

SIMULAÇÃO DE UM MANCAL MAGNÉTICO PARA APLICAÇÕES EM RODAS DE REAÇÃO

Maria Carolina Camargo Marcatto ¹; Rodrigo Alvite Romano ²

¹ Aluna de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

² Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

Resumo. *O trabalho visa a simulação de um mancal magnético para a aplicação em rodas de reação. Com base na técnica de elementos finitos, caracterizou-se o comportamento de forças axiais e radiais em função de variáveis de projeto e da topologia do mancal. Obteve-se uma topologia mais eficiente, se comparada com a proposta inicialmente. Os testes realizados sugerem uma diferença de importância em como os parâmetros influenciam nas forças existentes no mancal.*

Introdução

O emprego de sistemas de controle de atitude em 3 eixos tem se tornado comum nas missões espaciais, em virtude da alta confiabilidade atual dos sensores e atuadores, aliada à crescente queda nos preços dos equipamentos, incluindo o computador de controle, e reuso dos programas embarcados. Entre as diversas possibilidades de atuação em 3 eixos, destaca-se aquela formada por 3 ou 4 rodas de reação, que provêm torque num grande intervalo, além de serem alimentadas com energia renovável gerada pelos painéis solares. Uma roda de reação é composta por um volante de alta inércia posto a girar sob a ação de um motor elétrico. Dosando-se a corrente elétrica no motor consegue-se acelerar ou desacelerar o volante, e, por reação, um torque contrário é aplicado ao satélite [1].

A suspensão do rotor com relação ao estator representa uma parte crítica em rodas de reação [2], devido às consequências de qualquer fricção no movimento relativo entre estes dois componentes. Com efeito, a fricção se traduz não apenas em um maior consumo de potência elétrica, como também na introdução de uma zona morta de atuação em torque, bem como na limitação da vida útil da roda de reação devido ao gradual desgaste do mancal. Uma solução mecânica para a interface entre o rotor e o estator é o mancal por rolamento. Apesar das dificuldades com lubrificação e comportamento não-linear, essa tecnologia é considerada madura e bem estabelecida, visto que não mudou substancialmente ao longo dos últimos 20 anos. No entanto, a aplicação da tecnologia de suspensão magnética para rodas de reação têm sido intensamente pesquisada, por ser uma alternativa técnica promissora para o mancal por rolamentos, com algumas características muito atraentes [3].

Mancais magnéticos podem oferecer vantagens distintas como o desgaste praticamente nulo e perdas por atrito extremamente baixas. Eles não sofrem efeitos do atrito estático, comuns nos rolamentos mecânicos, tornando-os candidatos ideais para missões no espaço profundo com longos períodos de hibernação, requisitos de longa vida útil e largas faixas de temperatura de operação. Além disso, eles são altamente adequados para fins de apontamento fino em missões de satélites geoestacionários em que rodas com rolamentos convencionais podem limitar a vida útil de satélite. As missões de observação da Terra e científicas também podem ser claramente beneficiadas por seus baixíssimos níveis de vibração [4]. A principal contrapartida é a adição de uma malha de controle para a suspensão eletromagnética. Além disto, o ganho de eficiência trazido pela ausência de fricção também é contrabalanceado, ao menos parcialmente, pelo consumo de potência dos atuadores deste tipo de mancal.

Revisão Bibliográfica

Um mancal completamente passivo em seus seis graus de liberdade não é concebível, ou seja, ao menos um de seus eixos deve ser controlado ativamente. Conforme ilustrado na Figura 1 da esquerda para a direita, os mancais magnéticos descritos na literatura possuem 1, 2 ou 5 graus de liberdade ativos [5].

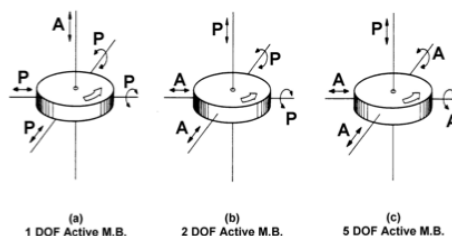


Figura 1 - Configurações de mancais magnéticos: P e A denotam eixos passivos e ativos, respectivamente.

As características de cada topologia são descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens das topologias de mancal magnético em função da quantidade de ° de liberdade ativos.

Graus de liberdade ativos	Características
1(axial)	Aparato eletrônico simples e requer baixo consumo, mas implica em dimensões axiais elevadas, construção mecânica complexa e o amortecimento das oscilações radiais é passivo.
2 (ambos radiais)	Rigidez elevada no eixo radial (devido ao controle ativo), construção simples e pequena altura axial.
5	Sistema complexo, portanto, menos confiável do que as demais opções, no entanto, oferece a capacidade de se controlar a orientação do vetor de momento angular (<i>vernier gimbaling</i>). Precauções especiais são necessárias para testes de laboratório.

