs. No entanto, como o sinal enviado pelo controlador possui baixo valor de potência, é utilizado um amplificador de potência para que a corrente de vibração seja eficaz ao atuar no magneto.

6 APLICAÇÕES

As aplicações mais comuns para os mancais magnéticos ativos são em máquinas de rotação elevada. No entanto, ultimamente esta tecnologia vem sendo aplicada no controle ativo de vibrações e sistemas de alta precisão, devido aos avanços tecnológicos oriundos de pesquisas. Dentre algumas das aplicações dos MMA, podem ser citadas:

- a) *Aplicações em turbomáquinas:* compressores e turboexpansores correspondem a uma das principais aplicações de MMA em turbomáquinas na atualidade. Neste tipo de aplicação, os MMA oferecem uma melhor eficiência, uma redução do peso global e elimina sujeiras que seriam provocadas pelos sistemas de lubrificação não existentes nesta tecnologia.
- b) Turboexpansores equipados com MMA alcançam potência de 68 a 6.300 kW, com velocidades que variam de 7.200 a 60.000 rpm.

Figura 18



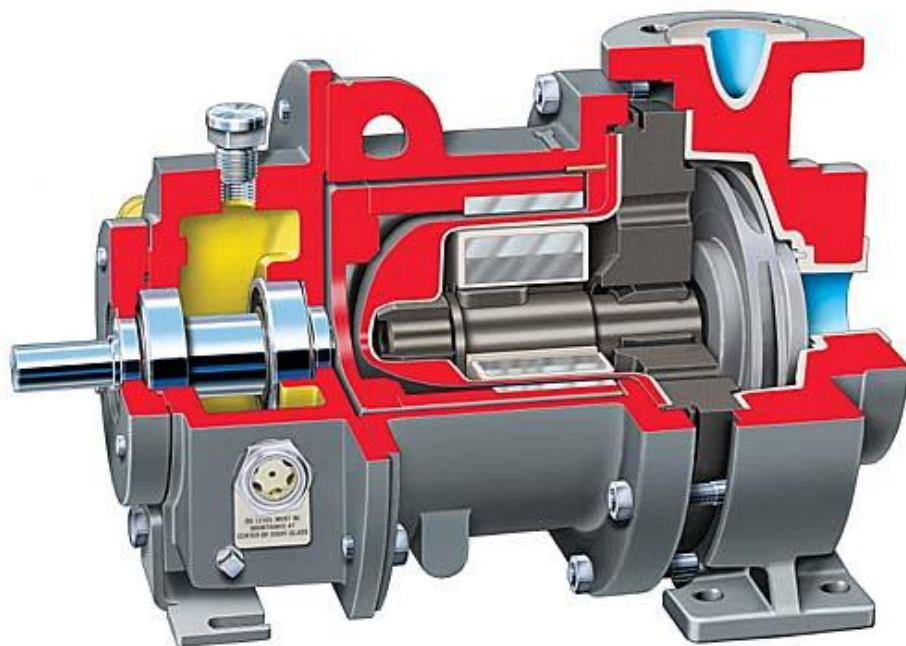
Turbobomba com mancal magnético

Fonte: http://www.fem.unicamp.br/~lotavio/tgs/2011_Projeto%20de%20estabiliza%C3%A7%C3%A3o%20ativa%20para%20mancal%20magn%C3%A9tico%20passivo_TG2_ReinaldoDantas.pdf

- c) *Aplicações em bombas:* bombas compreendem outra classe de equipamentos beneficiados pela tecnologia dos MMA. Allaire (1989) e Imlach (1990)

apresentaram detalhes do projeto de uma motobomba de 20 HP e rotação de 3.600 rpm apoiada por MMA. Este tipo de bomba não requer retentores porque possui um dispositivo entre o rotor e o estator, permitindo um arranjo hermeticamente lacrado. Estas bombas são aplicadas onde o fluido de trabalho é altamente tóxico ou quando há dificuldade de contê-lo. Nestas bombas, os mancais convencionais devem ser lubrificados com óleo, e isto resulta em uma vida curta dos mancais e parada constante da bomba para que seja feita a manutenção, podendo ainda resultar na liberação do fluido altamente tóxico.

Figura 19



Bomba com mancal magnético

Fonte: http://www.fem.unicamp.br/~lotavio/tgs/2011_Projeto%20de%20estabiliza%C3%A7%C3%A3o%20ativa%20para%20mancal%20magn%C3%A9tico%20passivo_TG2_ReinaldoDantas.pdf

- d) *Bombas turbomoleculares*: são usadas para que se atinja um ambiente de alto vácuo para a fabricação de semicondutores. Mancais convencionais de rolamento têm se mostrados inadequados em muitas bombas deste tipo, pois podem contaminar o ambiente a vácuo com vapores provenientes do óleo de lubrificação que se aquece. Também podem apresentar baixa vida útil devido

às altas velocidades de operação. Algumas bombas turbomoleculares são projetadas para trabalhar com gases corrosivos e os sistemas de MMA permitem uma maior segurança operacional do que os mancais convencionais.

