



MANCAIS ELETROMAGNÉTICOS - UMA METODOLOGIA DE PROJETO

Rômulo Araújo Chapetta

UFF-TEE, e-mail : rachapetta@bol.com.br

José Andrés Santisteban

UFF-TEE , e-mail: jasl@mec.uff.br

Roberto Firmento de Noronha

UFF-TEM, e-mail: rnoronha@mec.uff.br

Universidade Federal Fluminense

Av. Passo da Pátria 156, São Domingos, Sala D509,

CEP 24210-240, Niterói, RJ. Phone: 55.21.2620-7070 br. 337

Resumo. *A substituição de mancais de rolamento e hidrodinâmicos por mancais magnéticos apresenta diferentes vantagens, inimagináveis há pelo menos três décadas atrás. Muitas publicações se referem a diferentes inovações tais como novas técnicas de controle assim como a estruturas híbridas como o uso de ímãs permanentes e inclusive supercondutores. Entretanto, nestes trabalhos o procedimento do dimensionamento das estruturas eletromagnéticas é muitas vezes desprezada.*

Neste trabalho é apresentada uma metodologia de projeto de mancais eletromagnéticos radiais que gerou um programa numérico o qual permite estabelecer as dimensões geométricas a partir de dados de entrada tais como: força máxima, diâmetro dos fios condutores, máxima corrente de operação, entreferro, densidade de fluxo magnético máxima no núcleo do mancal e de um determinado diâmetro imposto pela aplicação. Os dados de saída são as outras dimensões desconhecidas do mancal radial eletromagnético. Alguns exemplos de projeto são apresentados, entre os quais um referente à substituição dos mancais de rolamento de um motor elétrico convencional e outro aplicado a uma centrífuga.

Palavras chave: *levitação eletromagnética, mancal magnético radial, dimensionamento eletromagnético.*

1. INTRODUÇÃO

Os mancais magnéticos são dispositivos que utilizam o princípio da levitação magnética para a sustentação dos rotores de máquinas rotativas. As máquinas que utilizam mancais magnéticos possuem uma série de vantagens em relação às máquinas com mancais mecânicos convencionais, como por exemplo a obtenção de altas velocidades de operação, economia de energia e baixo desgaste das peças acarretando em manutenção reduzida, isto devido a ausência de atrito mecânico e, conseqüentemente, de suas baixas perdas. Ao longo das últimas décadas, estes mancais vêm sendo desenvolvidos para algumas aplicações específicas na indústria, por exemplo em centrífugas de altas velocidades. Esta tecnologia por enquanto é pouco explorada comercialmente pois sua implantação demanda alto investimento inicial (Schweitzer, 1994), porém, este investimento pode ser recuperado em prazo razoável.

Alguns anos atrás, 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 ao meio ambiente. Nas indústrias alimentícia e de equipamentos médicos, onde também é importante a ausência de qualquer tipo de contaminação, o uso dos mancais magnéticos se apresenta como uma solução alternativa.

1.1. Levitação Magnética

Neste trabalho a levitação é entendida como o equilíbrio estável de um corpo sem contato sólido, ou através de fluido, com o solo, compensando a ação da gravidade. Entre outros métodos o uso do magnetismo se mostra adequado mas novos desafios tem se apresentado (Salazar, Chiba e Fukao, 2000). A levitação magnética, 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 (Sinha, 1987).

1.2. Mancais Magnéticos Radial

Baseados nos princípios da levitação magnética, os mancais magnéticos radiais substituem os mancais mecânicos das máquinas rotativas. O mancais servem para apoiar o eixo da máquina deixando fixa a posição relativa entre o rotor e o estator, sendo este o maior desafio para a elaboração de um projeto de mancais magnético. Para isto, é necessário um dimensionamento do seu rotor e do seu estator tal que a força magnética resultante compense os esforços atuantes. De acordo com sua direção de atuação, os mancais magnéticos são divididos em dois tipos: mancais magnéticos radial e mancais magnéticos axial. O primeiro atua ao longo de eixos ortogonais orientados radialmente (Salazar, 1994; Santisteban, 1999), o qual iremos abordar neste trabalho. O segundo atua ao longo do eixo do rotor (Santisteban, 2000). Para deslocamentos na direção axial do rotor, em torno de uma referência, este mancais 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).