Com o objetivo de criar uma roda de reação para satélites de pequeno porte, em [4] adotou-se a topologia de mancal com dois de seus graus de liberdade (as direções radial e ortogonal) controlados independentemente (ver Figura 2). Com exceção da rotação do rotor, as demais orientações são controladas passivamente. Essa configuração possui alta confiabilidade e um baixo consumo de energia, pois a quantidade de eletrônica envolvida é reduzida. Além de um elevado torque de impulso e uma geometria mais plana, reduzindo seu volume e possibilitando sua montagem em painel. A força nos eixos passivos é gerada por ímãs permanentes de terra rara NeFeBr (posicionados no estator) que possuem uma alta densidade de energia, pois produzem uma grande parte do fluxo magnético.

Forças externas agem sobre o mancal de modo a variar o entreferro. Nos mancais com controle ativo do eixo radial, a posição do entreferro é controlada usando a informação dos sensores, por meio de bobinas. Os sensores de posição medem a distância entre o estator e o rotor (entreferro), que deve ser mantida dentro de valores de referência durante a operação da roda de reação. É possível escolher dentre sensores capacitivos, sensores óticos, sensores Hall, ultrassom e sensores indutivos. Na proposta de [4] adotaram-se quatro sensores indutivos posicionados com um espaçamento de 90 °. As razões que motivaram essa escolha são: tamanho físico, alta resolução, curto deslocamento de fase, excelente estabilidade de temperatura e boa durabilidade.

A modelagem e implementação de mancais magnéticos são áreas férteis para pesquisas em todo o mundo. No entanto, no contexto de rodas de reação, a tecnologia levitação magnética ainda é pouco explorada no país. A modelagem de um mancal magnético

ativo (MMA) pode ser baseada em equações diferenciais [5]. No entanto, devido as não linearidades do mancal magnético (por exemplo, sua rigidez em função do deslocamento), a modelagem analítica é de difícil obtenção e uma análise por elementos finitos é recomendada [3]. O software COMSOL *Multiphysics*[®] nos permite realizar análises multidisciplinares baseadas em tais equações. Esta ferramenta permite a resolução das equações usando método de elementos finitos, juntamente com a opção de fornecer a granulometria do material. Além disto, é possível distinguir as propriedades geométricas reais do MMA a ser estudado, como também o material proposto. Além de possibilitar inúmeros tipos de análise como, por exemplo, análise estacionária e modal [5].

O mancal magnético ativo pode possuir diferentes topologias. Existem basicamente duas: uma proposta por Bernus [6] e outra por Scharfe [7]. A de Bernus, com dois graus de liberdades ativos, possui ímãs permanentes no rotor e dois estatores: um interno com bobinas para o controle do fluxo magnético no rotor (por consequência na posição radial) e outro externo para estabilização axial e por contribuir com a rigidez radiais.

Nessa topologia, vista na Figura 2, um fluxo magnético contínuo é gerado no rotor por ímãs permanentes instalados nele, as bobinas instaladas no estator interno conseguem gerar campos aditivos e subtrativos no rotor (dependente do sentido da corrente). Se o campo for aditivo, consegue-se aumentar a rigidez do eixo axial, caso o campo for subtrativo, consegue-se diminuir ambas rigidezes, tornando assim mais fácil o deslocamento radial do rotor [6].

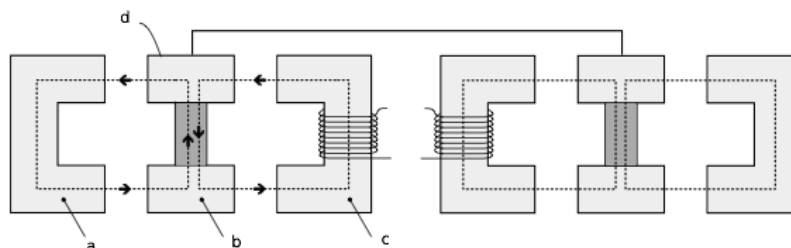


Figura 2 – Topologia de Bernus. a) estator externo; b) rotor; c) estator interno; d) ímãs permanentes [6].

Na topologia proposta por Scharfe, como ilustrado na Figura 3, há somente um estator e ímãs permanentes são dispostos no estator. Com essa arquitetura é possível utilizar as bobinas tanto para exercer uma força atrativa no rotor, quanto para tornar a sua rigidez mais branda, atenuando assim a rigidez radial do rotor. Deste modo, é possível também aumentar a rigidez axial por inserir um fluxo positivo em ambas as bobinas, esse fluxo soma-se com o fluxo do gerado pelos ímãs permanentes [7].

