

UNESP

Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

Guaratinguetá

2.000



1110000439



"CONTROLE ADAPTATIVO E ESTRATÉGIAS DE COMPENSAÇÃO
PARA UM ROTOR COM MANCAL MAGNÉTICO"

CESAR ALBERTO SILVA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROJETOS E MATERIAIS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

***"Controle Adaptativo e
Estratégias de Compensação
para um Rotor com Mancal
Magnético"***

BANCA EXAMINADORA

CESAR ALBERTO SILVA

121

Prof. Dr. MAURO HUGO MATHIAS
Unesp-Feg

Prof. Dr. RICHARD MARKERT
TUM/Darmstadt

Fevereiro de 2001



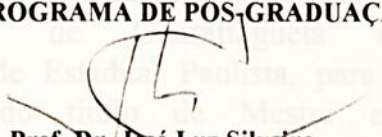
**“CONTROLE ADAPTATIVO E ESTRATÉGIAS DE COMPENSAÇÃO
PARA UM ROTOR COM MANCAL MAGNÉTICO”**

CESAR ALBERTO SILVA

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROJETOS E MATERIAIS

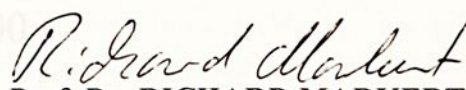
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. José Luz Silveira
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. NAZEM NASCIMENTO
Orientador / Unesp-Feg


Prof. Dr. MAURO HUGO MATHIAS
Unesp-Feg


Prof. Dr. RICHARD MARKERT
TUD/Darmstadt

Fevereiro de 2000

CARO LEITOR NÃO
RISQUE O LIVRO

CONTROLE ADAPTATIVO E ESTRATÉGIAS DE COMPENSAÇÃO
PARA UM ROTOR COM MANCAL MAGNÉTICO

CESAR ALBERTO SILVA

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia de Guaratinguetá da
Universidade Estadual Paulista, para a
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador : Prof. Dr. Nazem Nascimento

00439

Guaratinguetá
2000

FACULDADE DE ENGENHARIA
DE GUARATINGUETÁ
BIBLIOTECA

439



Ficha catalográfica preparada na Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da
Informação da Biblioteca – FEG/UNESP

Silva, Cesar Alberto
S586c Controle adaptativo e estratégias de compensação para um rotor
com mancal magnético / Cesar Alberto Silva. – Guaratinguetá : [s.n],
2000

77f. : il.; 30cm

Bibliografia: f.76-77

Orientador: Prof.Dr.Nazem Nascimento

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Engenharia

1. Mancais magnéticos 2. Controle adaptativo I.Título

CDU: 621.822

DADOS CURRICULARES

CESAR ALBERTO SILVA

NASCIMENTO: 08.06.66 – Aparecida / SP

FILIAÇÃO : Francisco Souza e Silva
Maria Ephigênia Sena Silva

1981/84	Curso Técnico Colégio Técnico Industrial de Guaratinguetá - UNESP
1984/86	Técnico de Treinamento da Confab Industrial S.A. - Divisão de Equipamentos Industriais
1986/90	Projetista Aeronáutico da EMBRAER - Empresa Brasileira de Aeronáutica
1988/93	Curso de Graduação Engenharia Mecânica Universidade de Taubaté - UNITAU
1992/Atual	Professor do Curso de Mecânica do Colégio Técnico Industrial de Guaratinguetá – UNESP
1992/93	Licenciatura em Mecânica Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC
1995/97	Licenciatura em Pedagogia Organização Guará de Ensino - OGE
1995/99	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica nível, de Mestrado na Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – UNESP
1999	Pesquisador Visitante na Universidade Técnica de Darmstadt (Alemanha), para desenvolvimento da parte experimental do mestrado

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que com minhas limitações e falhas, me deu condições de realizar este trabalho e me alimenta de ânimo para continuar caminhando.

Aos meus pais que na presença e na distância sempre são refúgio de paz.

A minha esposa e filha heroínas silenciosas que sempre velam pelo meu sucesso, que nos momentos em que, mesmo separados por um oceano, me transmitiam força e coragem para continuar.

A todos professores que tive em minha vida que me dotaram de conhecimentos para progredir, em especial aos meus professores do Colégio Técnico Industrial de Guaratinguetá que foram responsáveis por me transformar de aluno a profissional; gostaria de mencionar Prof. Mário Costa Maia Filho, Prof. Sílvio Marcondes Coelho (in memorian), Prof. Dr. Luís Roberto Carrocci.

A atual diretora do Colégio Técnico Industrial de Guaratinguetá Prof. Maria Auxiliadora Fortes Ribeiro Gonçalves que autorizou e incentivou meu afastamento para a realização de parte deste trabalho na Alemanha.

Ao meu orientador Prof. Dr. Nazem Nascimento que através destes anos de convivência científica e pessoal me instruiu e abriu caminhos, inclusive no exterior, que marcaram minha carreira profissional e científica; obrigado Herr Nascimento.

Aos professores Prof. Dr. José Elias Tomazini e Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias que, respectivamente, no início e no fim do meu trabalho foram de uma solidariedade, compreensão e apoio científico relevante.

Ao Prof. Dr. Richard Markert do Departamento de Mecânica Aplicada da Universidade Técnica de Darmstadt (Alemanha) que me convidou, subsidiou e orientou meu trabalho na Alemanha. Também deste mesmo departamento e universidade aos assistentes: Norbert Skricka que me auxiliou no esclarecimento de dúvidas e na integração a novos conhecimentos; Georg Wegener que facilitou meu dia a dia na Alemanha; Minh Nam Nguyen que dividiu comigo a sala e com um sorriso e uma palavra amiga me transmitia a sensação que não estamos sozinhos em nenhuma parte do mundo; Kai-Dietrich Wolf que após horas a fio de trabalho ainda tinha tempo para uma conversa amiga.

Ao Prof. Dr. Arvind Raman da Universidade de Purdue – USA, na época pesquisador convidado em Darmstadt, que com seu admirável conhecimento técnico muito me auxiliou na redação do meu trabalho, e me deu a satisfação da construção de uma nova amizade.

Ao amigo e companheiro Dr. Paulo Sérgio Burza que sempre teve ouvidos para um desabafo e palavras de otimismo para um contínuo recomeçar.

A todo sorriso anônimo que nos atenua a solidão.

Dedico este trabalho a todos brasileiros que não têm acesso à educação,
aos meus pais,
à minha esposa e à minha filha.

Este trabalho contou com o apoio financeiro da Universidade Técnica de
Darmstadt - Alemanha.



Este trabalho contou com o apoio financeiro da Universidade Técnica de
Darmstadt – Alemanha.



SUMÁRIO

Lista de figuras	10
Lista de tabelas	12
Lista de abreviaturas e símbolos	13
Resumo	16
Abstract	17
1 – Introdução	18
1.1 – Motivação e objetivos	19
1.2 – Princípio de operação de mancais magnéticos	20
1.3 – Exemplos de equipamentos que utilizam mancal magnético	22
1.4 – Vantagens e desvantagens dos mancais magnéticos	24
1.4.1 – Vantagens	24
1.4.2 – Desvantagens	25
1.5 – Limites gerais de uso	26
2 – Componentes de um mancal magnético	27
2.1 – Ordenador	28
2.2 – Sensor de posição	33
2.3 – Sistema de controle	33
2.4 – Amplificador de potência	34
2.5 – Eletromagneto	35
2.5.1 – Princípio de um eletromagneto	35
2.5.2 – Eletromagneto, o mancal magnético	36

“Quando se ama o abismo é preciso ter asas”

SUMÁRIO

Lista de figuras	10
Lista de tabelas	12
Lista de abreviaturas e símbolos	13
Resumo	16
<i>Abstract</i>	17
1 – Introdução	18
1.1 – Motivação e objetivos	19
1.2 – Princípio de operação de mancais magnéticos	20
1.3 – Exemplos de equipamentos que utilizam mancal magnético	22
1.4 – Vantagens e desvantagens dos mancais magnéticos	24
1.4.1 – Vantagens	24
1.4.2 – Desvantagens	25
1.5 – Linhas gerais da tese	26
2 - Componentes de um mancal magnético	27
2.1 – O rotor Jeffcott	28
2.2 – Sensor de posição	33
2.3 – Sistema de controle	33
2.4 – Amplificador de potência	34
2.5 – Eletromagneto	35
2.5.1 – Princípio de um eletromagneto	35
2.5.2 – Eletromagneto, o mancal magnético	36



2.6 – Características gerais do mancal magnético de estudo	39
2.7 – Informações técnicas do sistema ativo de mancal magnético de estudo	42

3 - Modelagem do sistema ativo de mancal magnético no Simulink 43

3.1 – Malha de controle	43
3.2 – Modelo do rotor no Simulink	44
3.3 – Modelo do controle no Simulink	47
3.4 – Modelo dos eletromagnetos e do amplificador de potência no Simulink	48
3.5 – Modelo da malha de controle no Simulink	49

4 - Controle adaptativo com mancal magnético 51

4.1 – Controle adaptativo a malha aberta	52
4.1.1 – Introdução à lei de controle	52
4.1.2 – Simulações da rigidez e do amortecimento ativo	54
4.1.3 – Princípio de operação do controle adaptativo a malha aberta	56
4.1.4 – Princípio de operação da bancada de teste com rotor Jeffcott e mancal magnético	59
4.1.5 – Medidas na bancada de teste do controle adaptativo a malha aberta	61
4.2 – Controle adaptativo a malha fechada	63
4.2.1 – Controle adaptativo a malha fechada com amplitude de deslocamento do rotor como indicador mensurável	63
4.2.1.1 – Operação e simulação do controle adaptativo à malha fechada com amplitude de deslocamento do rotor como indicador mensurável	64
4.2.1.2 – Medidas na bancada de teste do controle adaptativo à malha fechada com amplitude de deslocamento do rotor como indicador mensurável	67
4.2.2 – Controle adaptativo a malha fechada com ângulo de fase como indicador mensurável	68

4.2.2.1 – Operação e simulação do controle adaptativo à malha fechada com
ângulo de fase como indicador mensurável 70

6 – Conclusões 74

Referências Bibliográficas 76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Esquema de um mancal magnético

Figura 1.2 – Seção transversal de um mancal radial com quatro eletromagnetos

Figura 1.3 – Bomba turbomolecular, fabricada pela Pfeiffer AG, Wetzlar, utilizando mancal magnético

Figura 1.4 – Eixo motor de fresagem com controle digital e mancal magnético

Figura 2.1 – Componentes de um sistema ativo de mancal magnético

Figura 2.2 – Rotor Jeffcot com mancal magnético

Figura 2.3 – Excentricidade do mancal

Figura 2.4 – Viga Euler-Bernoulli

Figura 2.5 – Corrente elétrica atravessando um condutor

Figura 2.6 – Eletromagneto

Figura 2.7 – Um par de eletromagnetos

Figura 2.8 – Disposição do magneto

Figura 2.9 – Rotor Jeffcott com mancal magnético

Figura 2.10 – Mancal, rotor e estator

Figura 2.11 – Posicionamento do sensor de posição

Figura 2.12 – Dimensões básicas de construção do rotor Jeffcott com mancal magnético

Figura 3.1 – Esquema da malha de controle do mancal magnético

Figura 3.2 – Modelo do rotor no Simulink

Figura 3.3 – Modelo representativo do controle no Simulink

Figura 3.4 – Modelo representativo do eletromagneto no Simulink

Figura 3.5 – Modelo da malha de controle no Simulink

Figura 4.1 – Diagrama de bloco de um sistema de controle adaptativo

Figura 4.2 – Amplitudes de ressonância para diferentes valores de rigidez do mancal magnético

Figura 4.3 – Curvas V versus η para diferentes β

Figura 4.4 – Curvas V versus η para diferentes taxas de amortecimento D

Figura 4.5 – Ponto de chaveamento

Figura 4.6 – Operação do controle adaptativo com chaveamento

Figura 4.7 – Medidas com diferentes C_P e C_D

Figura 4.8 – Medidas da operação do controle adaptativo com chaveamento

Figura 4.9 – Diagrama de bloco da adaptação

Figura 4.10 – Curva V versus η , com e sem controle adaptativo

Figura 4.11 – Realimentação proporcional C_P

Figura 4.12 – Medidas da operação do controle adaptativo à malha fechada com amplitude de deslocamento do rotor como indicador mensurável

Figura 4.13 – Relação amplitude - fase em rotação síncrona

Figura 4.14 – Ângulo de fase ψ e amplitude de deslocamento V

Figura 4.15 – Diagrama de bloco da adaptação

Figura 4.16 – Operação do controle adaptativo à malha fechada com ângulo de fase como indicador mensurável

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Dados técnicos do mancal magnético