2. METODOLOGIA DE PROJETO

Muitas variáveis devem ser consideradas no projeto de um mancais magnético radial. Por exemplo, desde o ponto de vista mecânico a escolha das dimensões do rotor determina o momento de inércia polar que está ligado ao efeito giroscópico. Por outro lado, a escolha das dimensões do estator e em particular da janela onde ficam alojados os seus condutores elétricos, influenciam no comprimento final do eixo e portanto nas frequências de ressonância. Em relação ao dimensionamento eletromagnético, a escolha do material do núcleo determina a eficiência do dispositivo pois idealmente este deveria ter uma permeabilidade magnética infinita e perdas internas nulas.

Neste trabalho é proposta a incorporação de mancais magnéticos radiais sem modificar significativamente as dimensões das máquinas escolhidas para tal propósito. Se admite que é conhecido ao menos um dos diâmetros do mancais em função da aplicação.

2.1. Teoria Eletromagnética

A teoria básica para o projeto eletromagnético, aqui sucintamente descrita, pode ser conferida em diversas fontes (Hayt, 1983; Krauss, 1991 e Schweitzer, 1994).

Usando a Fig. (1) como referência, a energia armazenada “W” no campo magnético no entreferro, gerado por N espiras com corrente I (não mostradas) é dada por: $W = \frac{1}{2}(B H \text{ Vol.})$ ou $W = \frac{1}{2}(B H Aa 2s)$.

Onde “s” é o entreferro, “Aa” é a área por pólo, “B” é a densidade de fluxo magnético e “H” a intensidade de campo magnético no entreferro ($B = \mu_0 H$, com μ_0 a permeabilidade magnética do ar).

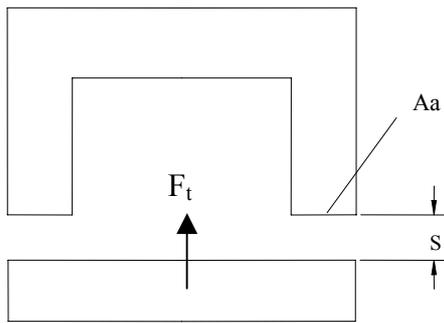


Figura 1. Circuito magnético básico.

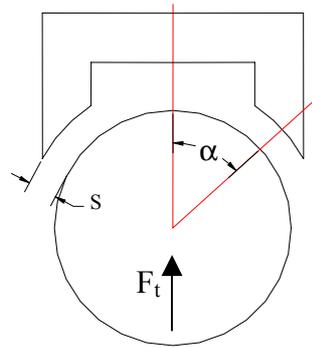


Figura 2. Geração de forças magnéticas radiais.

Considerando o campo magnético conservativo, a força vertical resultante “ F_t ” pode ser determinada a partir da derivada da energia magnética em relação ao deslocamento “s” ($F_t = dW/ds$), logo $F_t = B H Aa$, ou:

$$F_t = B^2 Aa / \mu_0 . \quad (1)$$

Usando agora a lei de Ampere e considerando μ_{fe} , H_{fe} e l_{fe} a permeabilidade magnética, a intensidade de campo e o comprimento médio do núcleo respectivamente, H_a e l_a a intensidade de campo e o comprimento médio do entreferro respectivamente e que não há dispersão, ou seja que $B_{ar} = B_{fe} = B$, tem-se: $NI = H_{fe} l_{fe} + H_a l_a = [(B l_{fe}) / \mu_{fe}] + [B 2s / \mu_0]$, de onde: $B = (NI \mu_0) / [l_{fe} (\mu_0 / \mu_{fe}) + 2s]$, e considerando $\mu_{fe} \gg \mu_0$ (como acontece na prática) então:

$$B = NI \mu_0 / 2s . \quad (2)$$

Substituindo a Eq.(2) na Eq.(1),tem-se:

$$F_t = \frac{1}{4} (\mu_0 N^2 Aa) (I^2 / s^2) . \quad (3)$$

Para o caso descrito na Fig. (2) tem-se o mesmo cálculo descrito anteriormente, no entanto considera-se a projeção das forças de cada pólo no eixo vertical.

$$F_t = \frac{1}{4} (\mu_0 N^2 Aa) (I^2 / s^2) \cos \alpha \quad (4)$$

Na Figura (3) é mostrada, em corte a estrutura do estator e rotor de um mancal eletromagnético radial como proposta em Schweitzer, 1994. Nesta é imposta a mesma densidade de fluxo magnético no núcleo. A profundidade do mesmo é igual a “b”.