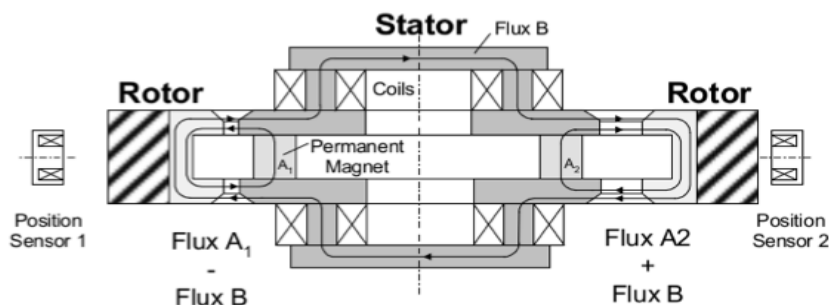


Figura 3 – Topologia de Sharfe [7].

O mancal considerado possui dois de seus graus de liberdade controlados ativamente: suas direções radial e ortogonal. O restante deles fica sendo passivamente controlados, com exceção da rotação do motor. Referente à sua topologia pode-se afirmar que este trabalho é em partes uma junção das topologias explicadas acima [3]. O modelo inicial (que inclui a topologia e características de construção) foi concebido por pesquisadores da marinha do

Brasil (CTM – Centro Técnico da Marinha). Foram feitas simulações preliminares para a obtenção desse modelo inicial.

O mancal é constituído basicamente por dois estatores e um rotor. Imãs permanentes são instalados no estator externo e bobinas eletromagnéticas são dispostas no interno. Os imãs permanentes escolhidos foram de terra rara neodímio. Testes preliminares foram feitos com imãs de samário-cobalto e de neodímio, e esse último foi escolhido por conta de sua maior densidade de energia. Os imãs produzem uma grande parte do fluxo magnético que circula pelo rotor e estabiliza o eixo axial. A Figura 4 ilustra da topologia escolhida.

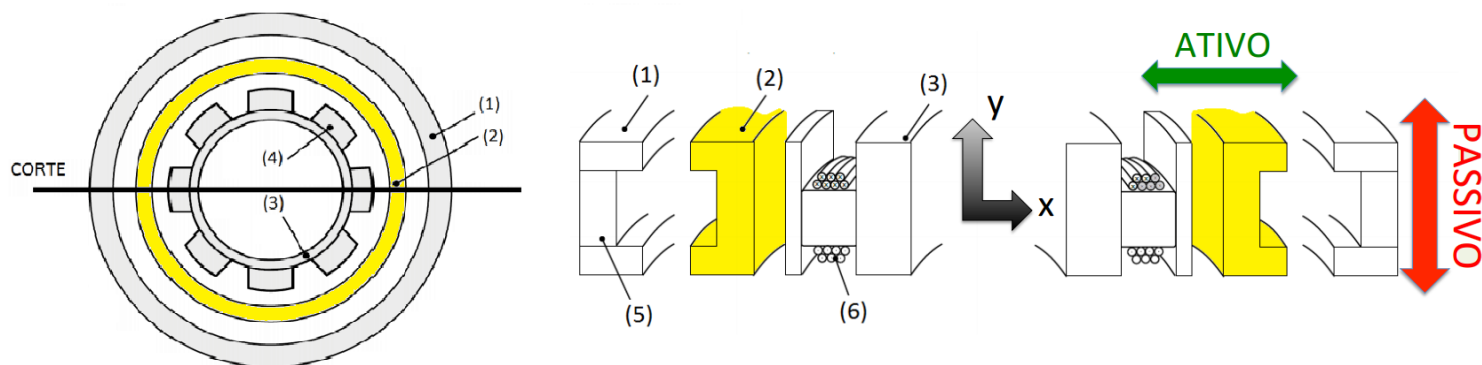


Figura 4- Topologia do mancal escolhido. (1) estator externo; (2) rotor; (3) estator interno; (4) núcleo das bobinas; (5) ímãs permanentes; (6) bobinas.

O estator externo é responsável pela estabilização dos graus de liberdade passivos já o interno possibilita o controle das posições radiais. Optou-se por instalar os ímãs no estator externo visando um maior fluxo magnético nos modos passivamente estáveis do mancal, de modo a obter uma maior rigidez no eixo axial. Futuramente um motor será conectado ao rotor. Verifica-se que foi adotada uma geometria plana visando uma melhor rigidez nos modos instáveis do mancal, além de possibilitar a montagem em modo painel.

Vale ressaltar que algumas características desejáveis para um mancal são: uma força na direção do eixo x (F_x) muito pequena, pois assim facilitaria o controle das bobinas, uma vez que teriam de exercer menos força, i.e., energia, para estabilizar o mancal. Já na direção do eixo y (F_y) uma força muito grande, pois ele ficaria mais estável passivamente. Além de um baixo volume, que implicaria em uma roda de reação mais leve.

Materiais e Métodos

Basicamente três testes foram realizados. O primeiro tem como objetivo a validação das características dos materiais a serem usados na construção física do mancal, ou seja, se os materiais escolhidos no simulador correspondem aos materiais que foram utilizados no protótipo. Isso implica que as forças encontradas por meio de simulações equivalem às forças encontradas no protótipo.

