

## PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM MANCAL MAGNÉTICO AXIAL

**\*José Andrés Santisteban**

**\*\*Sérgio R. A. Mendes**

\*UFF-TEE, Av. Passo da Pátria 156, São Domingos, Sala D519, CEP 24210-240, Niterói, RJ.  
Phone: 55.21.620-7070 br. 337, e-mail: [latinus@intertrim.com.br](mailto:latinus@intertrim.com.br).

\*\* UFRJ-PEE, Cidade Universitária, CT, Sala H305, CEP 21945-970, Rio de Janeiro, RJ.  
Phone: 55.21.260-5010 br. 239, e-mail: [mendes@coe.ufrj.br](mailto:mendes@coe.ufrj.br).

### RESUMO

A levitação magnética aplicada às máquinas elétricas rotativas é uma tecnologia relativamente recente e muito promissora. A substituição dos tradicionais mancais mecânicos pelos mancais magnéticos tem como característica principal a ausência de atrito mecânico, o que torna vantajosa sua utilização em motores que operam em altas velocidades ou naqueles que necessitam ser operados em ambientes esterilizados. Sob o aspecto acadêmico, esta tecnologia aborda conceitos básicos de vários campos da engenharia elétrica: eletromagnetismo, controle, máquinas elétricas, sistemas digitais, eletrônica linear e eletrônica de potência. Neste trabalho são apresentadas as equações básicas que envolvem o projeto de um mancal magnético axial capaz de levantar uma peça de material ferromagnético a uma distância de poucos milímetros. Resultados obtidos em simulações realizadas em um programa de cálculo de campos por elementos finitos confirmam a análise teórica apresentada. Finalmente, resultados experimentais mostram a validade do projeto desenvolvido.

**Palavras chave:** levitação eletromagnética, mancal magnético axial, controle.

### 1. INTRODUÇÃO

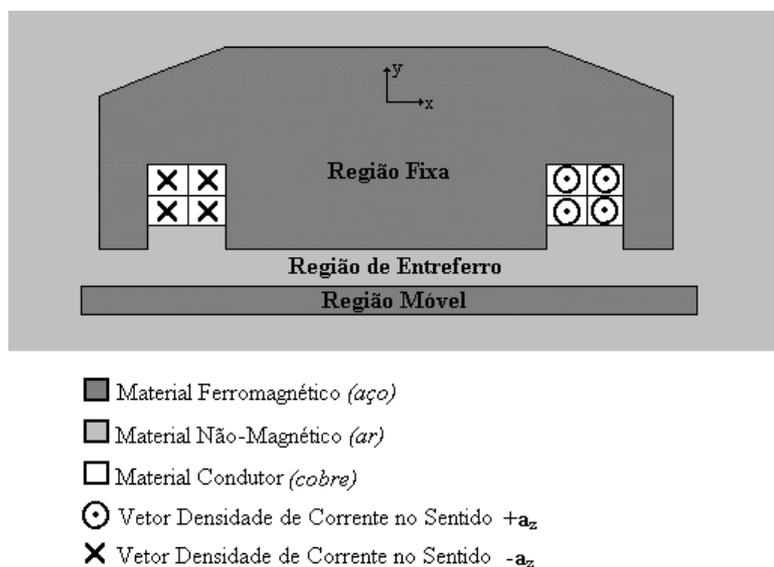
Os mancais magnéticos são dispositivos que utilizam o princípio da levitação magnética para a sustentação dos rotores das máquinas elétricas. Ao longo das últimas décadas, estes mancais vêm sendo desenvolvidos para algumas aplicações específicas na indústria. Em máquinas que operam em altas velocidades, por exemplo, o desgaste de peças devido ao atrito mecânico é praticamente inexistente quando eles são empregados. Isto possibilita um maior período livre de manutenção, se comparado com as máquinas rotativas que utilizam mancais mecânicos. Por ser uma tecnologia bastante recente e, por enquanto, pouco explorada comercialmente, sua implantação demanda alto investimento inicial (Schweitzer, 1994). Porém, este investimento pode ser recuperado em prazo razoável. Por outro lado, a preservação das fontes de energia, hoje em dia, tem uma relevância maior para a humanidade. Deve-se ter bastante cautela quanto ao desperdício das riquezas naturais que, infelizmente, não têm sido bem aproveitadas pelo homem nas últimas décadas. Recentemente, entraram em funcionamento, no Japão, as duas primeiras hidroturbinas que utilizam a tecnologia dos mancais magnéticos (Actidyne, 1995). A não utilização de óleo lubrificante nestas máquinas elimina qualquer risco de poluição causado pelo mesmo. Nas indústrias alimentícia e de equipamentos médicos, onde também é importante a ausência de qualquer tipo de contaminação, o uso dos mancais magnéticos também se justifica.