- e) *Controle ativo de vibrações*: os mancais magnéticos, pela sua natureza de apresentar um controle ativo, o qual proporciona a capacidade de criar forças e corrigir a posição do eixo milhares de vezes por segundo, podem ser usados com muita eficiência no controle ativo de vibrações. Isso pode ser feito através de forças adicionais atuando sobre o sistema, que irão eliminar as vibrações ao longo do rotor através dos mancais magnéticos ativos. Foi estudado um sistema de controle ativo de ruído provocado por um ventilador de fluxo axial usando mancais magnéticos ativos. A estratégia de controle ativo empregada funciona analogamente a um sistema de controle que utiliza um alto-falante para contrapor à fonte de ruído indesejado.
- f) *Motores sem mancais mecânicos*: uma das mais importantes linhas de pesquisas que está em desenvolvimento atualmente é a dos motores sem mancais. Com um único esquema de controle, a rotação e a levitação podem ser comandadas em um motor sem mancal. Estudos nesta área podem ser vistos no trabalho de Rodrigues (2005), onde o controle de velocidades de um motor mancal é analisado, com esta arquitetura de motor o torque aumenta pelo fato de não se utilizar os mancais mecânicos.
- g) *Aplicações biomédicas*: duas das mais promissoras aplicações dos MMAs são em bombas cardíacas e em corações artificiais projetados para pessoas que necessitam de aparelhos para manter suas funções cardíacas em pleno funcionamento. Como nas turbomáquinas apresentadas, o uso dos MMA nesta área elimina os problemas associados com a lubrificação que seria utilizada em mancais convencionais. Muitas das bombas de sangue e corações artificiais convencionais consistem basicamente em bombas centrífugas suportadas por mancais de rolamento. Frequentemente, estes mancais são lubrificados com o próprio sangue, para que não haja risco de contaminação com o uso de outros lubrificantes. Porém, além do sangue ser um pobre lubrificante, as esferas do rolamento tendem a danificar as células sanguíneas, causando problemas de coagulação para os pacientes. Muitos

grupos de pesquisa estão investigando a aplicação dos MMA em dispositivos cardíacos.

- h) *Pesquisas em máquinas ferramentas*: o aumento da dureza e da força em máquinas ferramentas que poderiam utilizar os sistemas de MMAs, bem como o controle ativo de vibrações para reduzir a trepidação da ferramenta, estão também em análise em pesquisas recentes. Além disso, esforços para se obter melhores métodos para manter o sistema estável sobre uma gama de processos de corte e para a variação das ferramentas de corte são também importantes tópicos de pesquisa
- i) *Sistemas de armazenamento de energia*: uma outra aplicação na qual a sua existência é facilitada pela tecnologia dos mancais magnéticos ativos é o armazenamento de energia em sistemas de volantes (*flywheel system*). É como se fosse uma espécie de giroscópio para armazenamento de energia. Para isso, os MMA permitem que se atinjam altas velocidades com baixa perda de potência, comparados com os mancais convencionais. Estes sistemas estão sob desenvolvimento para uso em suprimentos de energia ininterruptos em equipamentos estacionários, em aplicações móveis tais como veículos elétricos híbridos e na substituição de baterias em aplicações espaciais. Gaechter (2004) propõe alguns métodos de redução das perdas relacionadas às correntes de controle que ocorrem em *flywheels*, aumentando a eficiência deste sistema de armazenamento de energia.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho de pesquisa demonstrou o funcionamento dos mancais magnéticos, com enfoque nos princípios físicos que garantem o funcionamento destes.

Dado ao exposto, pode-se concluir, que além de inovadores, os mancais magnéticos são uma ótima opção de tecnologia para novos desenvolvimentos. Além de resolverem os problemas relativos a atrito, qualidade e necessidade de lubrificantes, esses equipamentos possuem um baixo consumo energético, se comparados aos sistemas usuais de lubrificação; o que implica em uma maior rendimento e economia com o uso de mancais magnéticos.

Em relação ao controle de vibrações do eixo, muito ainda tem de ser desenvolvido, principalmente nos quesitos de velocidade de processamento e atuação dos sistemas, no entanto, para a grande parte aplicações presentes, a vibração não tem sido um problema.

Outro aspecto a ser observado é o alto custo de aquisição dos mancais magnéticos. Porém, devido ao seu baixo custo operacional, trata-se de um ótimo equipamento para uso a longo prazo. Sendo, portanto, viável apenas para equipamentos permanentes, cujo projeto vise uma longa vida útil do material.

REFERÊNCIAS

- [1] SCHWEITZER, Active magnetic bearings - chances and limitations, Disponível em <http://mcemechanical2006.pbworks.com/f/AMB-chances_and_limit.pdf>
- [2] HISTORY OF MAGNETIC BEARGINS, Disponível em <<http://www.magneticbearings.org/technology-2/history-of-magnetic-bearings/>>, acesso em 12 Jul. 2015.
- [3] PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DOS MATERIAIS, Disponível em <<http://www.mundoeducacao.com/fisica/propriedades-magneticas-dos-materiais.htm>>, acesso em 15 Jul. 2015.
- [4] MAGNETISMO, Disponível em <<http://eletromagnetismo.info/magnetismo.html>>, acesso em 17 Jul. 2015.
- [5] MAGNETIC FIELDS, Disponível em <http://macao.communications.museum/por/exhibition/secondfloor/moreinfo/2_2_1_MagneticFields.html>, acesso em 21 Jul. 2015.
- [6] ENERGIA MAGNETICA, Disponível em <http://fisica.ufpr.br/viana/fisicab/aulas2/a_24.htm>, acesso em 22 Jul. 2015.
- [7] MANCAIS MAGNÉTICOS, Disponível em <<http://www.aulasdefisica.com.br/wp-content/uploads/2011/09/For%C3%A7a-Magn%C3%A9tica.pdf>>, acesso em 30 Jul. 2015.
- [8] FLUXO DE CAMPO MAGNETICO, Disponível em <http://efisica.if.usp.br/elettricidade/basico/campo_magnetico/fluxo_magnetico/>, acesso em 4 Ago. 2015.