Um segundo teste foi realizado com o auxílio do software para decidir as dimensões do estator externo e rotor, e consequentemente dos ímãs. Essa simulação foi necessária visto que as dimensões influenciam no fluxo magnético existente no mancal e por sua vez nas forças existentes (F_x e F_y).

O terceiro teste também foi feito com o auxílio de simulações para definir algumas dimensões do estator interno. O foco dessa simulação é o dimensionamento das bobinas, a quantidade de voltas e camadas de voltas das bobinas depende das dimensões, e consequentemente, a força a ser obtida quando se aplica uma corrente na bobina. Na simulação foi aplicada uma corrente de 4 A em apenas uma bobina. Esse valor foi escolhido por conta de simulações anteriores. Aplicando-se uma corrente na bobina é criada uma força que atrai o rotor para o estator interno. Essa força deve ser capaz de superar a força criada pelo fluxo magnético entre o estator externo e o rotor.

Validação das características dos materiais

O teste para a validação das características dos materiais foi feito da seguinte maneira. O objetivo foi a obtenção da força eletromagnética do imã. O imã foi colocado em uma balança, em seguida esta foi tarada, e depois foi aproximada uma placa de ferro presa por fios de nylon em suas extremidades com o auxílio de araldite. Um suporte adequado para prender o nylon e, conseqüentemente, a placa foi escolhida. Pedacos de madeira e metal foram previamente cortados para auxiliar na elevação da placa de ferro durante o experimento. Sendo eles possuidores de medidas específicas e predeterminadas para facilitar o andamento do ensaio. Com isso o imã é atraído e a balança revela a diferença de peso. A Figura 5 exemplifica o que ocorreu.

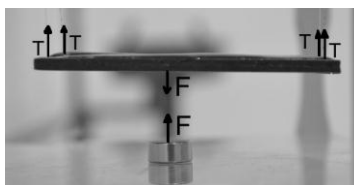


Figura 5 – Desenho esquemático do experimento do ímã.

O ímã usado possui 15 mm de diâmetro e 3 mm de espessura. Uma balança adequada foi disponibilizada para o ensaio. Seu modelo é AY220, com uma precisão de 0,001g. A simulação consegue estimar a força de atração existente entre o ímã e a placa de ferro. Essa força é dada em newtons. Para que a comparação entre elas fique mais fácil decidiu-se colocar tudo em newtons.

É importante ressaltar que a magnetização do neodímio e do samário-cobalto possuem valores diferentes 10^6 A/m, 82×10^4 A/m respectivamente. Ambos os dados foram devidamente colocados no software para gerar os resultados desejados.

Simulação para se obter as características do estator externo e rotor

No segundo teste realizado foram escolhidos quatro parâmetros da topologia receberam o nome de: a_1 , a_2 , b e c . O seu correspondente no mancal está representado na Figura 6, a qual é apenas um corte do mancal, $22,5^\circ$ do total. O mancal é simétrico e para se obter as forças F_x e F_y para uma combinação de parâmetros com ele completo o simulador usa aproximadamente 14 horas. Portanto, para essa simulação considerou-se apenas $22,5^\circ$ do mancal. Essa diminuição afeta no valor da força eletromagnética, mas não na proporção das forças. Isso foi testado para 5 combinações de parâmetros e a proporcionalidade foi confirmada.

Além disso, o software possui uma ferramenta que nos possibilita fazer a simulação de todas as possíveis combinações de determinados parâmetros. E com cada uma dessas combinações alterou-se também a posição do rotor nas direções dos eixos x e y , como demonstrado na Figura 6.

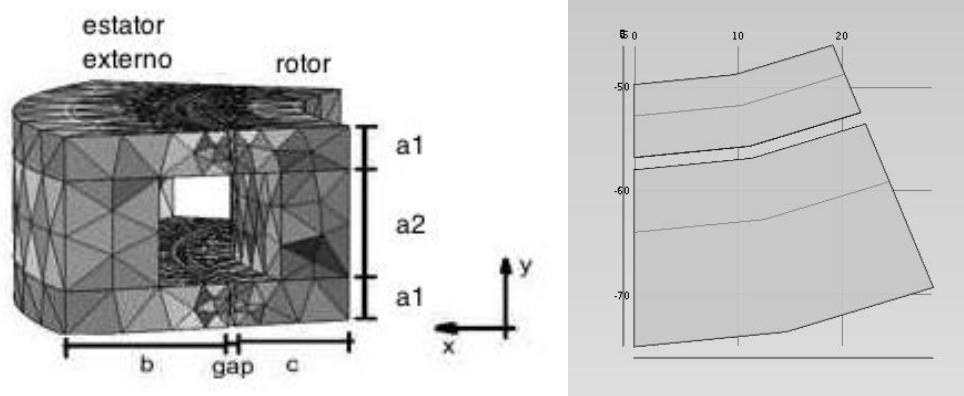


Figura 6 – Parâmetros variados.