## 1.1 Levitação Magnética

A levitação é definida como o equilíbrio estável de um corpo sem contato sólido ou fluido com o solo. Manter um corpo flutuando no ar é uma idéia que fascina a mente humana há muitos anos, pois significa compensar ação da gravidade atuante sobre este corpo. Uma das formas de levitação é a magnética, a qual pode ser obtida de forma passiva (ímãs permanentes, materiais diamagnéticos ou supercondutores) ou de forma ativa (correntes parasitas e eletroímãs com controle realimentado ou com correntes dinâmicas). Um sistema de levitação magnética consiste em dois subsistemas: (i) sistema primário- responsável pela geração do campo magnético; (ii) sistema secundário- responsável pela forma ou aprisionamento do fluxo magnético (Moon, 1994). Como exemplo podem ser citados os trens magneticamente levitados (Maglev), que há algumas décadas vêm surgindo como uma forma alternativa de transporte em alta velocidade.

## 1.2 Mancais Magnético Axial

Baseados nos princípios da levitação magnética, os mancais magnéticos substituem os mancais mecânicos das máquinas elétricas convencionais. Estes têm a função de manter fixa a posição relativa entre o rotor e o estator. De acordo com sua direção de atuação, os mancais magnéticos são divididos em dois tipos: mancal magnético radial e mancal magnético axial. O primeiro atua ao longo de eixos ortogonais orientados radialmente (Salazar, 1994; Santisteban, 1999). O segundo atua ao longo do eixo do rotor. Para deslocamentos na direção axial do rotor, em torno de uma referência, este mancal deve produzir uma força no sentido oposto até que o rotor retorne à posição desejada. Uma das formas mais recentes de implementação passiva utiliza o princípio de levitação por supercondutividade (David, 1999), entretanto, a alternativa desenvolvida neste trabalho é do tipo ativa, tal como esquematizada na Figura 1.



**Figura 1-** Vista em Corte do Mancais Magnético Axial.

Nesta figura, a região fixa é responsável pela geração do campo magnético. Nela encontra-se uma bobina com  $N$  espiras que, quando percorrida por uma corrente elétrica de intensidade  $I$ , produz um campo magnético de intensidade  $H$  (Lei de Ampère), ao longo de um

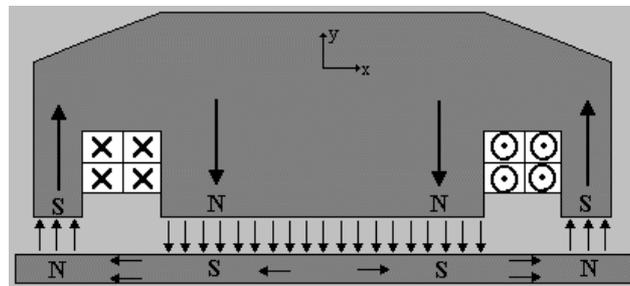
percurso fechado  $l$  (Hayt, 1983). Este percurso fechado atravessa as regiões fixa (primário), móvel (secundário) e entreferro.

## 2. MODELAGEM

O projeto de um mancal magnético axial é iniciado com o desenvolvimento de uma relação entre as grandezas fundamentais deste sistema: a força magnética de atração exercida pelo primário sobre o secundário, a corrente elétrica que circula pelo enrolamento situado no primário e a espessura do entreferro.

### 2.1 Princípio de Funcionamento

De acordo com a Lei de Ampère a existência de vetores densidade de corrente elétrica  $J(+a_z)$  provoca o surgimento de vetores intensidade de campo magnético de módulo  $H$ , orientados no sentido anti-horário (regra da mão direita), ao redor da região que contém estes vetores. O funcionamento do mancal magnético axial ativo é baseado no controle da força de atração existente entre os pólos **N** e **S**, sendo estes separados por um entreferro magnético.