Sendo o diâmetro interno do estator igual a “d”, “c” é escolhido igual a 1/16 da circunferência com raio igual a “d/2”. Assim $c = \pi d/16$ e a área polar $Aa = cb$ toma a forma $Aa = \pi bd/16$, logo com $\alpha = 22.5^\circ$ e das Eq. (1) e Eq. (4) tem-se:

$$F_t = B^2 \pi db \cos(\Pi/8) / (16 \mu_0). \quad (5)$$

$$F_t = \frac{1}{4} (\mu_0 N^2 \pi db / (16 \mu_0)) (I^2 / s^2) \cos(\Pi/8). \quad (6)$$

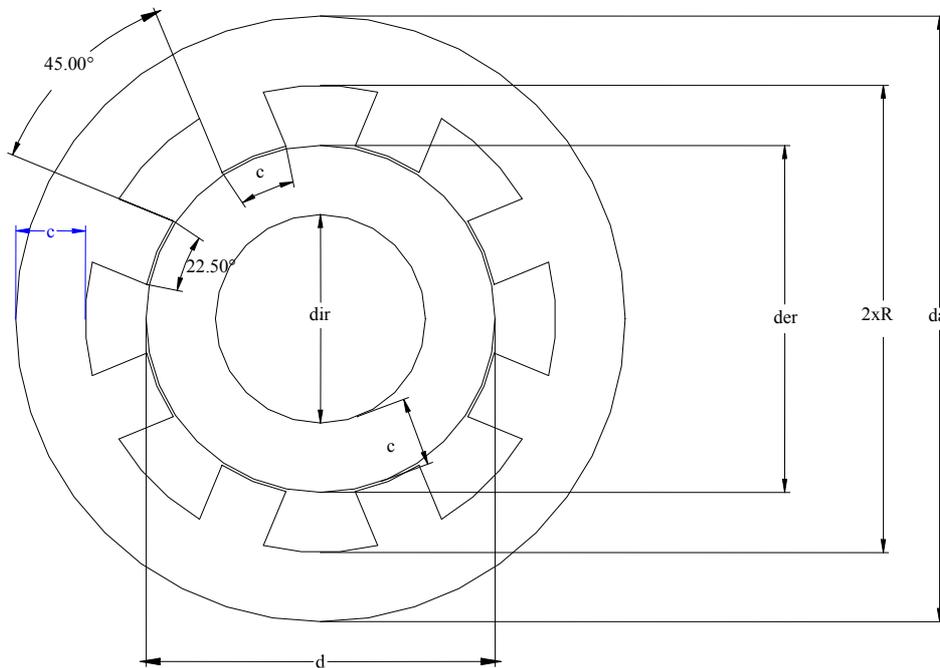


Figura 3. Mancal magnético radial.

2.2. Algoritmo Para o Projeto do Mancal Magnético

Para o dimensionamento do mancal magnético, definem-se inicialmente, os seguintes parâmetros: a força máxima a suportar, a espessura do entreferro e um diâmetro conhecido do mancal. A seguir, escolhe-se o material magnético que constituirá os núcleos do estator e do rotor e conseqüentemente, se estabelece a indução magnética máxima de trabalho. Escolhido um fio condutor, e portanto conhecendo a corrente máxima de operação e seu diâmetro, se procede ao cálculo das outras dimensões do mancal magnético com o procedimento descrito linhas adiante. Se o resultado não for satisfatório, o projetista poderá redefinir qualquer parâmetro inicial e executar novamente o algoritmo proposto.

As características de cada material ferromagnético podem ser obtidas através das curvas de magnetização B-H. O material recomendado deve possuir uma permeabilidade magnética relativa alta (materiais ferromagnéticos), por exemplo chapas de aço silício de grão não orientados tais como os fornecidos pela ACESITA(2001). Recentemente, Viarouge (2001) propôs o uso de novos materiais que dispensam o emprego de chapas vista a dificuldade e custo da construção dos detalhes das chapas sob medida (estampado).

É importante ressaltar que o presente algoritmo parte do princípio do conhecimento do diâmetro interno "d" do estator. Se este não for conhecido este poderá ser calculado a partir do conhecimento do entreferro e de quaisquer dos outros diâmetros: diâmetro interno do rotor (dir), diâmetro externo do rotor (der) ou então do diâmetro externo do estator (da), contando com auxílio da Fig. 3 e admitindo que $c = \pi d/16$.

Em resumo, após a introdução dos parâmetros iniciais e observando a teoria eletromagnética o algoritmo descrito consta dos seguintes passos:

a) Dada a curva B-H do núcleo escolhe-se o B_{max} na região linear do material.