Simulações prévias encontraram um modelo funcional para o mancal em questão. As escolhas dos valores dos parâmetros aqui variados tomaram como base esse modelo ($a_1 = 4$ mm, $a_2 = 10$ mm, $b = 8$ mm, $c = 6$ mm). Não foram simuladas muitas possibilidades de cada parâmetro, pois há um aumento exponencial da complexidade de um problema devido ao aumento de sua dimensionalidade, ou como é conhecido: a maldição da dimensionalidade (empregada por Bellman, 1961).

A curva BxH do ferro escolhido é similar à mostrada na Figura 7. Antes de se atingir a zona de saturação a indução magnética, B, cresce ao quadrado, enquanto na área de saturação ao se variar o campo indutor, H, a indução magnética possui menor variação. Procurando deixar o sistema mais linear, decidiu-se trabalhar na área de saturação do ferro.

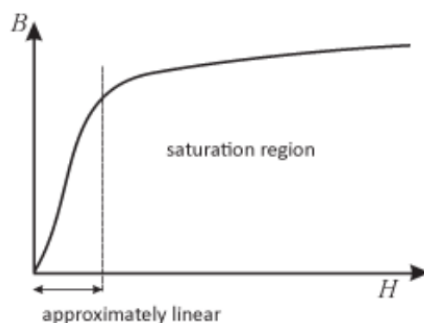


Figura 7 – Curva BxH.

O parâmetro a_1 influencia no fluxo magnético, pois seu tamanho deve ser suficiente para o ferro saturar nessa região; foi variado em 7, 10 e 13 mm. O parâmetro a_2 influencia no fluxo magnético, porque ele altera o tamanho do ímã, que é o causador do fluxo; foi variado em 3, 4 e 5 mm. O parâmetro b corresponde à largura do ímã mais 6 mm, portanto, da mesma maneira que o parâmetro a_2 , influencia no fluxo magnético pois modifica o tamanho do ímã; foi variado em 5, 8 e 11 mm. O parâmetro c , similarmente ao parâmetro a_1 , deve possuir tamanho suficiente para o ferro saturar na sua região; foi variado em 3, 6 e 9 mm.

Além disso, o rotor foi deslocado em x e em y . No eixo x simulou-se a sua posição de equilíbrio, ou seja, o momento em que o rotor se encontra centralizado, com um gap (distância entre o estator e o rotor) uniforme em todo o seu perímetro, chamado de posição 0. Também foi simulado seu deslocamento máximo, no caso 0,3 mm. De maneira similar no eixo y foi simulada sua posição de equilíbrio (também denominada posição 0), que, no caso, se tratava do rotor estar na mesma altura que os estatores, como mostrado na Figura 3. Foi também simulada uma posição de desequilíbrio de 0,5 mm.

Simulação para se obter as características do estator interno

O terceiro teste foi realizado uma vez decididas as dimensões do estator externo e do rotor. Para ele simulações prévias também foram realizadas a fim de estimar um modelo funcional para o mancal. A simulação aqui proposta avalia o funcionamento das bobinas, ou seja, qual a força gerada pela bobina para uma determinada corrente nela aplicada.

Para isso alguns parâmetros referentes às bobinas foram variados: a altura do núcleo da bobina e o raio do núcleo da bobina. O primeiro permite um maior número de voltas de bobinas por camadas, enquanto o segundo permite um maior número de camadas do enrolamento. Não há muito espaço para a variação, visto que a dimensão do rotor está fixada, e é necessário suportar oito núcleos para as bobinas, espaçados de maneira a caber às bobinas que serão enroladas neles. Portanto, a altura do núcleo da bobina foi variada em 10, 10,25 e 10,5 mm, enquanto o raio do núcleo da bobina foi variado em 10, 11 e 12 mm. Como visto na Figura 7.

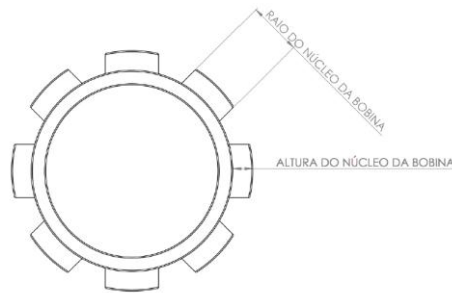


Figura 8: Parâmetros variados.