**Figura 2-** Pólos Norte e Sul criados pelas Linhas de Fluxo que atravessam o Entreferro.

### 2.2 Energia Armazenada num Entreferro Magnético

Sendo a espessura do entreferro igual a  $y$  seu volume  $V_g$  é dado por:

$$V_g = \int_0^y S_g \cdot dy = y \cdot S_g, \quad (1)$$

onde  $S_g$  é a área total do entreferro.

Considerando a densidade de fluxo magnético no entreferro constante  $\mathbf{B}_g$ , a energia magnética armazenada no entreferro é:

$$W_g = -\frac{1}{2} \cdot (\mathbf{B}_g \cdot \mathbf{H}_g) \cdot V_g. \quad (2)$$

Esta equação somente é válida para meios lineares (Kraus, 1991). Sendo o entreferro do mancal magnético axial composto por ar, não há restrição quanto à sua utilização. Os vetores  $\mathbf{B}_g$  e  $\mathbf{H}_g$  têm a mesma direção e, no entreferro, se relacionam por  $\mu_0$ , logo:

$$W_g = -\frac{1}{2 \cdot \mu_0} \cdot B_g^2 \cdot y \cdot S_g. \quad (3)$$

Admitindo-se que a permeabilidade magnética relativa do material ferromagnético é muito maior que a do ar, toda força magnetomotriz produzida no primário se verifica no entreferro.

Expressando  $B_g$  em função de  $N$ ,  $I$  e  $y$ , tem-se a energia no entreferro:

$$W_g = - \mu_0 \cdot \frac{(N \cdot I)^2 \cdot S_g}{2 \cdot y} \cdot (-\mathbf{a}_y). \quad (4)$$

Derivando a expressão da energia com relação à distância  $y$ , é obtida a expressão para a força total de atração exercida pela região fixa sobre a região móvel.

$$\mathbf{F}_{total} = \frac{dW_g}{dy} = \mu_0 \cdot \frac{(N \cdot I)^2}{2 \cdot y^2} \cdot S_g \cdot (+\mathbf{a}_y) \quad (\text{Força de Maxwell}). \quad (5)$$

A força de atração apresentada pela equação (5) é definida como uma função dependente de apenas duas variáveis: corrente e entreferro. Porém, surge um termo constante, que depende de características construtivas do primário, como número de espiras do enrolamento e área das superfícies circulares central  $S_{central}$  e externa  $S_{externa}$  do entreferro (Mendes, 1999).

$$K_{força} = \frac{N^2 \cdot \mu_0 \cdot S_{externa} \cdot S_{central}}{2 \cdot (S_{externa} + S_{central})}. \quad (6)$$

$$\mathbf{F}_{total} = K_{força} \cdot \frac{I^2}{y^2} \cdot (+\mathbf{a}_y)N. \quad (7)$$

### 2.3 Características Construtivas

O enrolamento do primário foi construído com 377 espiras e admite-se que sua corrente não ultrapassa o valor de 2,5A. A área  $S_{externa} = S_{central} = 4,8 (10^{-3} \text{ m}^2)$ . Detalhes adicionais sobre o protótipo são apresentados em Santisteban (1998).

Das características construtivas, o valor de  $K_{força}$  é:

$$K_{força} = 2.14 \cdot 10^{-4} (\text{H} \cdot \text{m} \cdot \text{esp}^2).$$

Sendo assim, a relação entre as três grandezas fundamentais deste sistema de levitação eletromagnética é dada por:

$$F_{total} = 2.14 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{I^2}{y^2} \cdot (+\mathbf{a}_y)N. \quad (8)$$

### 3. SIMULAÇÕES

Programas de cálculo de campos por elementos finitos são ferramentas muito importantes nos projetos de engenharia. Sua utilização neste trabalho se justifica com a finalidade de validar o modelo teórico desenvolvido.