- b) Com o entreferro "s" dado, utilizando a Eq. (2) encontra-se a força magnetomotriz (NI) que permite obter o B_{max} ;
- c) Dado o # fio e a i_{max} deste fio encontra-se N;
- d) Com a área do fio esmaltado ($A_f = \pi (df/2)^2$) e o fator de empilhamento (k) calcula-se A_n a área ocupada pelos fios no mancal : $A_n = N A_f \cdot k$
- e) A partir da especificação da força máxima " f_{max} " esperada calcula-se o produto "db" da Eq.(5), podendo opcionalmente se construir um gráfico para o cálculo da força máxima com "b" e "d" como parâmetros.
- f) Com "d" já conhecido ou deduzido e adotando-se a geometria do mancal tal que $c = \pi d/16$, calcula-se c.
- g) Para o calculo de "da" , calcula-se primeiro R com o auxílio do valor de A_n previamente calculado no passo d e sabendo que: $A_n = (22.5^\circ/360^\circ) \pi (R^2 - (d/2)^2)$, e $da/2 = R + c$.

2.3. Alguns Casos Práticos

2.3.1. Primeiro Caso: Cálculo para um motor elétrico.

Sendo este trabalho parte de um projeto de pesquisa integrado, um dos seus objetivos é a transferência de tecnologia. Por este motivo foi escolhida como primeira aplicação a substituição dos rolamentos de um motor de indução comercial cujas as características são as seguintes: Fabricante: WEG , potência: 2HP, trifásico, 220/380V, 60Hz, invólucro aberto, grau de proteção IP21. Este possui as seguintes características mecânicas: diâmetro do eixo - 19.90mm, diâmetro do rotor - 74.25mm, diâmetro externo da carcaça - 165.00mm, peso do rotor - 3.105kg (Fig. (4)).

Neste caso se parte do princípio que o diâmetro externo do rotor do mancal magnético é igual ao diâmetro externo do rotor da máquina operativa, como sugerido por Schweitzer, 1994. Esta restrição é adotada pois facilita a montagem mecânica das peças envolvidas no projeto. Com isto em mente e admitindo o mesmo entreferro, o diâmetro interno do estator do mancal radial "d" é igual a 75.15mm.

Seguindo a metodologia anteriormente descrita foi implementado um programa numérico com o qual foram calculadas as outras dimensões do mancal magnético radial empregando os seguintes parâmetros: fio 21 AWG, o qual tem o diâmetro "df" igual a 0,76mm, densidade de corrente máxima J igual a 3 A/mm² (corrente máxima " i_{max} " igual a 1,27 A). Para uma força máxima " f_{max} " de 100N, trabalhando com um " B_{max} " de 1T , um fator de empilhamento $k = 1.2$ e um entreferro "s" de 0.45mm, as dimensões são calculadas da seguinte forma:

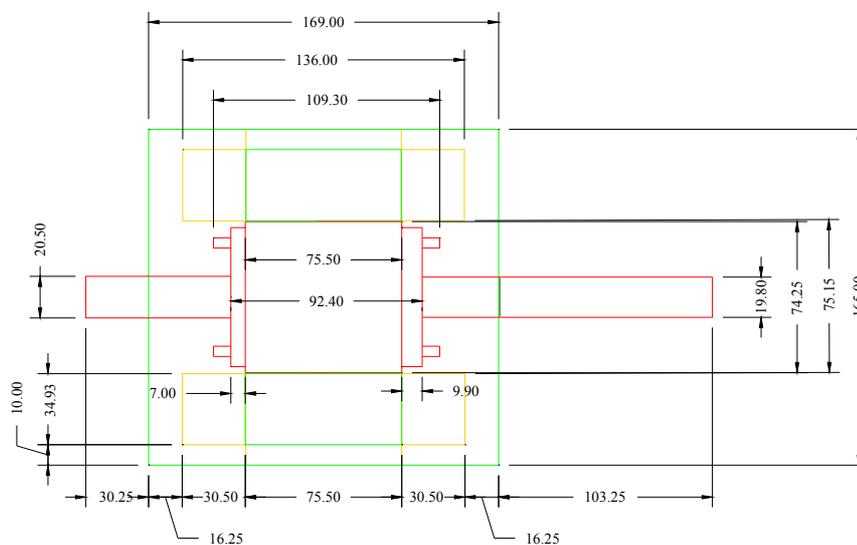


figura 4. Rotor de um motor WEG no qual se deseja substituir os rolamentos.

a) Calcula-se a força magnetomotriz NI a partir dos dados fornecidos:

$$NI = B_{\max} 2s / \mu_0$$

$$NI = 716.197 \text{ Ae}$$

b) Com o fio #21 e $i_{\max} = 1.27 \text{ A}$, calcula-se N;

$$N = Ni / i_{\max} \approx 564 \text{ esp} = 2N', \text{ onde } N' \text{ é o número de espiras por pólo. (} N' = 282 \text{ esp)}$$

c) Calcula-se An considerando o fator de empilhamento (k) e a área do fio esmaltado Af:

$$An = N Af k = 992\pi k (df^2)/4 = 256.07 k \text{ mm}^2$$

d) A partir da força máxima de carregamento (f_{\max}) calculam-se as dimensões "b", "c", do mancal