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

- $\hat{r}$ – amplitude de deslocamento do rotor
 A_L – área da face do polo do magneto
 k_i – constante da corrente da força
 K_{PA} – constante do amplificador de potência
 K_{PS} – constante do sensor de posição
 i_{ys} – corrente de controle na direção y
 r_s – deflexão do centro de massa do disco
 F_b – força de amortecimento
 F_e – força elástica
 F_m – força magnética
 ω_0 – frequência natural
 ω_{MO} – frequência natural modificada por β ($\omega_{MO} = \beta \cdot \omega_0$)
 β – número de vezes que se multiplica a frequência natural original do rotor
 Jeffcott sem mancal magnético
 μ_L – permeabilidade no vácuo
 η – razão entre velocidade angular do rotor (Ω) e frequência natural (ω_0)
 C_{MO} – rigidez passiva negativa do mancal magnético
 U_{iy} – voltagem proporcional a corrente de controle na direção y
 φ – denotação do ângulo $\varphi = \Omega t + \delta$
 δ – posição angular de excentricidade ε_s
 ψ – ângulo de fase
 θ – ângulo entre as sapatas do magneto

- α – aceleração angular para simular a partida do rotor ($\alpha = 0.01 \text{ rad/s}^2$)
- Ω – velocidade angular do rotor
- ε_s – excentricidade do disco
- AD – conversor analógico para digital
- b – amortecimento externo ao sistema do rotor
- b_M – amortecimento adicional introduzido pelo mancal magnético
- C_D – constante de realimentação diferencial do controle
- C_I – constante de realimentação integral do controle
- C_M – rigidez adicional introduzida pelo mancal magnético
- C_P – constante de realimentação proporcional do controle
- C_{P0} – índice inicial de realimentação proporcional
- c_W – rigidez do eixo
- D – taxa de amortecimento
- DA – conversor digital para analógico
- E – módulo de elasticidade do material do eixo do rotor
- $\mathbf{e}_y$ – vetor unitário na direção y
- $\mathbf{e}_z$ – vetor unitário na direção z
- F_{my} – força eletromagnética ativa de controle na direção y
- F_{mz} – força eletromagnética ativa de controle na direção z
- H – campo magnético
- i – corrente elétrica
- I – módulo de resistência da seção transversal do eixo do rotor
- i_{max} – corrente máxima do amplificador de potência
- i_s – corrente de controle
- i_V – corrente de pré-magnetização
- i_{y-} – corrente de saída do amplificador para as bobinas dos magnetos do mancal na direção y no polo negativo
- i_{y+} – corrente de saída do amplificador para as bobinas dos magnetos do mancal na direção y no polo positivo
- k – constante magnética do eletromagneto

- l – comprimento do eixo do rotor
 m – massa do disco
 n – número de espiras da bobina do eletromagneto
 O – ponto de interseção da linha de centro do mancal com o plano do disco
 P – controle proporcional
 PD – controle proporcional e integral
 PID – controle proporcional, integral e derivativo
 s – “air gap”
 S – centro de massa do disco
 t – tempo
 U_y – tensão elétrica proporcional a posição do rotor na direção y , fornecida pelo sensor de posição para o controle
 V – amplitude do deslocamento do rotor adimensionalizado por $|\varepsilon_s|$
 W – centro geométrico W do disco
 y – posição do rotor na direção y
 y_0 – posição desejada do rotor na direção y
 y_s – coordenada y da deflexão do centro de massa do disco
 z – posição do rotor na direção z
 z_0 – posição desejada do rotor na direção z
 z_s – coordenada z da deflexão do centro de massa do disco



Silva, C. A.. Controle adaptativo e estratégias de compensação para um rotor com mancal magnético. Guaratinguetá 1999, 77p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

Resumo

Mancais magnéticos são elementos estruturais que em princípio utilizam forças magnéticas para suportar componentes de máquinas como uma suspensão eletromagnética.

Neste trabalho são desenvolvidas diferentes estratégias de controle adaptativo para atuar em um sistema com mancal magnético. Este controle assegura reação instantânea a mudanças do rotor durante operação, através de alterações nos parâmetros do mancal, que podem ser a rigidez e amortecimento. Esta alteração é obtida através de forças eletromagnéticas aplicadas no rotor pelos atuadores.

As estratégias de controle desenvolvidas foram simuladas em computador utilizando-se o aplicativo Matlab/Simulink e implementadas em uma bancada de teste com o objetivo de verificar a performance da estratégia de controle em sistema reais. Para este fim utilizou-se um modelo de rotor Jeffcott com mancal magnético.

PALAVRAS-CHAVE: mancal magnético, controle adaptativo, rotor Jeffcott, vibração, ressonância.



Silva, C. A.. Adaptive control and compensation strategies for a rotor on magnetic bearing. Guaratinguetá 1999, 77p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

Abstract

Magnetic Bearings are structural elements that use magnetic forces to support rotating machinery as an electromagnetic suspension.

In this work different adaptive control strategies were designed to operate through magnetic bearing system. This control assures instantaneous response alterations of the rotor system during operation tuning the bearing parameters, such as stiffness and damping. The bearing parameters are tuned through the electromagnetic forces applied to the rotor by the actuators.

The adaptive control strategies designed were simulate in computer using the software Matlab/Simulink and implemented in a test rig that was developed to verify the performance of the control strategy on real systems. For this purpose a Jeffcott rotor model with magnetic bearing was used.

KEYWORDS: magnetic bearing, adaptive control system, Jeffcott rotor, vibration, resonance.

Capítulo 1

Introdução

Mancais magnéticos são elementos estruturais que em princípio utilizam forças magnéticas para suportar componentes de máquinas como uma suspensão eletromagnética. Eles são confeccionados com componentes mecânicos, componentes eletrônicos e sistema de controle, o qual determina a habilidade de colocar o rotor na posição desejada.

Estes componentes utilizam distintas tecnologias: 1. Sensores e atuadores. Através dos quais os sinais são coletados, e aplicadas as forças que atuam como suspensão para suportar a máquina na qual o mancal está instalado. 2. O sistema de controle utiliza os sinais obtidos através do sensor de posição para estabelecer a posição desejada do eixo. Este sinal é comparado através de um programa com uma referência para determinar o erro de posição. Após apropriado processamento, este sinal é enviado para os amplificadores que controlam as correntes para serem enviadas para os mancais. 3. Algoritmo de controle que é um programa utilizado no sistema de controle digital do mancal magnético [1].

Uma característica que diferencia o mancal magnético dos mancais convencionais é a operação sem contato entre parte rotativa e fixa do mancal, aliada a habilidade do sistema ativo de controle que atenua os níveis de vibração e ressonância. Este aspecto é em grande parte devido a estratégia de controle ser do tipo adaptativa, fazendo com que a resposta do sistema seja rápida.



1.1 – Motivação e objetivos

Um controle adaptativo baseia-se em avaliações freqüentes das características dinâmicas do sistema, comparando estas com as características desejadas e utilizando o erro de diferença para ajustar parâmetros que leve a uma performance desejada do sistema [2]. Uma estratégia do controle adaptativo não requer o completo conhecimento dos parâmetros do sistema.

Deve se também ressaltar que a estratégia de controle adaptativo é importante em sistemas de mancais magnéticos em razão da mesma aplicar conceitos da moderna tecnologia de controle digital.

Um sistema com mancal magnético e controle adaptativo tem a vantagem de assegurar reação instantânea a mudanças do rotor durante operação, através de alterações nos parâmetros do mancal. Isto significa que através do sistema de controle os parâmetros do mancal, como rigidez e amortecimento, são alterados durante a operação. A alteração dos parâmetros se dá através de forças eletromagnéticas aplicadas pelos atuadores no rotor. Esta possibilidade dá ao sistema uma flexível gama de utilização, sem precisar implementar modificações no sistema do rotor. O controle adaptativo em comparação com o controle PID com parâmetros fixos (convencional), permite que os parâmetros do mancal sejam alterados durante operação do sistema.

Na literatura sobre sistemas com mancais magnéticos, trabalhos relacionados a projetos de sistema com controle adaptativo são escassos, sendo assim, a principal motivação desta tese é estudar sistemas de controle adaptativo para atuar junto ao mancal magnético.

O primeiro objetivo deste trabalho é apresentar os conceitos da tecnologia de mancais magnéticos, e também ser útil como referência para futuras pesquisas.

O segundo objetivo é investigar diferentes técnicas de controle adaptativo para minimizar vibrações em um sistema com rotor flexível

exemplificadas através do modelo de rotor Jeffcott. Para alcançar este objetivo, foi utilizado o aplicativo Matlab/Simulink no projeto e simulação dos sistemas com controle adaptativo para atuar junto ao mancal magnético. Além disso, o sistema de controle foi implementado experimentalmente em bancada de teste, de modo a verificar a performance do controle de vibrações em sistemas reais.

1.2 – Princípio de operação de mancais magnéticos

Existem várias descrições do princípio de operação de mancais magnéticos, como exemplo na referência [3]. A seguir uma descrição breve do princípio de operação é discutida.

A Figura 1.1 apresenta um esquema dos principais componentes de um mancal magnético. Um sensor mede o deslocamento do rotor, de forma a comparar com uma posição desejada, um microprocessador operando como um controlador estabelece um sinal de controle com base no sinal de referência, um amplificador transforma o sinal de controle em uma corrente de controle, a qual gera forças magnéticas por intermédio do atuador magnético, de tal forma que o rotor permanece planando em sua posição. Este processo ocorre várias vezes durante o funcionamento. A posição do rotor é freqüentemente monitorada e ajustada para a posição desejada.

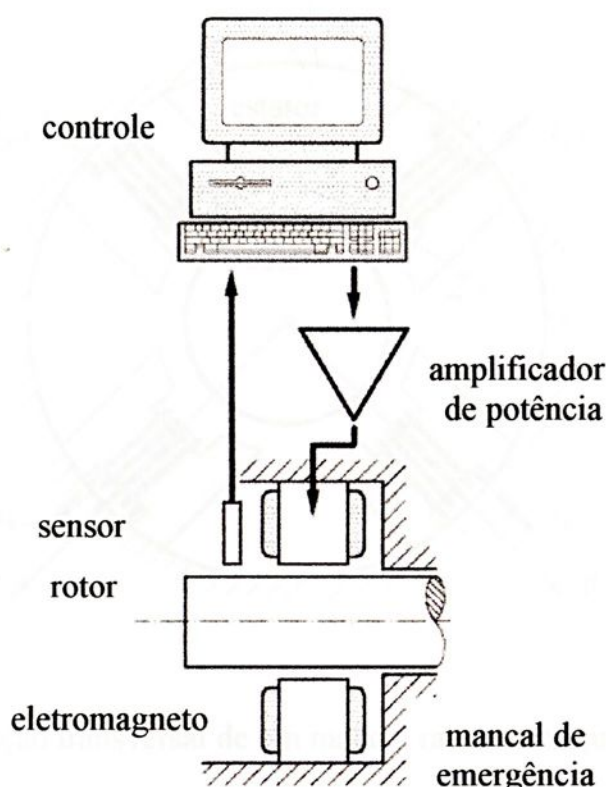


Figura 1.1 – Esquema de um mancal magnético.

Uma lei de controle (por exemplo um controle proporcional e derivativo PD), possibilita manter a estabilidade do planar do rotor, assim como ajustar a rigidez e o amortecimento da suspensão eletromagnética para valores apropriados. Rigidez e amortecimento podem variar em uma dada faixa, dentro dos limites físicos, e podem ser ajustados de acordo com a necessidade técnica. Os parâmetros do sistema podem ser alterados durante a operação, de forma a se ajustar com as propriedades do sistema.

O mancal magnético utilizado neste trabalho consiste de um estator com duas bobinas para cada direção (ao todo são pelo menos quatro rolamentos para um mancal radial) como mostrado na seção transversal do rotor na Figura 1.2.

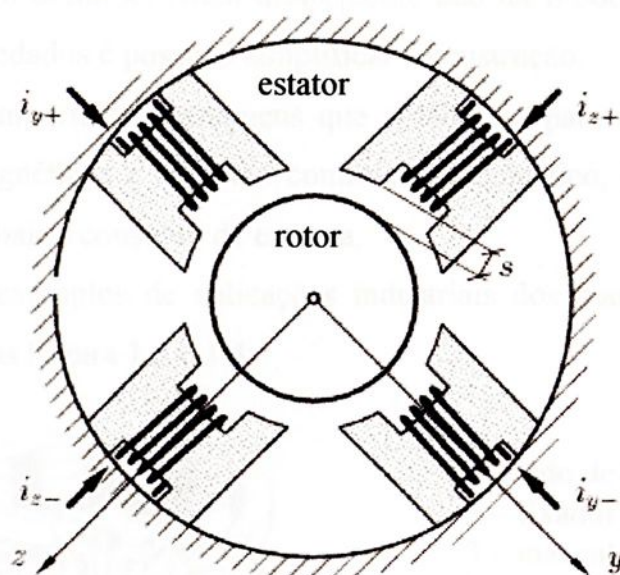


Figura 1.2 – Seção transversal de um mancal radial com quatro eletromagnetos.