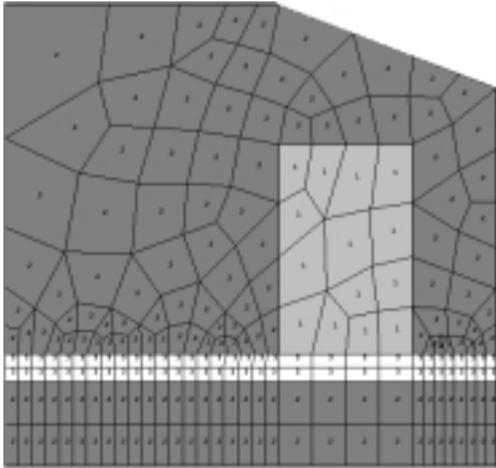
O usuário deve informar ao programa o valor da corrente que percorre o condutor por intermédio de um vetor densidade de corrente elétrica  $\mathbf{J}$ , que é definido por:

$$\mathbf{J} = \frac{NI}{S} (+\mathbf{a}_S), \quad (9)$$

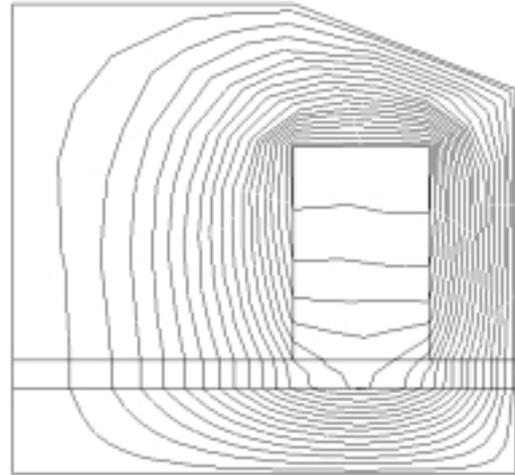
onde  $I$  é a corrente que circula através do enrolamento de  $N$  espiras e área de secção  $S$ . O vetor unitário perpendicular à superfície  $S$  é dado por  $+\mathbf{a}_S$ . Para o protótipo desenvolvido  $S=0.00057\text{m}^2$ .

Também é necessário que sejam definidas as condições de fronteira, ou seja, se as linhas de fluxo são paralelas (Dirichlet) ou perpendiculares (Neumann) às fronteiras. No modelo em questão todas as fronteiras são Dirichlet (Ansys Help System, 1994).

A Figura 3.a apresenta a geometria simplificada do modelo dividida em 237 elementos, de um máximo de 250. Na Figura 3.b pode ser observada a distribuição das linhas de fluxo magnético ao longo da geometria. Foram realizadas simulações correspondentes a alguns pontos de operação medidos experimentalmente (Tabela 1), onde foi comprovada a validade do modelo teórico.



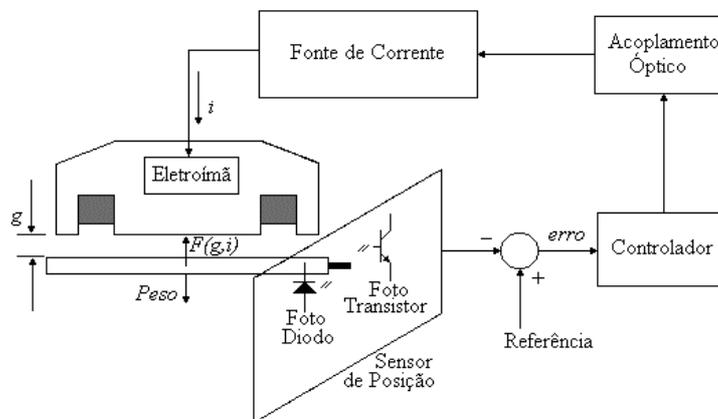
**Figura 3.a-** Geometria Dividida em Elementos Finitos.



**Figura 3.b-** Linhas de Fluxo Magnético.

#### 4. CONTROLE

A Figura 4 apresenta o diagrama esquemático do sistema que compreende a aplicação prática do modelo experimental de um MMA. O sistema é composto por um eletroímã (região fixa), uma massa (região móvel), sensores ópticos de posição, circuitos de controle, interface óptica de disparo e por uma fonte de corrente contínua, ajustável.



**Figura 4-** Diagrama Esquemático do Sistema que Compreende o MMA.

##### 4.1 Descrição da Planta do Sistema

A equação diferencial que descreve o comportamento mecânico do sistema é dada por

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = F(y, i) - P, \quad (10)$$

onde  $F(y, i)$  é a força exercida pelo eletroímã para levantar um corpo de peso  $P = mg$ , sendo  $g$  a aceleração da gravidade.