Com $f_{\max} = 100\text{N}$ e a partir da Eq. (5) tem-se:

$$f_{\max} / db = (B_{\max}^2 \pi \cos(\pi/8)) / (16 \mu_0) = 14.44 \text{ N/cm}^2, \text{ logo:}$$

$$db = 6.925 \text{ cm}^2.$$

Com $d = 75.15\text{mm}$ então $b = 9.218\text{mm}$ e com $c = d \pi/16$ então $c = 14.756\text{mm}$

e) Finalmente calcula-se "da":

$$R^2 = An (360^\circ/22.5^\circ\pi) + (d/2)^2, \text{ e com } k=1.2 :$$

$$R = 54.549\text{mm} \text{ e dado que } da/2 = R + c, \text{ então:}$$

$$da = 138.609\text{mm}.$$

Os gráficos abaixo ilustram o efeito causado pela variação de alguns dos parâmetros do projeto do mancal magnético radial enquanto os outros permanecem fixos.

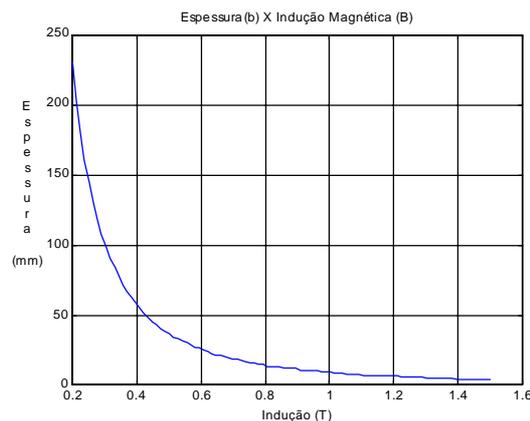


Figura 5. Variação da espessura "b" com a variação de "B".

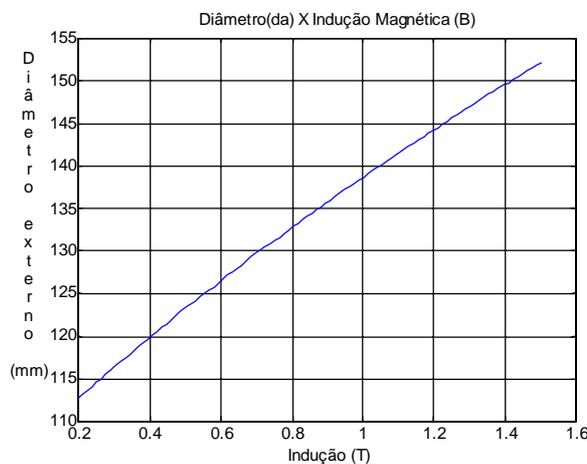


Figura 6. Variação do diâmetro externo do estator "da" com a variação de "B".

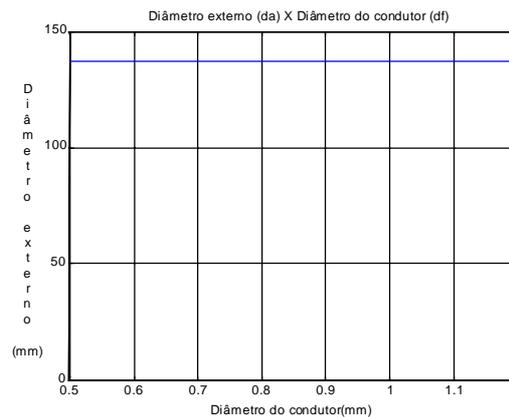


Figura 7. Variação do diâmetro externo "da" em função do diâmetro do fio "df".

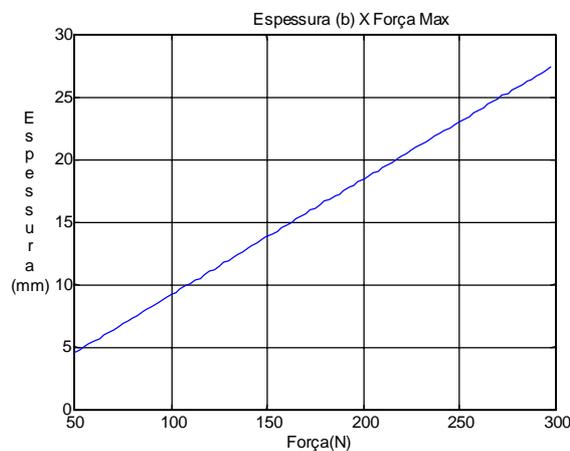


Figura 8. Variação da espessura "b" como função da força "F_{max}".