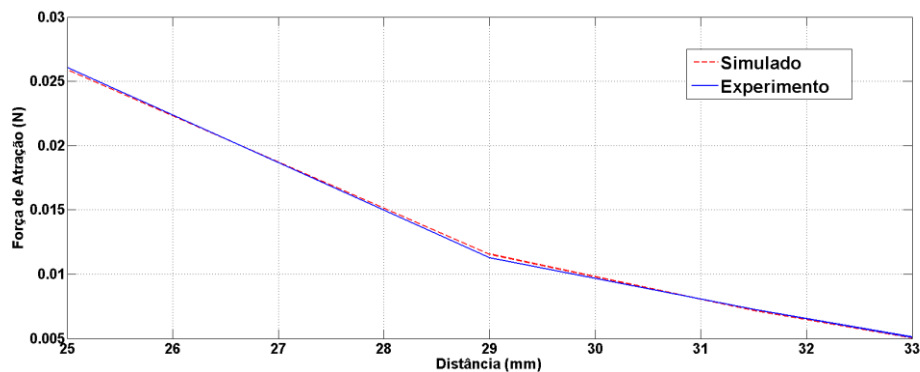
Alguns fatos devem ser mencionados. O simulador nos possibilita escolher qual mesh será usado na simulação. A geração de mesh (granulometria) é criar pequenos polígonos ou tetraedros que se aproximem com a geometria. Cada elemento deve possuir apenas um tipo de material. Como no mancal as medidas são de uma ordem de grandeza baixa, para não causar erros, foi usado o fator extremamente fino. Na escala de 1 a 5 (sendo 5 o mais fino) ele seria o 4. A Figura 6 é um exemplo de como o COMSOL gera os mesh's. A massa do mancal também é um parâmetro que deve ser levado em consideração. O ideal seria a menor possível.

Resultados e Discussão

Validação das características dos materiais

Os resultados obtidos no experimento para a validação do COMSOL *Multiphysics*® explicados acima podem ser vistos no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Resultados do experimento do ímã.



Por meio dela é possível afirmar que o software COMSOL está apto a realizar simulações válidas com os materiais selecionados. Isto porque os resultados obtidos são similares.

Simulação para se obter as características do estator externo e rotor

Essa simulação possuiu uma gama de 324 possibilidades de combinações dos parâmetros variados. Para uma primeira análise os dados obtidos foram agrupados pelos possíveis deslocamentos do rotor em x e em y , sendo suas combinações: $x = 0$ e $y = 0$, $x = 0,3$ e $y = 0$, $x = 0$ e $y = 0,5$, $x = 0,3$ e $y = 0,5$.

Como explicado anteriormente, requêresse o maior valor de força possível em y quando existe um deslocamento em y ; e um menor valor de F_y quando não há deslocamento em y . No caso de $x = 0$ e $y = 0$, tal como $x = 0,3$ e $y = 0$, a ordem de grandeza de F_y foi de 0,01 N. Agora, quando $x = 0$ e $y = 0,5$ a ordem de grandeza de F_y foi de 3,5 N, e em $x = 0,3$ e $y = 0,5$ foi de 5 N.

No deslocamento x procurou-se sempre a menor força. Nos casos do rotor deslocado em x , $x = 0,3$ com $y = 0$ e $x = 0,3$ com $y = 0,5$, a ordem de grandeza dos menores de F_x valores

foi de 25 N. Já com apenas o deslocamento em y , $x = 0$ e $y = 0,5$, ou sem deslocamento, $x = 0$ e $y = 0$, a ordem de grandeza foi de 18 N.

A força F_x , F_y e a área são os parâmetros considerados para a decisão das características do estator externo e do rotor. A mais crítica é a força F_y , pois por meio dela há um controle passivo do mancal. Pode-se dizer que essa movimentação (em y) ocorre de forma similar a uma mola, e quanto maior a força em y para um determinado deslocamento, maior seria o coeficiente de sua mola. Depois da força F_y o parâmetro mais crítico é a força F_x , porque essa força terá de ser fornecida pelo conjunto de bobinas no sentido contrário, para que F_x e a força gerada pelas bobinas se anulem e seja possível a estabilização do mancal.

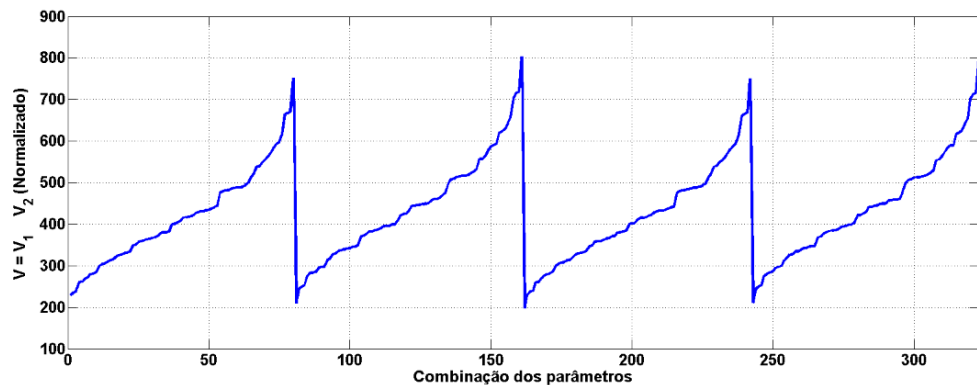
Com a influência desses parâmetros estabelecida foi usado o critério funcional para se obter os valores a_1 , a_2 , b e c . Como a escolha da força F_y varia de acordo com o deslocamento a equação do vetor funcional V teve de ser dividida. As equações usadas para foram: V_1 para $x = 0$ e $y = 0$, como também para $x = 0,3$ e $y = 0$; e V_2 para $x = 0$ e $y = 0,5$, tal como $x = 0,3$ e $y = 0,5$. O menor valor obtido dizia respeito a melhor combinação.