1.3 – Exemplos de equipamentos que utilizam mancal magnético

As várias vantagens do mancal magnético tem levado a aplicações principalmente nas seguintes áreas [3]:

Sistemas que necessitem de vácuo e pureza: mancais magnéticos eliminam a necessidade de lubrificação, portanto, mantendo puro o vácuo ou outros processos especializados. Além disso, a ausência de contato entre metal com metal garante mínima contaminação.

Máquinas ferramentas: a principal vantagem é a alta precisão que pode ser obtida e a alta velocidade de rotação com relativa capacidade de carregamento. Adicionado a isto, o controle digital permite a implantação de avançados programas para controle integrado em todo processo – velocidade, avanço, profundidade de corte.

Turbinas e centrífugas: uma vantagem é a possibilidade de controlar o amortecimento de vibrações, e obter um comportamento dinâmico do

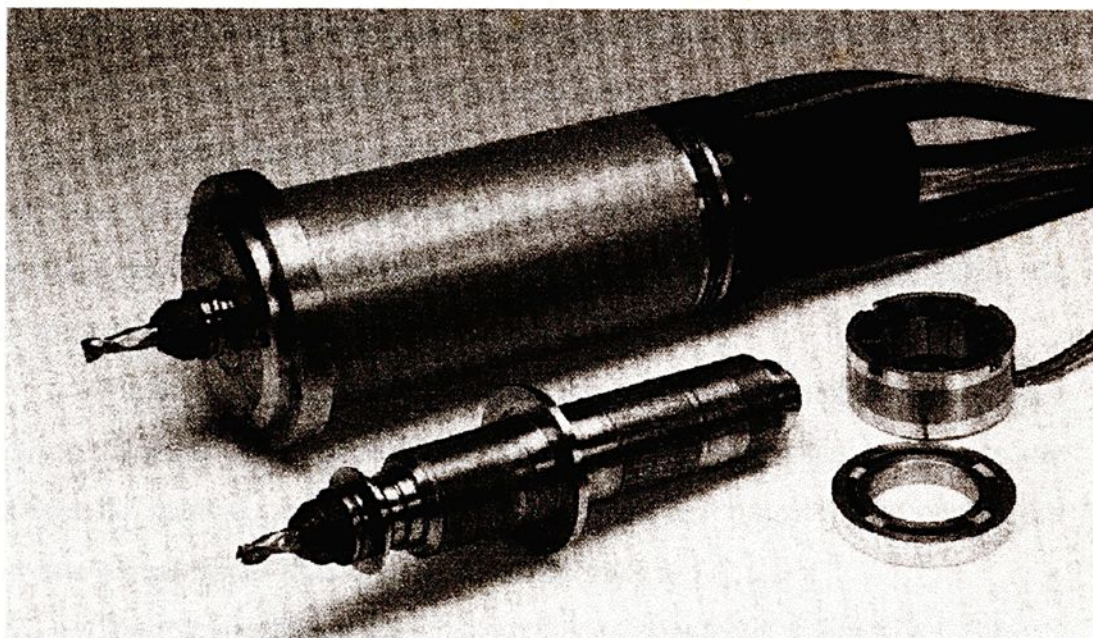


Figure 1.4 – Eixo motor de fresagem com controle digital e mancal magnético.

1.4 – Vantagens e desvantagens dos mancais magnéticos

1.4.1 – Vantagens

Na literatura técnica são mencionadas as diversas vantagens dos mancais magnéticos nas diferentes áreas de aplicação [1,3,4]. O que segue é um sumário destas vantagens:

Não-contato: O não contato da parte rotativa com a parte fixa do mancal magnético assegura somente atrito proveniente do ar ou de gás presente no processo. Isto é negligenciável se comparado com mancais convencionais que possuem óleo ou graxa para lubrificação. Máquinas operam mais eficientemente, com virtual não abrasão, requerendo menor manutenção, portanto, alta confiabilidade.

Sem contaminação: Mancais magnéticos podem ser usados em processos os quais não toleram a presença de nenhum lubrificante ou

refrigerante, tais como processamento de gases puros, processos à vácuo como os utilizados na manufatura de semicondutores.

Alta velocidade de rotação: Como não se leva em consideração o atrito nem desgaste das superfícies em rotação, tem-se a possibilidade de trabalhar com altas velocidades de rotação. Os limites de velocidade são determinados pela resistência dos materiais.

Consumo de energia: O consumo de energia em mancais magnéticos é mínimo. O único real consumo de energia são as perdas de resistência nas bobinas do mancal, os condutores do sistema de controle e as perdas por corrente parasitas das lâminas da bobina do mancal [1].

Controle dinâmico das características ajustáveis do mancal: Através do sistema de controle características como rigidez e amortecimento do rotor podem ser controladas, tendo com isto um controle ativo de vibração e desbalanceamento.

1.4.2 – Desvantagens

A principal desvantagem dos mancais magnéticos é relacionada ao custo de desenvolvimento [5]. Um projeto típico requer um mínimo de cinco sensores, e três atuadores eletromagnéticos ativos para suportar um rotor. Os sensores e o sistema de controle podem custar mais que todos os outros componentes do mancal magnético.

É importante também mencionar algumas freqüentes questões sobre mancais magnéticos, as quais não são desvantagens, mas precisam ser levadas em conta no projeto. 1. No caso de falta de energia elétrica baterias de emergência são necessárias. Estas são partes integrais do sistema de controle e são regularmente checadas para estar prontas para entrar em operação. 2. Também é necessário adaptar ao projeto mancais auxiliares (de rolamento ou de deslizamento). Estes tem a função de suportar o rotor nas seguintes circunstâncias: durante o transporte da máquina antes da instalação (quando o

sistema de controle não está operando); para opção ao usuário de desligamento normal da máquina com sistema de controle fora de operação; perda acidental do sistema de controle ou sobrecargas de carregamento [6].

1.5 – Linhas gerais da tese

Características gerais do mancal magnético e descrição dos componentes que formam o sistema ativo de mancal, bem como a equação de controle de cada parte do mesmo são apresentadas no capítulo 2.

O capítulo 3 descreve o procedimento para modelagem do sistema ativo de mancal magnético através do Matlab/Simulink, e também é apresentado cada parte do sistema para construção da malha de controle.

No capítulo 4, três estratégias de controle são desenvolvidas e implementadas: um sistema adaptativo em malha aberta, aqui chamado controle de chaveamento, e dois controle adaptativos em malha fechada. É mostrado através de simulações no computador e medidas experimentais na bancada de teste que através de controle adaptativo é possível atenuar níveis de vibração e evitar a ressonância em um rotor com mancal magnético.

Conclusão e direcionamento para trabalhos futuros são apresentados no capítulo 5.

Capítulo 2

Componentes de um mancal magnético

Os principais componentes ou sub-sistemas de um sistema ativo de mancal magnético são: rotor, sensor de posição, controlador, amplificador de potência e atuadores eletromagnéticos. Os atuadores e sensores são localizados na máquina, enquanto o controlador e o amplificador são localizados remotamente. Nós iremos discutir os modelos físicos de cada sub-sistema.

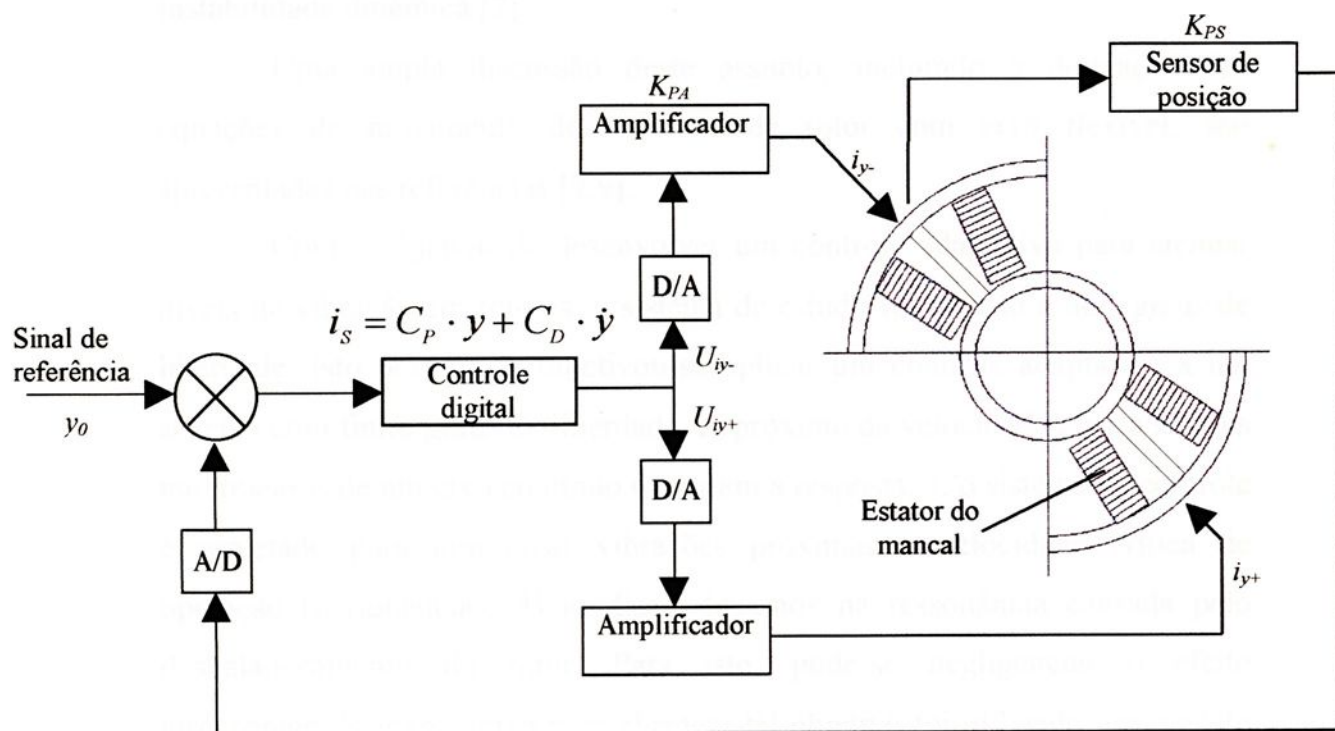


Figura 2.1 – Componentes de um sistema ativo de mancal magnético.

2.1 – O rotor Jeffcott

Pesquisas envolvendo máquinas com alta rotação e consequentemente com riscos de vibração ocupam grande espaço na literatura científica atual [7,8]. O objetivo destas pesquisas tem sido: predeterminar velocidades críticas, predeterminar frequência natural, calcular massas para correção de balanceamento e locais para se medir vibração, predeterminar amplitudes de vibrações síncronas causadas por desbalanceamento do rotor e predeterminar os limiares de velocidades e frequências de vibração que provocam instabilidade dinâmica [7].

Uma ampla discussão deste assunto, incluindo a derivação das equações de movimento de sistemas de rotor com eixo flexível, são apresentadas nas referências [7,9].

Com o objetivo de desenvolver um controle adaptativo para atenuar níveis de vibração em rotores, o sistema de estudo foi restrito a dois graus de liberdade. Isto porque: 1. objetivou-se aplicar um controle adaptativo a um sistema com finito graus de liberdade, 2. próximo da velocidade crítica só dois movimentos de um eixo contínuo dominam a resposta, 3. o sistema de controle é projetado para minimizar vibrações próximas a velocidade crítica de operação (ressonância). Além disso, focamos na ressonância causada pelo desbalanceamento do rotor. Para isto, pode-se negligenciar o efeito giroscópico do eixo. Então para alcançar tal objetivo foi utilizado um modelo de rotor Jeffcott com mancal magnético. Este modelo foi chamado *rotor Jeffcott* (também conhecido com *rotor de Laval*), após o dinamista inglês com este nome ter pela primeira vez em 1919, analisado a resposta de máquinas rotativas com alta velocidade e rotores desbalanceados, utilizando este modelo [7].



Este modelo é agora brevemente sumarizado:

Ele consiste em um disco maciço desbalanceado com massa m , montado ao meio de um eixo flexível bi-apoiado de massa desprezível e com rigidez c_W . Os mancais são rigidamente apoiados como mostrado na Figura 2.2. O amortecimento externo é b e a excentricidade do disco ε_s . No sistema do rotor um mancal magnético e montado ao redor do disco, o qual é o rotor do mancal. O mancal magnético aplica no rotor forças ativas de controle F_{mz} e F_{my} nas direções z e y conforme mostrado na Figura 2.2. O centro de massa S do disco esta a uma distância radial ε_s do centro geométrico W do disco. A linha de centro do mancal intersecta o plano do disco no ponto O , e o centro do eixo é flexionado por OW . A deflexão do centro de massa (posição r_s) é descrita pelas coordenadas z_s e y_s . δ é a posição angular de excentricidade ε_s no tempo zero, como mostrado na Figura 2.3.