2.3.2. Segundo Caso: Cálculo para uma Centrífuga para Separação do Óleo da Água.

Trata-se de uma centrífuga acionada, através de correia, por um motor de indução de dois pólos, com frequência nominal de alimentação de 60 Hz, para a qual pretende-se aumentar a velocidade até 10000 rpm utilizando um inversor. A sua altura é de 510mm.

projeto prevê a substituição dos rolamentos do corpo da centrífuga pelos mancais magnéticos. Duas restrições geométricas foram consideradas: a primeira é que o diâmetro interno do rotor "dir" não pode ser menor do que 80,01mm e a segunda é que o diâmetro externo do estator "der" não pode ser maior do que 430mm. Neste ponto o programa se encarrega de calcular o diâmetro interno "d" do estator antes de continuar com o mesmo procedimento seguido para o motor.

Além disto, sendo conservador foi assumida uma densidade magnética máxima $B = 1 \text{ T}$, densidade de corrente máxima de 3 A/mm^2 e o fator de empilhamento dos condutores 1.2.

A construção de ambas partes do mancal é prevista para ser de chapas de aço silício de **grão não orientado**.

Serão mostrados dois casos.

Para o primeiro caso foi suposta só a carga nominal de **300N** e imposta a restrição de que o diâmetro interno do rotor "dir" seja igual a 80,01 mm:

Considerando um entreferro de 1,0 mm, a profundidade “b” do material magnético, deverá ser de 15.389 mm. Usando fio #21 (esmaltado) o número de espiras "N" será de 1254. As outras dimensões são mostradas na Fig. (9).

Alternativamente, com um entreferro de 0.5 mm, então $N = 627$ espiras, $b = 15.562$ mm, $c = 26,192$ mm, $d = 133,394$ mm, $d_a = 209.696$ mm, $d_R = 157.312$ mm, $d_{er} = 106.202$ mm.

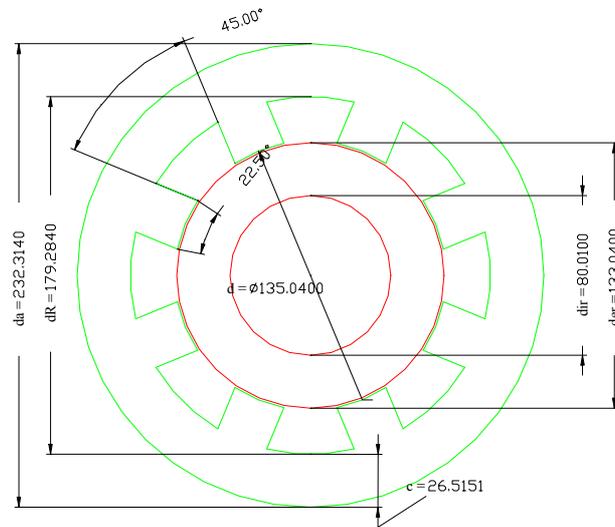


Figura 9. Proposta de mancal magnético radial

Para o segundo caso foi suposta a eventual carga máxima que seria da ordem de **15000N** e imposta a restrição de que o diâmetro interno do rotor “dir” seja igual a 170,0 mm:

Com um entreferro de 1mm, $N = 1254$ espiras, $b = 366.886$ mm, $c = 55.61$ mm, $d = 283.22$ mm, $d_a = 418.011$ mm, $d_R = 306.79$ mm, $d_{er} = 281.22$ mm.

Alternativamente, com um entreferro de 0.5mm, $N = 627$ espiras, $b = 369.032$ mm, $c = 55.287$ mm, $d = 281.574$ mm, $d_a = 404.235$ mm, $d_R = 293.662$ mm, $d_{er} = 280.574$ mm.

Com isto, a aparência da centrífuga no primeiro caso seria como mostrado na Fig. (10) e para os segundo caso como mostrado na Fig. (11).