$$V_1 = 3 F_y + 2 F_x + A \quad (1)$$

$$V_2 = 3 \frac{1}{F_y} + 2 F_x + A \quad (2)$$

Com todos esses dados em mãos foi possível a construção do Gráfico 2. No eixo x temos as combinações de parâmetros, e no eixo y os valores do vetor V . Nota-se que o gráfico pode ser dividido em quatro partes. Na primeira parte temos $x = 0$ e $y = 0$, na segunda $x = 0,3$ e $y = 0$, na terceira $x = 0$ e $y = 0,5$ e na quarta $x = 0,3$ e $y = 0,5$. O valor mínimo em cada uma das partes foi o mesmo. Portanto, a solução proposta foi: $a_1 = 3$ mm, $a_2 = 7$ mm, $b = 5$ mm, $c = 3$ mm. Essa simulação demonstra que o problema é separável. Não é necessário simular diferentes deslocamentos do rotor.

Gráfico 2 – Resultado da aplicação do critério funcional.

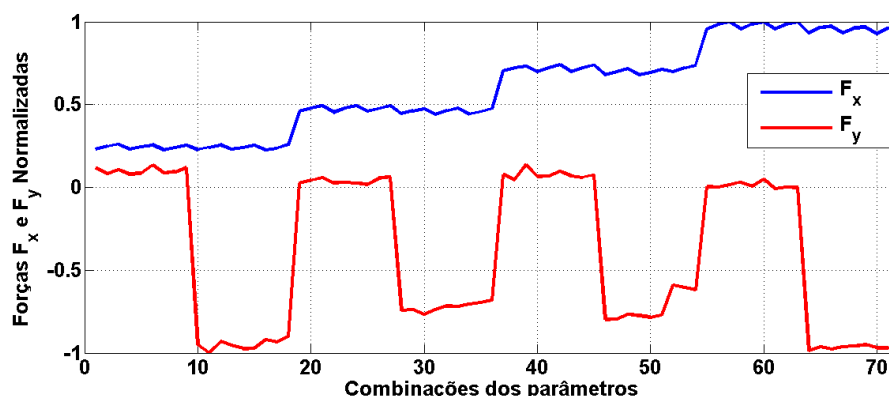


Simulação para se obter as características do estator interno

O comportamento das bobinas também foi estudado. Usou-se as características dos parâmetros do estator externo e rotor escolhidas na simulação descrita anteriormente. Já nessa foi aplicada uma corrente de 4 A em uma das oito bobinas. A simulação possuiu 72 maneiras de combinações dos parâmetros. Em primeiro lugar, para termos uma normalização das forças, procurou-se saber as maiores forças em x (325,27 N) e em y (47,92 N). Depois as forças de todas as iterações foram divididas pela maior força encontrada

Com todos esses dados em mãos foi possível a construção do Gráfico 3. No eixo x temos as 72 possibilidades de parâmetros. E no eixo y as forças normalizadas. O chamado data 1 é a curva que diz respeito a força F_x , e o data 2 a força F_y .

Gráfico 3 – Forças normalizadas F_x e F_y pelas combinações de parâmetros.



É possível observar a mudança de posição do rotor em x e em y . Elas ocorrem nas descontinuidades. A força F_x , foi variada quatro vezes e no Gráfico 2 é possível observar quatro descontinuidades. A primeira ocorre na mudança do dx de 0 para 0,1 mm. A segunda de 0,1 mm para 0,2 mm e assim sucessivamente.

A força F_y varia oito vezes. Para cada variação em x há duas em y . Os valores próximos de zero correspondem ao momento que não há deslocamento em y . Já quando há os valores são negativos. Pois o deslocamento é positivo, gerando uma força contrária, no caso, negativa. É interessante observar que as forças F_x e F_y não são muito dependentes uma da outra nesse caso (a força F_x mais que a F_y).

Analisando os dados pode-se chegar a um bom valor para os parâmetros. Para tal, priorizou-se a maior força F_y quando o rotor se encontrava deslocado em y . E uma menor força F_y no caso do rotor não estar deslocado. Isso porque se almeja um bom desempenho do mancal passivo (em y), o que acarreta em menor vibração durante o funcionamento. Os valores escolhidos foram: raio do núcleo da bobina = 12 mm e altura do núcleo da bobina = 10,5 mm. Esse aumento de dimensão cria a possibilidade de se aumentar o número de voltas da bobina, gerando uma maior força em x .