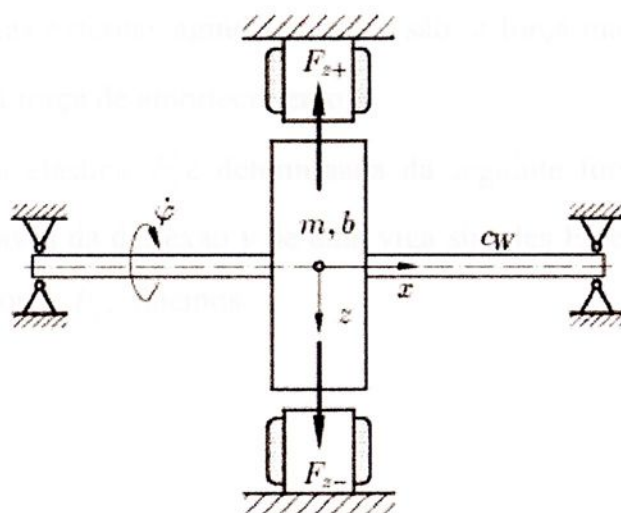


Figura 2.2 – Rotor Jeffcott com mancal magnético.

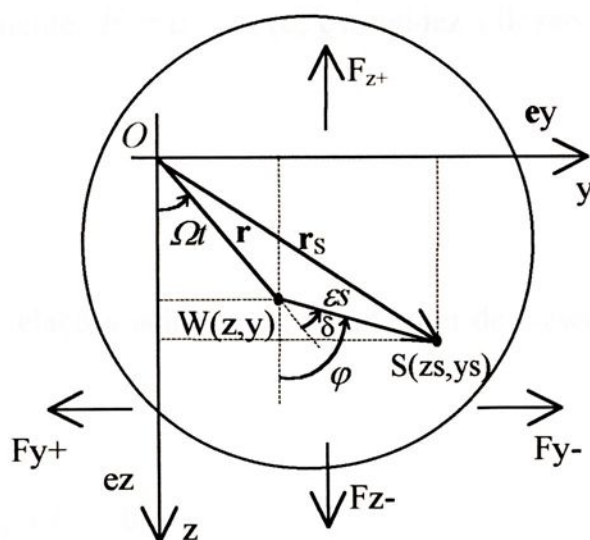


Figura 2.3 – Excentricidade do mancal.

As forças externas agindo no rotor são: a força magnética F_m , a força elástica F_e e a força de amortecimento F_b .

A força elástica F_e é determinada da seguinte forma: considerando a Figura 2.4 através da deflexão y de uma viga simples Euler-Bernoulli, sobre a aplicação da força F_e , obtemos:

$$y = \frac{F_e \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad (2.1)$$

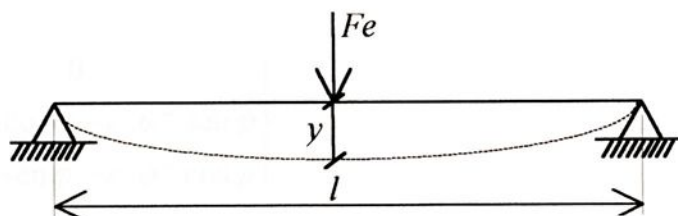


Figura 2.4 – Viga Euler-Bernoulli.

E conseqüentemente: $F_e = c_w \cdot y$, (c_w é a rigidez a flexão do eixo)

$$c_w = \frac{48 \cdot E \cdot I}{l^3} \quad (2.2)$$

Com as relações acima e da segunda lei de Newton, para o equilíbrio temos:

$$\begin{aligned} \sum F_{r_s} &= m \cdot \ddot{r}_s \\ m \cdot \ddot{r}_s + F_m + F_e + F_b &= 0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

A aceleração do ponto S pode ser determinada através da Figura 2.3, onde a posição r_s , é dada por:

$$\{r_s\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ y + \varepsilon_s \operatorname{sen} \varphi \\ z + \varepsilon_s \cos \varphi \end{Bmatrix}; \quad (2.4)$$

A velocidade e a aceleração respectivas são obtidas derivando (2.4)

$$\{\dot{r}_s\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \dot{y} + \varepsilon_s \dot{\varphi} \cos \varphi \\ \dot{z} - \varepsilon_s \dot{\varphi} \operatorname{sen} \varphi \end{Bmatrix} \quad (2.4a)$$

$$\{\ddot{r}_s\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \ddot{y} + \varepsilon_s \ddot{\varphi} \cos \varphi - \varepsilon_s \dot{\varphi}^2 \operatorname{sen} \varphi \\ \ddot{z} - \varepsilon_s \ddot{\varphi} \operatorname{sen} \varphi - \varepsilon_s \dot{\varphi}^2 \cos \varphi \end{Bmatrix} \quad (2.4b)$$

Denotando Ω como a velocidade angular do rotor, y e z como as coordenadas do ponto W , $\mathbf{e}_y$ e $\mathbf{e}_z$ como vetores unitários conforme indicado na Figura 2.3. Considerando também que o ângulo $\varphi = \Omega t + \delta$, $\dot{\varphi} = \Omega$ e $\ddot{\varphi} = 0$, pode se mostrar que:

$$\varepsilon_s \Omega^2 \sin(\Omega t + \delta) = \varepsilon_s \ddot{\varphi} \cos \varphi - \varepsilon_s \dot{\varphi}^2 \sin \varphi, \quad (2.5)$$

$$\varepsilon_s \Omega^2 \cos(\Omega t + \delta) = -\varepsilon_s \ddot{\varphi} \sin \varphi - \varepsilon_s \dot{\varphi}^2 \cos \varphi. \quad (2.6)$$

Através destas relações, obtém-se as seguintes equações de movimento para o rotor Jeffcott [9]:

$$\ddot{y} + \frac{b}{m} \dot{y} + \frac{c_W}{m} y + \frac{F_{my}}{m} = \varepsilon_s \Omega^2 \sin(\Omega t + \delta) \quad (2.7)$$

$$\ddot{z} + \frac{b}{m} \dot{z} + \frac{c_W}{m} z + \frac{F_{mz}}{m} = \varepsilon_s \Omega^2 \cos(\Omega t + \delta) \quad (2.8)$$

2.2 – Sensor de posição

Os sensores fornecem informações sobre a posição do rotor para o controlador na forma de tensão elétrica: $U_y = K_{PS} \cdot y$, onde K_{PS} é a constante do sensor de posição.

Uma importante parte da eficiência do mancal magnético depende da eficiência do posicionamento do sensor utilizado [3], ou seja, a escolha adequada do local de posição do sensor. Este aspecto possibilita a obtenção de informações precisas do posicionamento do rotor. Para medir a posição do rotor em movimento são utilizados sensores sem contato, os quais devem ser aptos a medir a superfície em rotação. Consequentemente, a qualidade da superfície do rotor, isto é, seu acabamento da superficial e a homogeneidade do material irão influenciar os resultados da medida do sensor. Um rotor com acabamento ruim de sua superfície pode causar ruídos na leitura do sensor; uma geometria irregular pode causar perturbação na frequência de rotação, todos estes fatores contribuem para diminuir a precisão da leitura do sensor.

2.3 – Sistema de controle

Detalhes do desenvolvimento do sistema de controle adaptativo será dado no capítulo 3. Neste item descrevemos a operação básica do sistema de controle do mancal magnético.

O controle do mancal magnético consiste de um conversor análogo para digital (AD), um processador de sinal digital e um conversor digital para análogo (DA).

A função do sistema de controle é processar o sinal de tensão recebido pelos sensores de posição e enviar uma corrente proporcional a esta voltagem para os amplificadores.



O sinal dos sensores de posição são filtrados de modo a eliminar as frequências de alto ruído, e frequências acima das frequências de Nyquist do conversor AD. Após remoção das altas frequências, o sinal de posição é convertido para um valor digital através do conversor analógico para digital.

O controle é implementado através de um processador de sinal digital, o qual processa o algoritmo de controle. Por exemplo utilizando um controle proporcional e derivativo (PD), teremos:

$$i_{ys} = C_P \cdot y + C_D \cdot \dot{y}. \quad (2.9)$$

A saída digital do processador corresponde a corrente i_y (onde: $i_y = i_v \pm i_{ys}$). Esta corrente é convertida pelo DA para uma voltagem U_{iy} , a qual é proporcional a corrente i_y . A voltagem U_{iy} é a entrada do amplificador de potência e controla a corrente de saída dos eletromagnetos (i_{y+} , i_{y-}).

Controles proporcional (P) e proporcional, integral e derivativo (PID) podem também ser implementados.

Propriedades do mancal magnético como rigidez, amortecimento, posicionamento do rotor, resposta do desbalanceamento e outras são determinadas pelo controle [3].

2.4 – Amplificador de potência

O amplificador de potência converte a voltagem de saída do controle para corrente para as bobinas dos magnetos do mancal $i_y = K_{PA} \cdot U_{iy}$. As correntes do amplificador são limitadas. O limite máximo é dado pela máxima corrente i_{max} disponível pelo amplificador de potência, o limite mínimo é zero, em razão de uma corrente negativa gerar uma força de atração da mesma forma que uma positiva.

$$0 \leq i \leq i_{\max} \quad (2.10)$$

2.5 – Eletromagneto

2.5.1 – Princípio de um eletromagneto

Uma corrente elétrica i passando por um condutor produz um campo magnético H em torno do mesmo, com intensidade proporcional a corrente e inversamente proporcional a distância r , como representado na Figura 2.5.

$$H = \frac{i}{2\pi r} \quad (2.11)$$

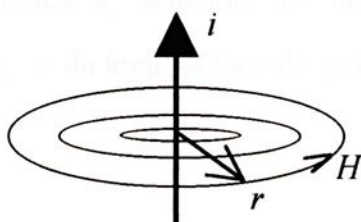


Figura 2.5 – Corrente elétrica atravessando um condutor.

Similarmente, se enrolarmos um arame condutor em espiras em torno de um núcleo isolante e passar corrente elétrica através deste arame condutor, obtemos um campo magnético. A intensidade deste campo magnético depende do número de espiras, geometria do núcleo e da permeabilidade magnética do material do núcleo. Permeabilidade magnética é a propriedade dos materiais que permite a maior ou menor passagem de fluxo magnético através dos mesmos. Materiais que possuem alta permeabilidade são os ferromagnéticos, os quais são utilizados na confecção dos atuadores do mancal magnético. Com

este campo magnético, forças magnéticas podem ser produzidas. Em uma estrutura mostrada na Figura 2.6 a força magnética é dada por:

$$F_m = k \left(\frac{i}{s} \right)^2 \quad (2.12)$$

usando:

$i \rightarrow$ corrente

$s \rightarrow$ “air gap”

$k \rightarrow$ constante magnética

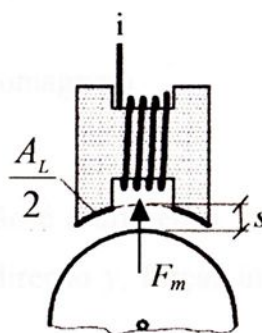


Figura 2.6 – Eletromagneto.

A constante magnética k depende do número de espiras n , da permeabilidade no vácuo μ_L e da área da face do polo A_L .

$$k = \frac{n^2 \cdot \mu_L \cdot A_L}{4} \quad (2.13)$$

2.5.2 – Eletromagneto, o mancal magnético

Um mancal magnético radial consiste de dois eletromagnetos para cada direção, os quais são fixados em oposição um ao outro [10], como mostrado no capítulo 1 Figura 1.2.

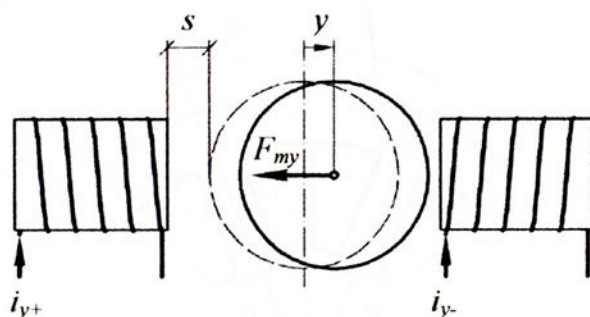


Figura 2.7 – Um par de eletromagneto.