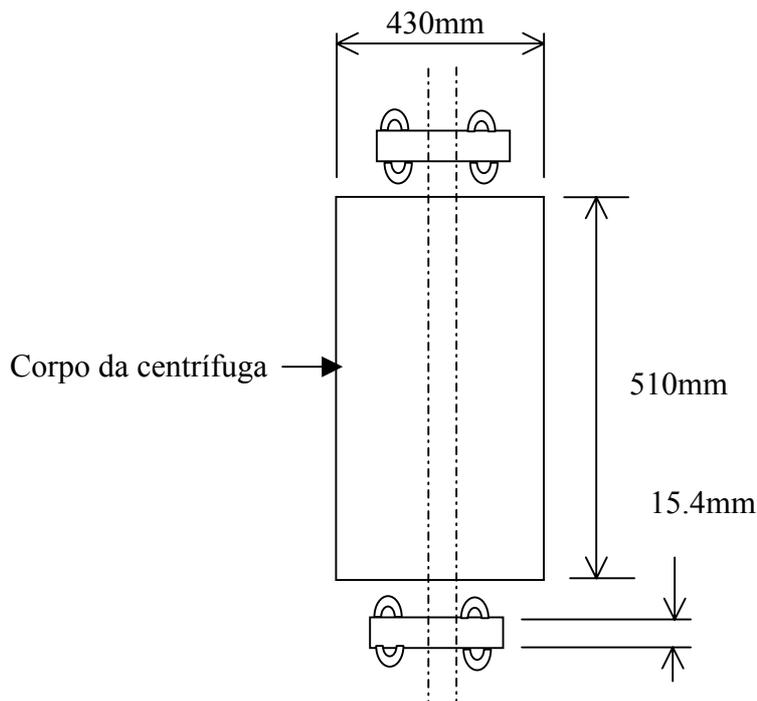


Figura 10. Mancais magnéticos radiais para carga radial máxima de 300N

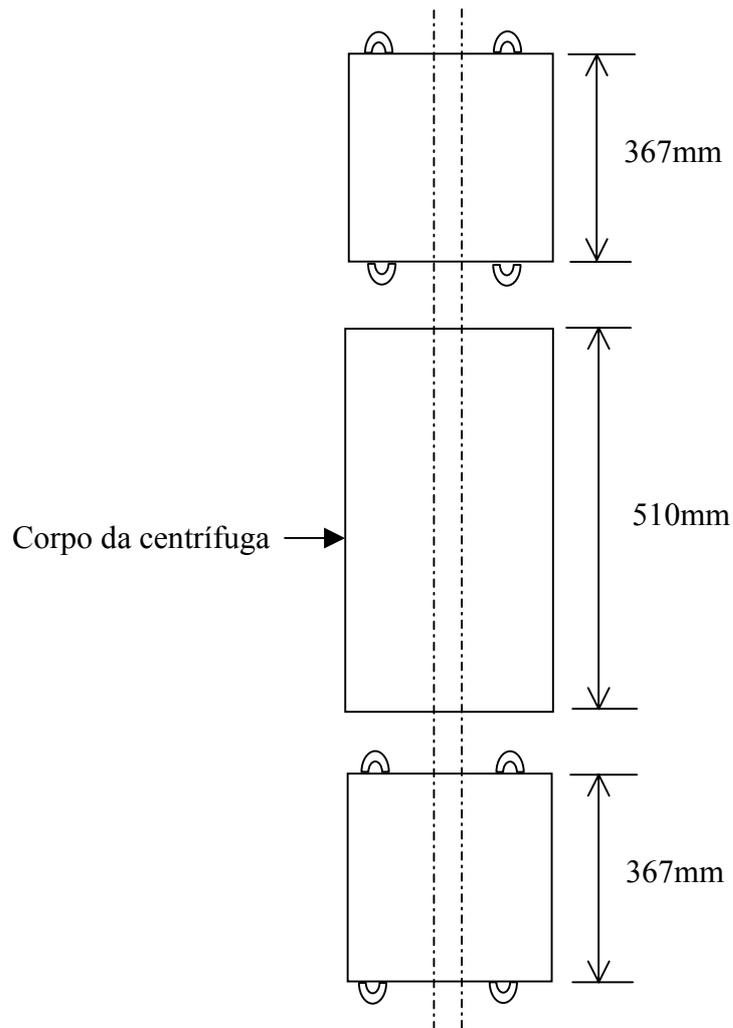


Figura 11.- Mancais magnéticos radiais para carga radial máxima de 1500N

3. CONCLUSÕES

Foi mostrada uma metodologia de projeto para substituir rolamentos convencionais por mancais magnéticos radiais. Para isto é necessária a introdução de um parâmetro mecânico preestabelecido, um diâmetro definido em função da aplicação.

Foi desenvolvido um programa que permite calcular as outras dimensões do mancal magnético mantendo a densidade magnética "B" constante.