Aplicando a Transformada de Laplace à eq. 10, considerando o sistema relaxado, tem-se:

$$ms^2 Y(s) = F(s) - P(s). \quad (11)$$

Logo, a função de transferência do sistema mecânico é dada por:

$$G(s) = \frac{1}{ms^2}. \quad (12)$$

Para este sistema se tornar estável é necessário que o lugar das raízes seja deslocado para o semiplano esquerdo do plano complexo. Para tanto, pela sua simplicidade, foi adotado um controle do tipo Proporcional Derivativo (PD) (Ogata, 1970). O sistema completo foi simulado no aplicativo SIMULINK, do MATLAB (1999). Os parâmetros do controlador foram ajustados por intermédio deste circuito pelo método de tentativa e erro.

## 4.2 Sensores de Posição

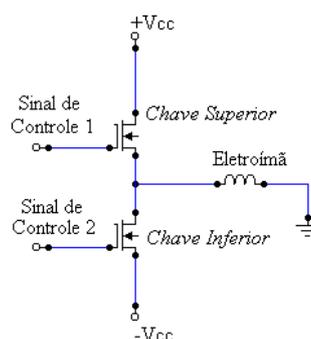
Para cada posição da região móvel ao longo da direção y, o circuito dos sensores óticos de posição fornece uma tensão correspondente, chamada tensão dos sensores de posição ( $V_{sp}$ ). O resultado da subtração entre  $V_{ref}$  (tensão de referência de posição) e  $V_{sp}$  é classificado como sinal de erro ( $V_{erro}$ ), que é enviado ao circuito controlador. O valor  $V_{ref}$  é ajustado através de um potenciômetro.

## 4.3 Circuito de Controle

O circuito de controle recebe um sinal de erro que, de acordo com a posição real na qual se encontra a região móvel (acima ou abaixo da referência de posição), pode ser positivo ou negativo. Após recebido, o sinal de erro é processado pelo Controlador PD e transformado em um valor de tensão adequado, que deve ser interpretado como uma referência de corrente ( $i_{ref}$ ). A referência de corrente é comparada com o valor de tensão fornecido pelo sensor de corrente, que representa a corrente real ( $i_{real}$ ). Por motivo de segurança, utiliza-se um circuito Limitador de Corrente. A imposição de um limite na corrente de referência tem por objetivo impedir que a corrente no eletroímã ultrapasse um determinado valor, admitido como máximo.

## 4.4 Circuito de Disparo

O Circuito de Disparo (*Driver*) fornece os sinais de controle para as chaves superior e inferior do circuito de potência (Figura 5). Se a referência de corrente for maior que a corrente real, a chave superior (ou positiva) deve receber um sinal de nível lógico alto (controle de disparo) e a chave inferior (ou negativa), um sinal de nível lógico baixo (controle de bloqueio), fazendo com que a corrente através do eletroímã aumente seu valor médio. O raciocínio inverso é válido se a referência de corrente for menor que a corrente real. Se as duas chaves conduzem simultaneamente, isto significa um curto-circuito entre  $+V_{cc}$  e  $-V_{cc}$  na fonte de corrente contínua. Isto é evitado utilizando-se um circuito Gerador de Tempo-Morto.



**Figura 5** - Circuito de Potência- Chaves Controladas e Fonte de Corrente.

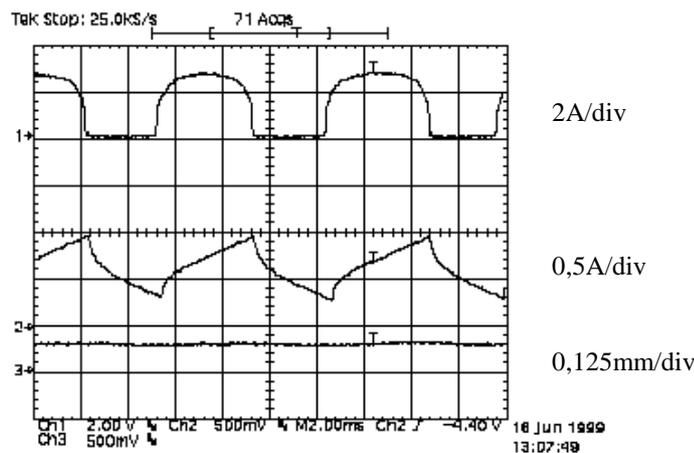
## 5. RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta na primeira coluna os valores de entreferro medidos. Nas segunda e terceira colunas são apresentados valores de corrente calculados e medidos, respectivamente. Os valores encontrados nas primeira e segunda colunas são utilizados em simulação realizada pelo programa de cálculo de campos por elementos finitos para o cálculo dos valores de força, apresentados na quarta coluna da mesma tabela.