Portanto a força total no rotor em cada direção é a diferença das duas forças em ambos eletromagnetos. Por exemplo, na direção y , forças individuais nos magnetos são dadas por:

$$F_{my+} = k \frac{i_{y+}^2}{(s+y)^2} \quad \text{e} \quad F_{my-} = k \frac{i_{y-}^2}{(s-y)^2}. \quad (2.14)$$

A força total agindo na direção y é dada por: $F_{my} = F_{my+} - F_{my-}$,

$$\text{então: } F_{my} = k \left\{ \frac{i_{y+}^2}{(s+y)^2} - \frac{i_{y-}^2}{(s-y)^2} \right\}. \quad (2.15)$$

Esta força magnética não linear depende da posição do rotor y e da corrente das bobinas i_{y+} e i_{y-} as quais fluem pela bobina. O “air gap” na posição zero é denotado por s . A constante magnética é dada por:

$$k = \frac{n^2 \cdot \mu_L \cdot A_L \cdot \cos \theta}{4}, \quad (2.16)$$

onde θ é o ângulo entre as sapatas do magneto. (Figura 2.8)

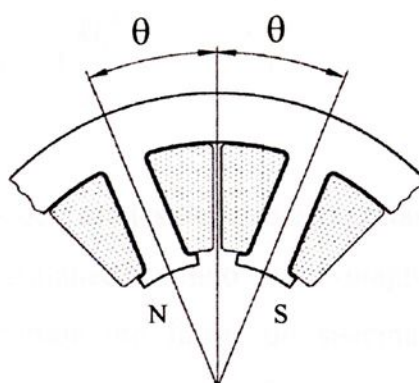


Figura 2.8 – Disposição do magneto.

A força magnética é não linear devido a corrente i_y e a posição y . Uma forma de reduzir a não linearidade da força magnética (equação 2.15) é através da pré-magnetização dos eletromagnetos [10].

As correntes de pré-magnetização i_V fluem permanentemente pelos eletromagnetos, reduzindo assim a grande não linearidade. A corrente de pré-magnetização i_V é superposta a corrente de controle i_s , então $i_+ = i_V + i_s$ e $i_- = i_V - i_s$.

$$F_{my} = k \left\{ \frac{(i_V + i_{ys})^2}{(s + y)^2} - \frac{(i_V - i_{ys})^2}{(s - y)^2} \right\} \quad (2.17)$$

A pré-magnetização estabelece comportamento linear ao sistema. A linearização da força magnética é dada através da diferenciação da equação 2.17 em relação a y e i_s , temos então:

$$dF_y = \frac{\partial F_y}{\partial y} dy + \frac{\partial F_y}{\partial i_{ys}} di_{ys}$$

$$F_{my} \approx F_{y0} = 4 \frac{ki_V}{s^2} i_{ys} - 4 \frac{ki_V^2}{s^3} y \quad (2.18)$$

Para situações de grandes deflexões ou altas correntes, a característica de não linearidade permanece, sendo a pré-magnetização insuficiente para estabelecer um comportamento linear do sistema. Se a deflexão do rotor alcançar o “air gap” $y=s$, teoricamente a força magnética torna-se infinita. Mas de fato a força será limitada pela saturação magnética do material do núcleo do eletromagneto [10].

2.6 – Características gerais do mancal magnético de estudo

O mancal magnético utilizado no trabalho está instalado no laboratório do Departamento de Mecânica Aplicada da Universidade Técnica de Darmstadt (Alemanha).

As Figuras 2.9 a 2.12 ilustram os detalhes deste mancal magnético.

Na Figura 2.9 a bancada de teste é mostrada: ela é composta por um rotor Jeffcott com um mancal magnético acoplado ao redor do disco e o eixo apoiado por dois mancais convencionais. Figura 2.10 mostra o mancal magnético desmontado, onde se pode observar separadamente o corpo do mancal, seu estator e rotor. O rotor mostrado funciona como o disco do rotor Jeffcott. A Figura 2.11 mostra a representação da seção transversal do mancal magnético e também a localização dos sensores de posição. A Figura 2.12 mostra as dimensões básicas de construção do mancal magnético utilizado.

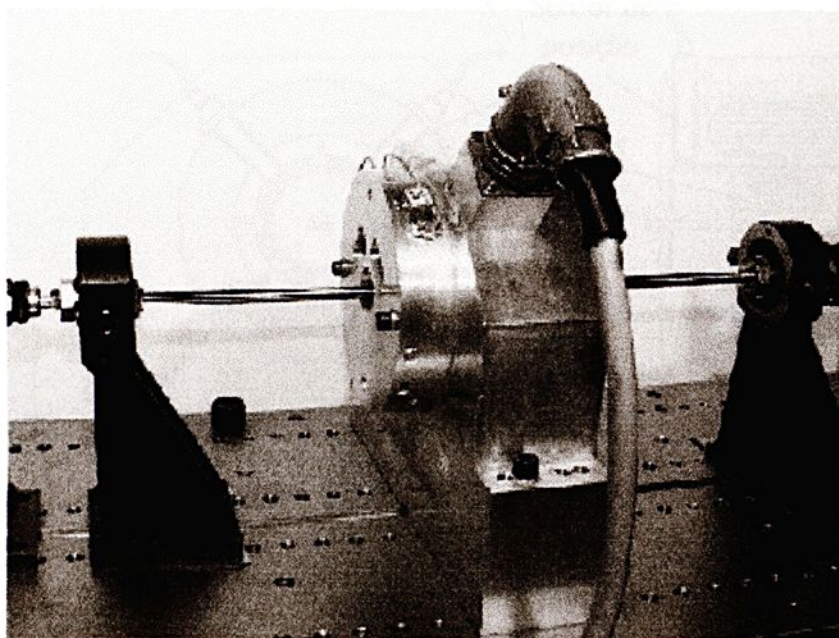


Figura 2.9 – Rotor Jeffcott com mancal magnético.

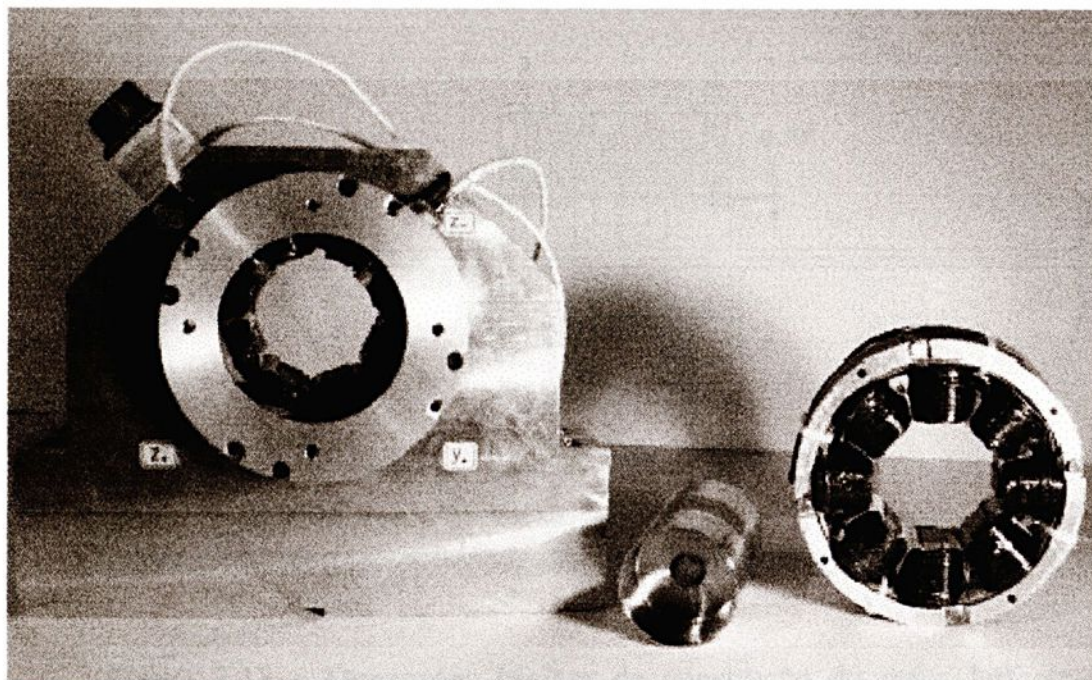


Figura 2.10 – Mancal, rotor e estator.

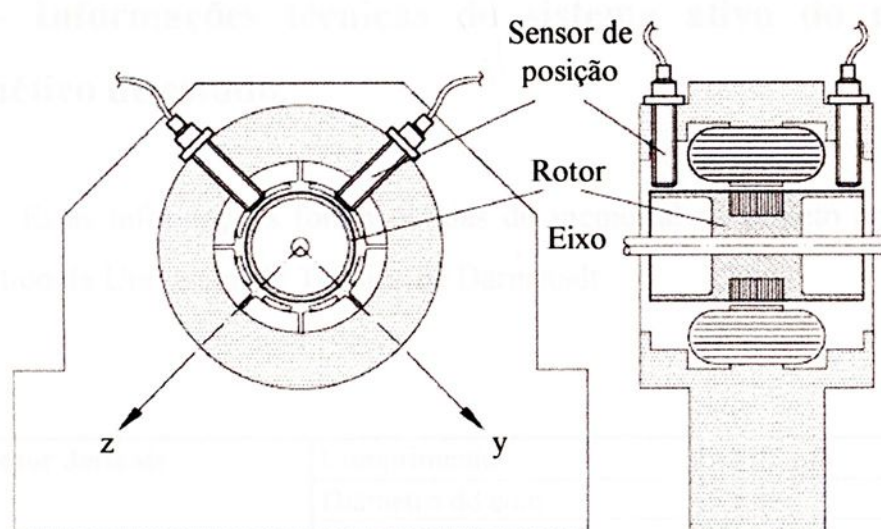


Figura 2.11 – Posicionamento do sensor de posição.

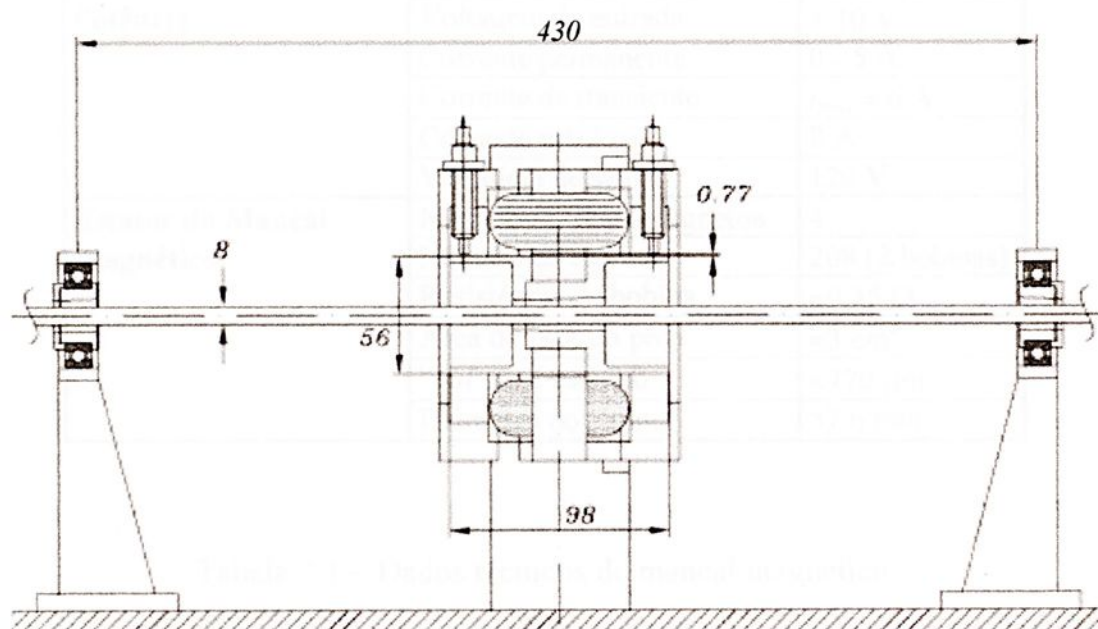


Figura 2.12 – Dimensões básicas de construção do rotor Jeffcott com mancal magnético.

2.7 – Informações técnicas do sistema ativo do mancal magnético de estudo

Estas informações foram obtidas do memorial de projeto do mancal magnético da Universidade Técnica de Darmstadt.

Rotor Jeffcott	Comprimento	≈430 mm
	Diâmetro do eixo	8 mm
	Material do eixo	Aço
	Peso do rotor	≈1 kg
	Diâmetro do rotor	56 mm
	Comprimento do rotor	98 mm
	RPM crítica	≈2000 min ⁻¹
Sistema de Medição de Posição	Faixa de medição	4 mm
	Ganho	2 V/mm
Amplificador de Potência	Numero de canais	4
	Voltagem de entrada	± 10 V
	Corrente permanente	0 - 5 A
	Corrente de transiente	$i_{max} \approx 6 \text{ A}$
	Corrente máxima	8 A
	Voltagem de saída	120 V
Estator do Mancal Magnético	Número de eletromagnetos	4
	Número de espiras	208 (2 bobinas)
	Resistência da bobina	≈0.35 Ω
	Área da face do polo	≈3 cm ²
	“Air gap” estático	≈770 μm
	Diâmetro do Estator	57.6 mm

Tabela 2.1 – Dados técnicos do mancal magnético.