Construção de um protótipo

O modelo criado no COMSOL foi passado para o SolidWorks®. Foram encontradas algumas dificuldades na montagem, como por exemplo: o difícil manuseio dos ímãs, que dependendo da disposição, não comportavam todos de maneira a fechar a circunferência desejada.

É necessário ressaltar a criticidade da usinagem. Como temos que obter um gap entre o estator externo e o rotor de 0,3 mm as tolerâncias foram escolhidas de acordo. Caso alguma delas não ser respeitada pode não ser possível a montagem do mancal. Na Figura 9 pode-se ver o protótipo obtido.

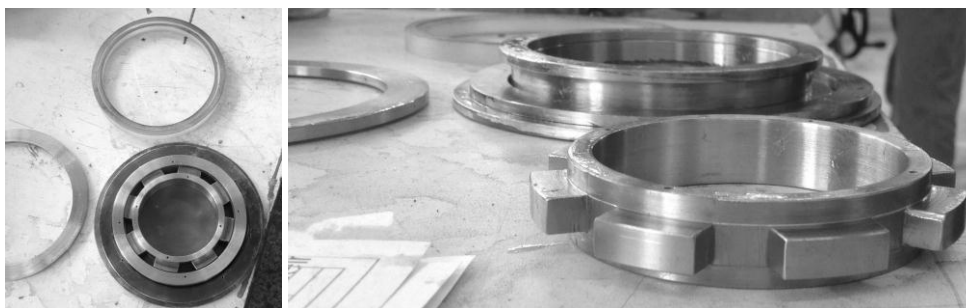


Figura 9 – Fotos do protótipo.

Conclusões

As características encontradas por meio desse estudo conseguiram melhorar os valores das forças F_x , F_y e da área, se comparado ao modelo proposto inicialmente pela marinha brasileira. Por meio do critério da proporcionalidade encontrou-se a melhor combinação de valores dentre os simulados, por conta do critério escolheu-se o menor V. Houve melhoria de mais de 50% se comparado a topologia proposta inicialmente. Por conta da melhoria encontrada com o auxílio da primeira simulação houve também uma melhora na segunda, se comparada com o modelo inicial. A força encontrada produzida nas bobinas é maior do que a produzida pelo fluxo magnético entre o estator externo e o rotor. Isso implica que uma corrente de menor amperagem pode ser usada nessa nova configuração.

Outra conclusão importante que pode ser tirada desse trabalho é a influência dos parâmetros nas forças F_x e F_y . Antes de tudo foi possível observar que o problema é separável, ou seja, não é necessário simular diferentes deslocamentos do rotor para encontrar a melhor combinação de parâmetros possível dentre os simulados. Na primeira simulação vemos que os parâmetros a_2 e b são os mais influentes. Isto porque eles determinam a dimensão do ímã a ser utilizado, o qual é responsável por gerar o fluxo magnético entre rotor e estator externo. Depois temos os parâmetros a_1 e c , que também influenciam o mancão, contudo, o que deve ser considerado é se as suas medidas são suficientemente pequenas para que ocorra saturação do ferro. Na segunda simulação nota-se que o parâmetro mais crítico é a altura do núcleo da bobina, pois não há mais que 0,5 mm de espaço para seu aumento, dificultando uma maior gama de escolhas.

Referências bibliográficas

- [1] ZANARDI, M. C. Dinâmica da Atitude de Satélites Artificiais, Tese de Livre Docência, FEG/UNESP, Guaratinguetá, SP, 2005.
- [2] K. Falkowski. Simulation of Passive Magnetic Bearing using COMSOL Multiphysics. Military University of Technology. 2011.
- [3] A. Krzysztof Pilat. Active Magnetic Suspension and Bearing. AGH University of Science and Technology, Poland.
- [4] V. Suman Guirao. Mancões Magnéticos Ativos para atenuação de vibrações em eixos rotativos. Agosto de 2012.
- [5] ACDC Module Users Guide. Version 4.3. Comsol.
- [6] Scharfe, M., Roschke, T., Bindl, E., e Blonski, D. (2001). Design and development of a compact magnetic bearing momentum wheel for micro and small satellites. Em *Proceedings of the 15th Annual Utah State University Conference on Small Satellites*, volume 15, pgs. 1–9.
- [7] Bernus, C., Jamain, P., e Roland, J. (1998). Magnetic bearing with alternating actuators and sensors. *US Patent 5,763,972*.
- [8] A. Pilat. Selected Magnetostatic Analysis of 3 Coils Active Magnetic Bearing. AGH University of Science and Technology.
- [9] A. Pilat. FEMLab software applied to active magnetic bearing analysis. AGH University of Science and Technology.