Através de iterações, foi possível otimizar as dimensões do mancal magnético levando em consideração o fio utilizado nas bobinas, a carga radial, a densidade magnética máxima e o entreferro. O projetista pode tomar como base este trabalho para adicionar seus próprios critérios de otimização.

Foi observado que ao se variar o diâmetro do fio, ocorreram poucas alterações nos resultados obtidos, logo a escolha do fio ocorreu devido a facilidade de enrolar numa bobina um fio com diâmetro menor assim como a capacidade das fontes de corrente disponíveis.

Esta metodologia pode ser facilmente adaptada ao projeto de mancais axiais.

4. AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio do CNPq.

5. BIBLIOGRAFIA

- ACESITA, “www.acesita.com.br”, site na internet do fabricante de chapas de aço silício de grão orientado e não orientado, 2001.
- Actidyne®, 1995, “Hydroturbines in Japan”, The International Magazine of Actidyne® Magnetic Bearings, N° 5.
- Ansys®, 1994, “Magnetic Analysis of a Solenoid Actuator”, Ansys Help System.
- David, D., Santisteban, J., Andrade, R., Stephan, R., Ripper, A. and Nicolsky, R., 1999, “Magnetic Bearing for Induction Machine Using Active Radial Eletromagnetic and Passive Axial Superconducting Components”- Intermag 99- Paper EE08, Kyongju, Korea.
- Hayt, W.J., 1983, “Eletromagnetismo”, LTC S.A..
- Kraus, J.D., 1991, “Eletromagnetics”, McGraw-Hill.
- Matlab®, 1999, Matlab 5.3.0.10183.
- Mendes, S. R. A., 1999, “Projeto e Implementação de um Mancal Magnético Axial”, Projeto de Final em engenharia Elétrica, UFRJ, Brasil.
- Moon, F. C., 1994, “Superconducting Levitation- Applications to Bearings and Magnetic Transportation”, John Wiley & Sons.
- Ogata, K., 1970, "Engenharia de Controle Moderno", Prentice/ Hall do Brasil Ltda..
- Salazar, A.O., 1994, “Uma proposta de motor elétrico sem mancal mecânico”, Tese de doutorado, UFRJ, Brasil.
- Salazar, A., O., Chiba A., Fukao T., 2000, “A Review of Developments in Bearingless Motors”, in Seventh International Symp. On Magnetic Bearings, Zürich, pp. 335.
- Santisteban, J. A., 1999, “Estudo da influência de uma carga torsional sobre o posicionamento radial de um motor-mancal”, Tese de doutorado, UFRJ, Brasil.
- Santisteban, J. A. e Mendes, S., 2000, “Projeto e implementação de um mancal magnético axial”. Anais do Congresso Nacional de Engenharia Mecânica 2000, Natal, Brasil.
- Schweitzer, G., Bleuler, H. and Traxler, A., 1994, “Active Magnetic Bearings”, v/dlf Hochschulverlag AG na der ETH Zürich.
- Sinha P. K., 1987, “Electromagnetic Suspension”, Peter Peregrinus Ltd., London, UK.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído nesse trabalho.

RADIAL MAGNETIC BEARINGS – A DESIGN PROPOSAL

Rômulo Araújo Chapetta

UFF-TEE, e-mail : rachapetta@bol.com.br

José Andrés Santisteban

UFF-TEE , e-mail: jasl@mec.uff.br

Roberto Firmento de Noronha

UFF-TEM, e-mail: rnoronha@mec.uff.br

Universidade Federal Fluminense

Av. Passo da Pátria 156, São Domingos, Sala D509,

CEP 24210-240, Niterói, RJ. Phone: 55.21.2620-7070 br. 337

Abstract. *The substitution of ball and hydrodynamic bearings for magnetic ones shows different advantages, unimaginable at least three decades ago. A lot of publications refer to different innovations such as new control techniques as well as hybrid structures which use permanent magnets and even superconductors. However, in these works the procedure to obtain the dimensions of the electromagnetic structures is ignored a lot of times.*

In this work a practical methodology is presented in order to design radial electromagnetic bearings. This work generated a numeric program which allows to establish the geometric dimensions starting from data inputs such as: the maximum force, diameter of the conductive wires, its maximum operation current, the airgap, maximum density of magnetic flux in the bearing core and the dimension of a certain diameter defined by the application. The outputs are the unknown dimensions of the radial electromagnetic bearing.. Some project examples are shown, among the ones, one regarding to the substitution of the ball bearings of a conventional electric motor and another applied to a centrifuge.

Keywords: *Magnetic Levitation, Radial Magnetic Bearings, Electromagnetic Design.*