Capítulo 3

Modelagem do sistema ativo de mancal magnético no Simulink

Para investigar procedimentos com controle adaptativo em um rotor Jeffcott com um sistema ativo de mancal magnético é necessário ter a bancada de teste com mancal magnético ou o modelo do sistema desenvolvido em um programa específico, ou ambos.

Neste trabalho foram aplicados ambos procedimentos, primeiro foi modelado e simulado um sistema com mancal magnético no computador e depois testado o controle do sistema com medidas experimentais na bancada de teste. Neste capítulo discutiremos o processo de modelagem e simulação no computador.

Para o modelamento do sistema no computador foi utilizado o aplicativo Matlab/Simulink. Simulink é um ambiente interativo para modelagem e simulação de uma grande variedade de sistemas dinâmicos. Ele permite a construção de modelos de diagrama de blocos, mudança dos parâmetros do modelo durante operação, e exibição dos resultados durante a simulação. Além disso o controle pode ser projetado diretamente através das equações de controle do sistema.

As constantes que são parâmetros do sistema e funções necessárias para operação do sistema de controle são gravadas em arquivos de programa do Matlab (arquivos com extensão .m).

3.1 – Malha de controle

Para modelar o sistema ativo de mancal magnético primeiro foram construídas cada parte do sistema separadamente. Depois estas partes foram



juntadas para formar a malha de controle. A malha de controle é composta por: rotor, sensor, controle, amplificador de potência e eletromagnetos operando em uma malha contínua.

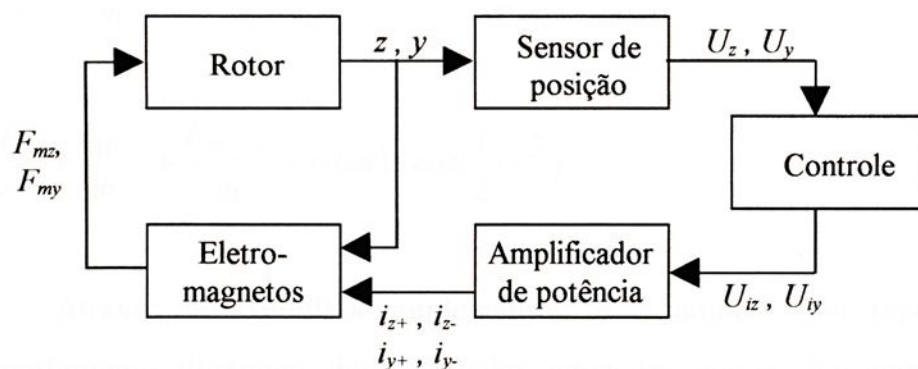


Figura 3.1 – Esquema da malha de controle do mancal magnético.

O controle recebe dois sinais de posição, um é a posição atual do rotor e o outro é a posição desejada. A diferença entre os dois sinais é enviada, no caso deste projeto para um controle PD. No controle PD os coeficientes proporcional e derivativo são definidos de acordo com equações e parâmetros do sistema, para finalmente gerar um sinal de controle. Este sinal de controle vai para o amplificador de potência onde é convertido em correntes para os eletromagnetos. Forças são então geradas nos atuadores eletromagnéticos para por o rotor na posição desejada.

3.2 – Modelo do rotor no Simulink

Considerando as equações (2.7) e (2.8) de movimento do rotor Jeffcott com mancal magnético na direção y e z , e denotando o ângulo $\varphi = \Omega t + \delta$ esquematizado na Figura 2.3. Tem-se para o rotor com movimento circular uniformemente acelerado, que o ângulo $\varphi = \Omega t + \delta = \varphi_0 + \Omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2$ e

$\Omega = \Omega_0 + \alpha t$. Admitindo condições iniciais nulas com $\Omega_0 = 0$ e $\varphi_0 = 0$, obtêm-se:

$$\ddot{y} + \frac{b}{m} \dot{y} + \frac{c_W}{m} y + \frac{F_{m=y}}{m} = \varepsilon s(\alpha t)^2 \sin\left(\frac{1}{2} \alpha t^2\right), \quad (3.1)$$

$$\ddot{z} + \frac{b}{m} \dot{z} + \frac{c_W}{m} z + \frac{F_{m=z}}{m} = \varepsilon s(\alpha t)^2 \cos\left(\frac{1}{2} \alpha t^2\right), \quad (3.2)$$

Através do Simulink implementou-se o modelo que reproduz o comportamento dinâmico descrito pelas equações acima. No modelo foi adotado $\alpha = 0,01 \text{ rad/s}^2$, como aceleração de partida do rotor. Mais detalhes sobre a modelagem de sistemas através do aplicativo Matlab/Simulink são encontradas em [11,12].

Os parâmetros de entrada do modelo do rotor são as forças eletromagnéticas F_{my} e F_{mz} , e as saídas as posições do rotor nas direções y e z .

A Figura 3.2 mostra a modelagem da equação do rotor feita no Simulink. A moldura tracejada I e III mostra a derivação das forças que são opostas ao movimento do rotor (b , c_W , F_m) nas direções y e z , respectivamente. E na moldura II é onde é gerada a força de excitação nas direções y e z :

$$\varepsilon s(\alpha t)^2 \sin\left(\frac{1}{2} \alpha t^2\right) \text{ e } \varepsilon s(\alpha t)^2 \cos\left(\frac{1}{2} \alpha t^2\right).$$

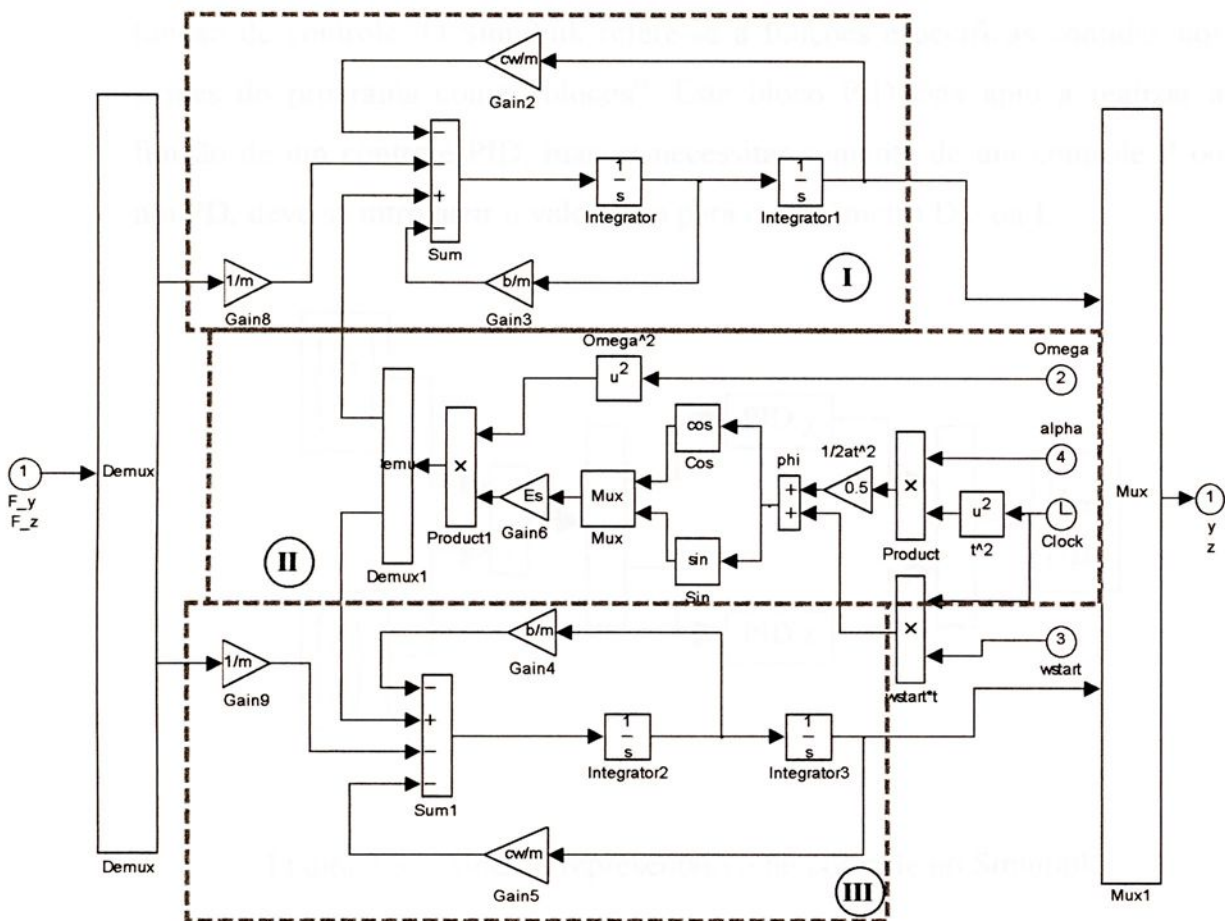


Figura 3.2 – Modelo do rotor implementado no Simulink.

3.3 – Modelo do controle no Simulink

Para introduzir um controle proporcional (P), proporcional e derivativo (PD) ou proporcional, derivativo e integral (PID) em um modelo no Simulink basta acrescentar um bloco PID, que está pronto para realizar esta função de controle. O Simulink refere-se a funções específicas contidas nos ícones do programa como “blocos”. Este bloco PID está apto a realizar a função de um controle PID, mas se necessitar somente de um controle P ou um PD, deve se introduzir o valor zero para os parâmetro D e ou I.

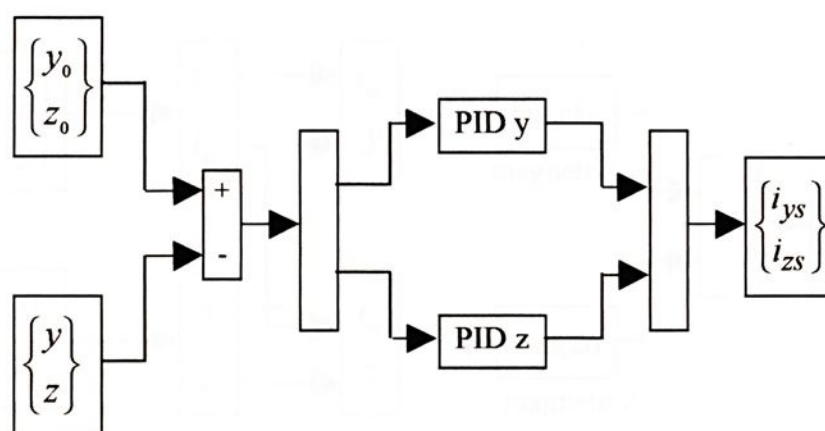


Figura 3.3 – Modelo representativo do controle no Simulink.

Os parâmetros de entrada do controle são: a posição desejada do rotor nas direções y e z denotadas por y_0 e z_0 , e a posição atual do rotor nas direções y e z. E a saída é o sinal de controle, na forma de correntes (i_{ys} , i_{zs}) para os eletromagnetos. Esta saída é convertida pelo conversor DA para voltagem (U_{ys} , U_{zs}), as quais são proporcionais as correntes (i_{ys} , i_{zs}).

Neste trabalho foram desenvolvidas estratégias diferentes de controle, cada uma delas possuindo um modelo diferente para se obter a performance desejada.

3.4 – Modelo dos eletromagnetos e do amplificador de potência no Simulink

O amplificador de potência converte o sinal de controle em corrente de controle. No modelo projetado da malha de controle no Simulink não é necessário um amplificador de potência, porque as características são assumidas como perfeitamente linear, e a saída do controlador já produz a corrente de controle i_{sy} e i_{sz} .

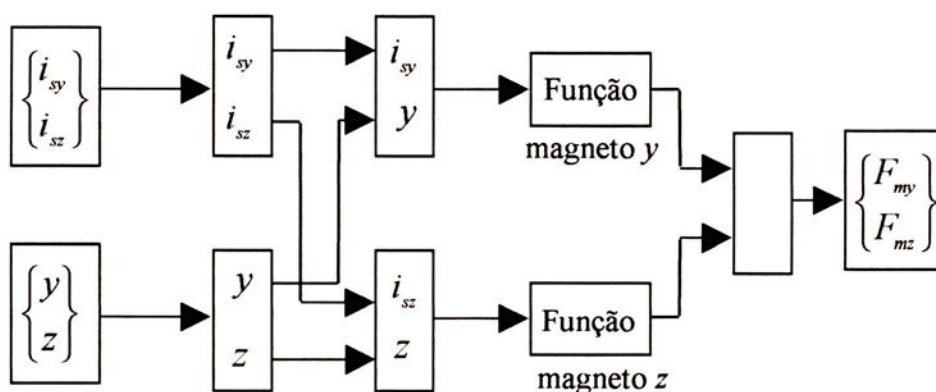


Figura 3.4 – Modelo representativo do eletromagneto no Simulink.