**Tabela 1-** Valores Referentes a uma Carga de 30N.

Entreferro Medido g mm	Corrente Calculada $i_c$ mA	Corrente Medida $i_m$ mA	Erro Relativo $(i_m - i_c)/i_m$ %	Força Simulada FN
2,5	935	1000	6,5	28,3
3,0	1122	1200	6,5	29,0
3,5	1311	1500	12,6	29,3
4,0	1498	1650	9,2	29,6
4,5	1685	1800	6,4	29,7
5,5	2059	2250	8,5	29,8

A Figura 6 apresenta as formas de onda correspondentes à referência de corrente, à corrente real e ao desvio de posição do disco em relação a 2mm, nos canais 1, 2 e 3, respectivamente. (escala horizontal: 2ms/div)



**Figura 6-** Medidas Relativas ao Disco com Peso de 30N.

## 6. CONCLUSÕES

Através de conhecimentos básicos de eletromagnetismo, foi possível o desenvolvimento de uma equação que relaciona as três grandezas fundamentais de um sistema de levitação eletromagnética: força, corrente e distância. Conhecida a relação entre tais grandezas, iniciou-se um estudo mais profundo do sistema através do dimensionamento e da construção de um protótipo.

Foi utilizado um programa de cálculo de campos por elementos finitos com a finalidade de visualizar-se, de maneira mais confortável, a ocorrência dos fenômenos eletromagnéticos no protótipo sem a necessidade de serem efetuados cálculos complexos.

O controlador utilizado é bastante simples, se comparado a outras técnicas de controle, porém, correspondeu bem às expectativas, vistas suas limitações.

Confrontando os resultados teóricos, simulados e experimentais, pode-se concluir que o modelo teórico desenvolvido no trabalho representa muito bem o mancal magnético axial proposto. As discrepâncias verificadas podem ser atribuídas, entre outros fatores, à dispersão e a incertezas instrumentais.

## 7. REFERÊNCIAS

- Actidyne®, “Hydroturbines in Japan”, The International Magazine of Actidyne® Magnetic Bearings, N° 5, Maio 1995.
- Ansys®, “Magnetic Analysis of a Solenoid Actuator”, Ansys Help System., 1994.
- David, D., Santisteban, J., Andrade, R., Stephan, R., Ripper, A. and Nicolsky, R. “Magnetic Bearing for Induction Machine Using Active Radial Eletromagnetic and Passive Axial Superconducting Components”- Intermag 99- Paper EE08, Kyongju, Korea, 18-21 May 1999.
- Hayt, W.J., “Eletromagnetismo”, LTC S.A., 1983.
- Kraus, J.D., “Eletromagnetics”, McGraw-Hill, 1991.
- Matlab®, Matlab 5.3.0.10183, 1999.
- Mendes, S. R. A., “Projeto e Implementação de um Mancal Magnético Axial”, Projeto de Final em engenharia Elétrica, UFRJ, Brasil, Junho 1999.
- Moon, F. C., “Superconducting Levitation- Applications to Bearings and Magnetic Transportation”, John Wiley & Sons, 1994.
- Ogata, K., Engenharia de Controle Moderno”, Prentice/ Hall do Brasil Ltda., 1970.
- Salazar, A.O., “Uma proposta de motor elétrico sem mancal mecânico”, Tese de doutorado, UFRJ, Brasil, Março 1994.
- Santisteban, J. A., “Estudo da influência de uma carga torsional sobre o posicionamento radial de um motor-mancal”, Tese de doutorado, UFRJ, Brasil, Março 1999.
- Santisteban, J. A., Mendes, S. e Stephan, R. M., “Projeto e construção de um mancal magnético axial”. Jornada de Iniciação Científica, UFRJ, 1998.
- Schweitzer, G., Bleuler, H. and Traxler, A., “Active Magnetic Bearings”, v/dlf Hochschulverlag AG na der ETH Zürich. 1994.