Na Figura 3.4 o bloco “Função” consiste na linearização da equação da força magnética, através da pré-magnetização, como obtida anteriormente no capítulo 2 (equação 2.18).

Os parâmetros de entrada deste modelo são as correntes enviadas pelo controlador e a posição atual do rotor. Os parâmetros de saída são as forças eletromagnéticas F_{my} e F_{mz} para preservar ou conduzir o rotor para a posição desejada.

A função dos sensores de posição é automaticamente realizada pela medida da posição y e z do rotor.

3.5 – Modelo da malha de controle no Simulink

Como mencionado as partes individuais do mancal magnético sendo colocadas para executar suas operações de forma contínua formam o que chamamos de *malha de controle*.

Na Figura 3.5 é mostrado o modelo da malha de controle no Simulink. Dentro de cada parte da malha representada na Figura 3.5 há o modelo do diagrama de blocos que realiza a função do componente.



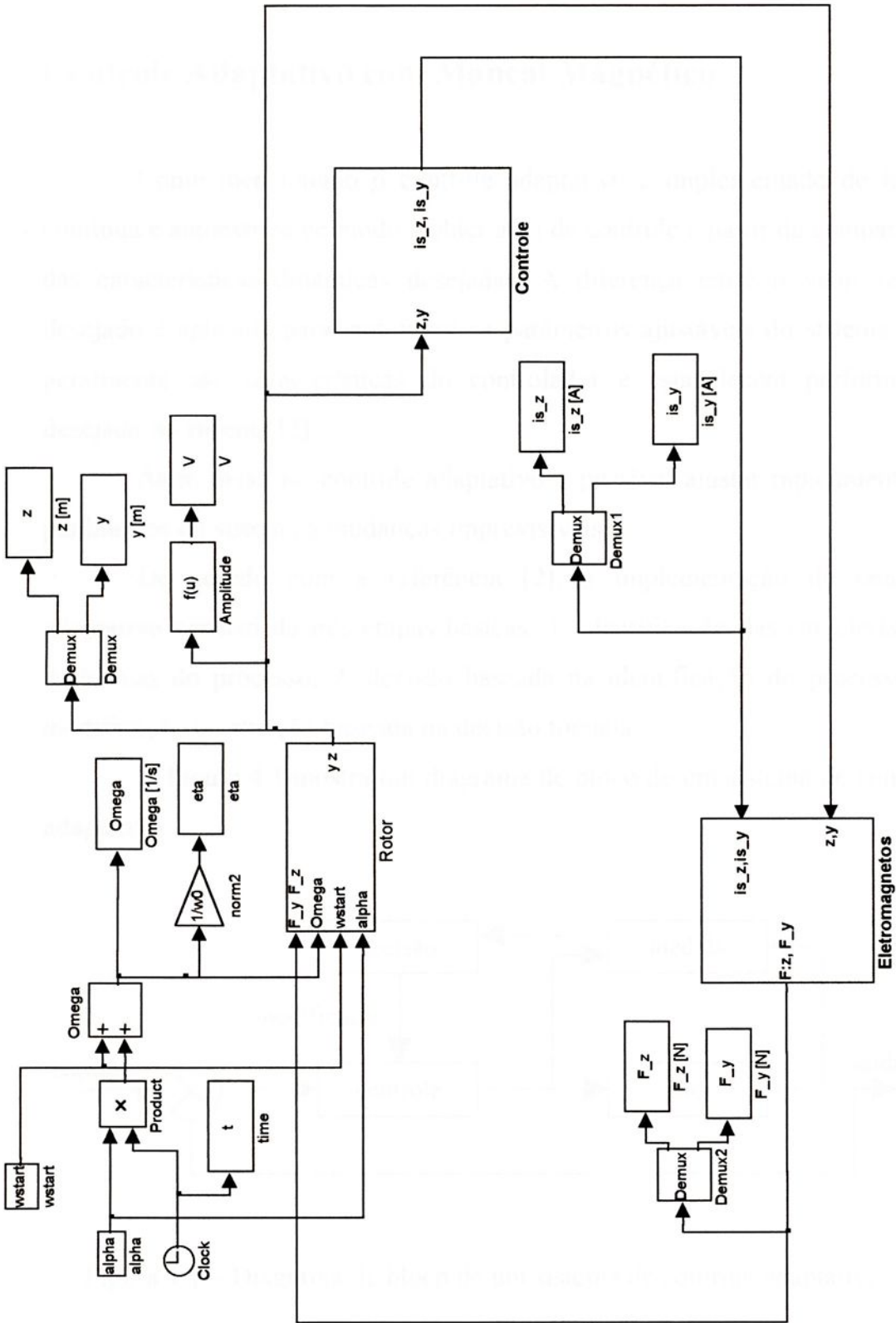


Figura 3.5 – Modelo da malha de controle no Simulink.

Capítulo 4

Controle Adaptativo com Mancal Magnético

Como mencionado o controle adaptativo é implementado de forma contínua e automática de modo a obter a lei de controle a partir da comparação das características dinâmicas desejadas. A diferença entre o valor real e desejado é aplicada para sintonizar os parâmetros ajustáveis do sistema, que geralmente são características do controlador e estabelecem performance desejada do sistema [2].

Além disso no controle adaptativo é possível ajustar rapidamente os parâmetros do sistema a mudanças imprevisíveis.

De acordo com a referência [2], a implementação do controle adaptativo consiste de três etapas básicas: 1. identificação das características dinâmicas do processo, 2. decisão baseada na identificação do processo, 3. modificação ou atuação baseada na decisão tomada.

A Figura 4.1 mostra um diagrama de bloco de um sistema de controle adaptativo.

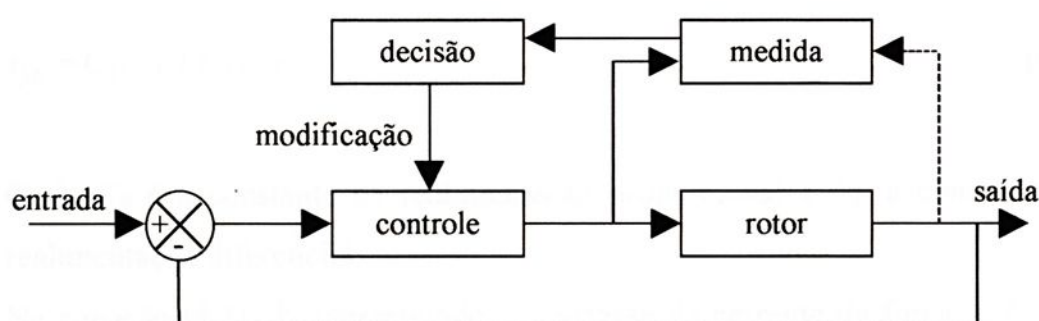


Figura 4.1 – Diagrama de bloco de um sistema de controle adaptativo.

4.1 - Controle adaptativo com malha aberta

4.1.1 – Introdução a lei de controle

Após a construção da malha de controle, pode-se iniciar as investigações de controle do comportamento dinâmico do rotor.

Na configuração de trabalho consistindo de rotor Jeffcott, o mancal magnético introduz ao sistema do rotor uma rigidez adicional e um amortecimento adicional. Isto é estabelecido através da introdução de um controle PD na equação da força eletromagnética (na direção y e z), como obtida anteriormente no capítulo 2. Na análise a seguir a introdução da lei de controle nas equações da força eletromagnética é desenvolvida somente para a direção y , ressaltando que um procedimento idêntico é realizado na direção z .

$$F_{my} \approx F_{y0} = 4 \frac{k_{iV}}{s^2} i_{ys} - 4 \frac{k_{iV}^2}{s^3} y \quad (4.1)$$

Introduzindo o controle PD através da corrente i_s , temos:

$$i_{ys} = C_P \cdot y + C_D \cdot \dot{y} \quad (4.2)$$

Onde C_P é a constante de realimentação proporcional e C_D a constante de realimentação diferencial.

Na equação (4.1), k_i corresponde a constante da corrente da força, e C_{MO} a rigidez passiva negativa do mancal magnético, com $k_i = 4 \frac{k_{iV}}{s^2}$, e

$$C_{MO} = 4 \frac{k_{iV}^2}{s^3}, \text{ tem-se:}$$

$$F_{my} = k_i(C_P \cdot y + C_D \cdot \dot{y}) - C_{MO} \cdot y$$

$$F_{my} = (k_i \cdot C_P - C_{MO})y + k_i \cdot C_D \cdot \dot{y} \quad (4.3)$$

Inserindo a equação 4.3 na equação de movimento do rotor Jeffcott com mancal magnético obtêm-se:

$$\ddot{y} + \frac{(b + k_i C_D)}{m} \dot{y} + \frac{(c_W + k_i C_P - C_{MO})}{m} y = \varepsilon_S \Omega^2 \sin(\Omega t + \delta) \quad (4.4)$$

Na equação 4.4, b_M é um amortecimento adicional introduzido no sistema pelo mancal magnético, e C_M é a rigidez adicional também introduzida pelo mancal magnético, sendo $b_M = k_i \cdot C_D$ e $C_M = k_i \cdot C_P - C_{MO}$, obtêm-se:

$$\ddot{y} + \frac{(b + b_M)}{m} \dot{y} + \frac{(c_W + C_M)}{m} y = \varepsilon_S \Omega^2 \sin(\Omega t + \delta) \quad (4.5)$$

É possível controlar a rigidez e a frequência de ressonância do rotor através de mudanças no componente proporcional do controle, como obtido na equação 4.4:

$$\omega_{MO}^2 = \frac{c_W + k_i \cdot C_P - C_{MO}}{m}. \quad (4.6)$$

Através do componente derivativo é possível controlar o amortecimento e consequentemente a amplitude das vibrações.

Para obter uma modificação na frequência de ressonância isto é β vezes a frequência original do rotor Jeffcott sem mancal magnético, ou seja:

$\omega_{MO} = \beta \cdot \omega_0$, a constante proporcional pode ser definida como:

$$C_P = \frac{(\beta^2 - 1)c_W + C_{MO}}{k_i}. \quad (4.7)$$

Para se obter uma amplitude de ressonância constante, $V = \frac{1}{2D}$ o amortecimento do mancal, ou seja, a constante derivativa, deve ser adaptada por:

$$C_D = \frac{(\beta - 1)b}{k_i}. \quad (4.8)$$

Usando $b = 2D\sqrt{c_W m}$, onde D é a taxa de amortecimento.

4.1.2 – Simulações da rigidez e do amortecimento ativo

Após introdução da lei de controle na malha, estabeleceu-se as simulações da rigidez e do amortecimento ativo utilizando os seguintes valores: $D = 0.05$, $m = 1[\text{kg}]$, $\varepsilon_s = 0.0005[\text{m}]$, $c_W = 25356[\text{N/m}]$, plotando a amplitude do deslocamento do rotor V adimensionalizado por $|\varepsilon_s|$ versus frequência de excitação Ω , obtemos a Figura 4.2. Na Figura 4.3 V é plotado versus a taxa $\eta = \Omega/\omega_0$, usando ω_0 como frequência natural. E na Figura 4.4 mostramos V versus η com três diferentes taxas de amortecimento D , para um mesmo valor de rigidez.

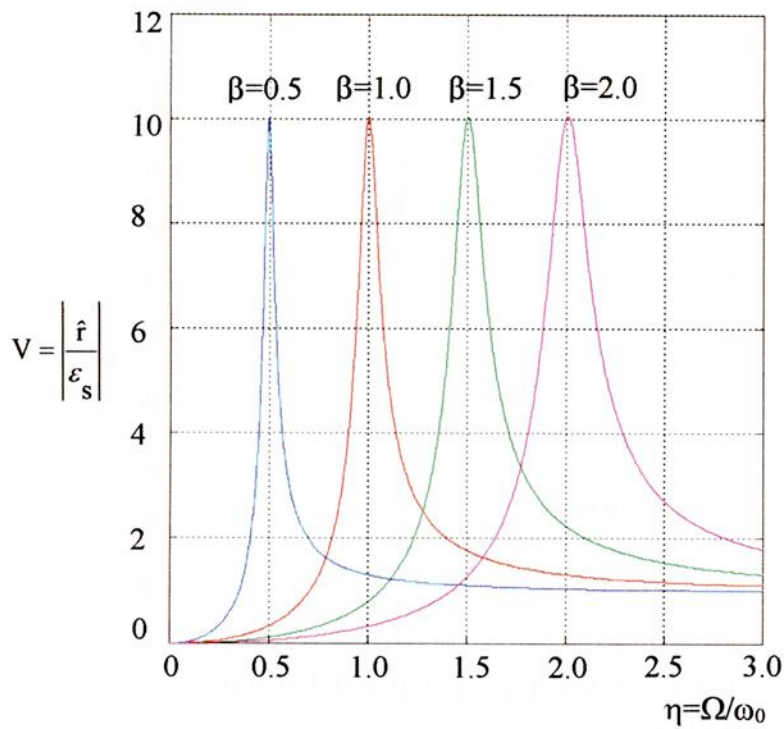


Figura 4.2 - Amplitudes de ressonância para diferentes valores de rigidez do mancal magnético.

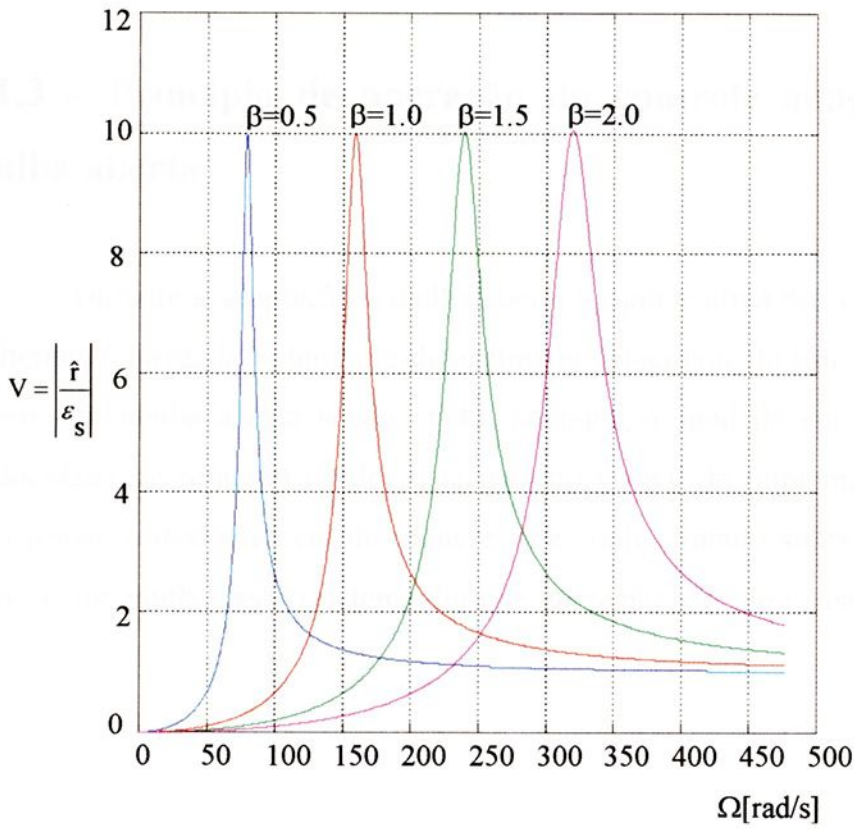


Figura 4.3 - Curvas V versus η para diferentes β .

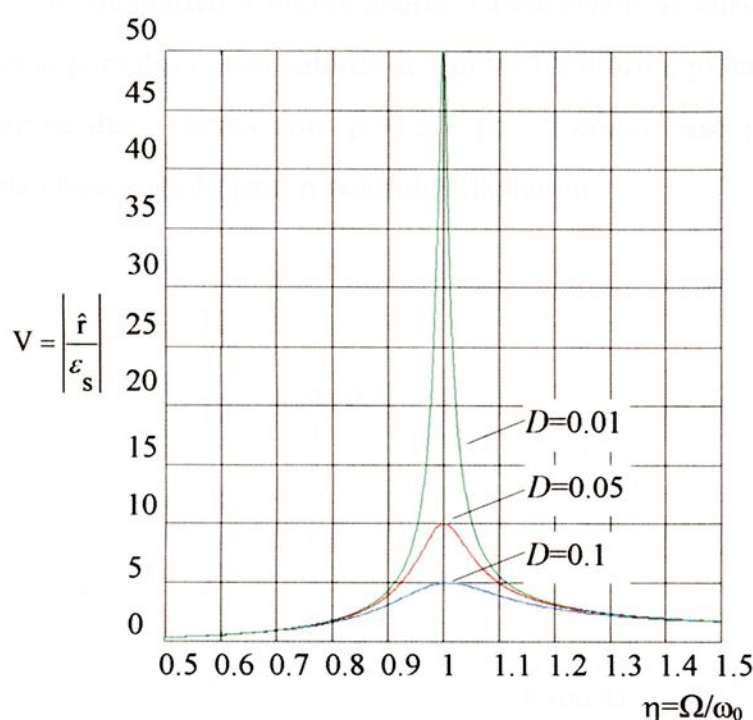


Figura 4.4 - Curvas V versus η para diferentes taxas de amortecimento D .

4.1.3 – Princípio de operação do controle adaptativo em malha aberta

Durante a adaptação a malha aberta a rigidez ativa dos eletromagnetos é alterada (chaveada) a uma pré-determinada velocidade do rotor. A adaptação ocorre em malha aberta sendo então, somente o sinal de entrada da planta (velocidade de rotação) usado. Este método é fácil de implementar e rápido mas possui a desvantagem de requerer pré-conhecimento sobre o sistema do rotor, e que mudanças no sistema durante operação não são consideradas [4].

A seguir é descrito de forma resumida o princípio de funcionamento do controle adaptativo a malha aberta. Conhecendo as curvas de ressonância do sistema para diferentes valores de rigidez (conforme plotado na Figura 4.1), escolheu-se duas curvas com $\beta=0.5$ e $\beta=1.5$ como base para a seleção do ponto de chaveamento para o controle adaptativo.

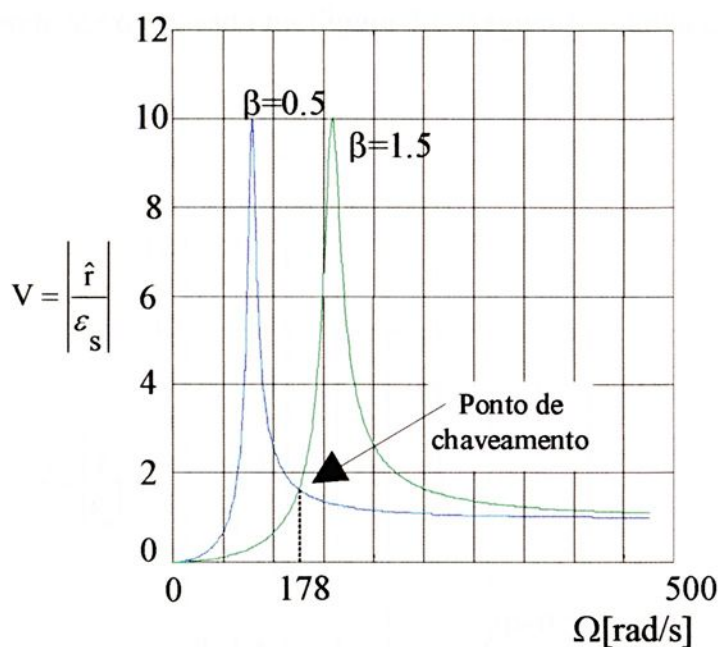


Figura 4.5 – Ponto de chaveamento.

Como mostrado na Figura 4.5 as duas curvas se cortam em um ponto específico. Este ponto é denominado de *ponto de chaveamento*, cujo valor da velocidade de rotação correspondente é $\Omega \approx 178$ rad/s. Esta é uma velocidade de rotação de referência para ajustar os parâmetros do sistema durante a operação do controle adaptativo.

O sistema iniciará sua operação com os parâmetros da curva $\beta=1.5$, e quando a velocidade de rotação coincidir com o ponto de chaveamento, $\Omega \approx 178$ rad/s, o sistema irá mudar seus parâmetros para os da curva $\beta=0.5$. Como se pode observar na Figura 4.5 em torno da velocidade de 178 rad/s a amplitude de deslocamento do rotor, para a curva $\beta=1.5$, começa a aumentar e

a ressonância ocorre. Se o sistema muda os parâmetros neste ponto para $\beta=0.5$ o sistema move para a curva correspondente a $\beta=0.5$ onde a ressonância já ocorreu.

Este procedimento evita a ressonância que ocorre quando o sistema operar com $\beta=1.5$, como mostra a Figura 4.6. Portanto com mudanças na rigidez do mancal magnético durante operação é possível evitar a ressonância, conforme pode ser observado na Figura 4.6 (seguindo a linha em negrito).

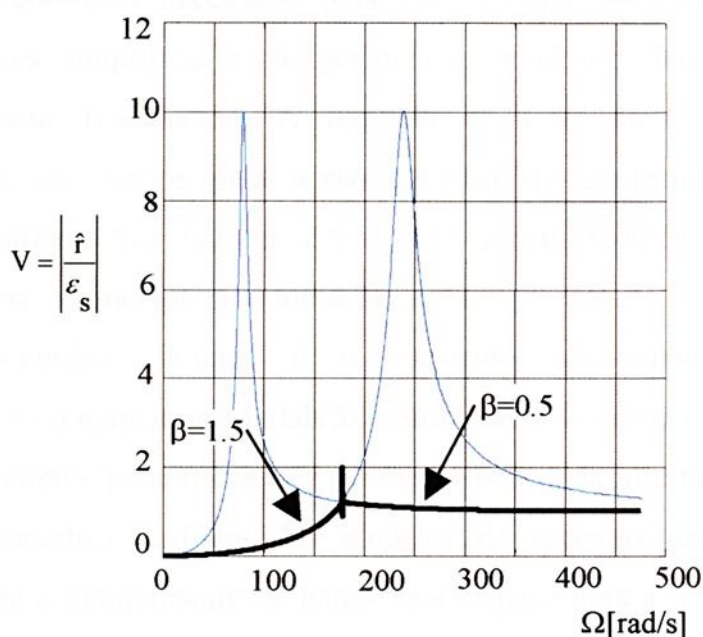


Figura 4.6 – Operação do controle adaptativo com chaveamento.

4.1.4 – Princípio de operação da bancada de teste com rotor Jeffcott e mancal magnético

Após as simulações no computador terem demonstrado que o sistema de controle produziu um aceitável comportamento dinâmico, partiu-se para um ensaio em uma bancada de testes.

Para operação da bancada de teste primeiro é necessário carregar a lei de controle no sistema. Isto é possível usando o mesmo modelo de controle desenvolvido no Simulink e usado nas simulações no computador, portanto só o modelo do controle é necessário, pois outros componentes do sistema (como rotor, sensores, amplificador de potência e atuadores eletromagnéticos) a bancada possui fisicamente. A bancada de teste além de possuir os componentes necessários para nosso experimento conforme mostrado no capítulo 2 através das Figuras 2.9 a 2.12 possui também uma interface chamada Dspace para realizar simulações em tempo real.

A interface Dspace é o elemento que conecta aplicações desenvolvidas no aplicativo Matlab/Simulink com seu sistema para formar um integrado ambiente para aplicações em tempo real. Esta interface fornece uma conexão automática e direta dos modelos de sistemas desenvolvidos no Simulink com o equipamento de tempo real Dspace para a leitura e gravação em tempo real dos dados obtidos do processo dinâmico.

O experimento na bancada de teste seguiu os seguintes passos: 1.o modelo do sistema de controle do Simulink gravado no computador é codificado em linguagem C pela interface em tempo real Dspace e enviado para a placa de processamento de sinal digital desta interface. 2.a interface Dspace possui conexão com os amplificadores de potência que enviam as correntes proporcionais as forças eletromagnéticas que serão geradas pelos atuadores do mancal magnético para manter ou colocar o rotor na posição desejada. 3.os sensores de posição enviam em tempo real através da interface

Dspace o posicionamento do rotor, para ser processado pelo controle, completando com isso a malha necessária para o funcionamento do sistema.

Após os devidos ajustes as medidas foram processadas na bancada.

Na Figura 4.7 é mostrado na curva 1, a amplitude de deslocamento do rotor sem a ação do mancal magnético, onde uma grande amplitude de ressonância é observada. As outras curvas mostradas na Figura são medidas com diferentes rigidez e amortecimento, ou seja com diferentes C_P e C_D . No caso em estudo o controle adotado é PD e o valor do C_I , que é o parâmetro de realimentação integral do controle é zero. Os valores de C_P em [A/m] e C_D em [As/m] para as curvas 2, 3, 4, 5 e 6 da Figura 4.7 são:

curva 2 - $C_P=2000$, $C_D=0.8$

curva 3 - $C_P=2500$, $C_D=0.8$

curva 4 - $C_P=3000$, $C_D=0.9$

curva 5 - $C_P=4000$, $C_D=1.2$

curva 6 - $C_P=4000$, $C_D=1.3$.

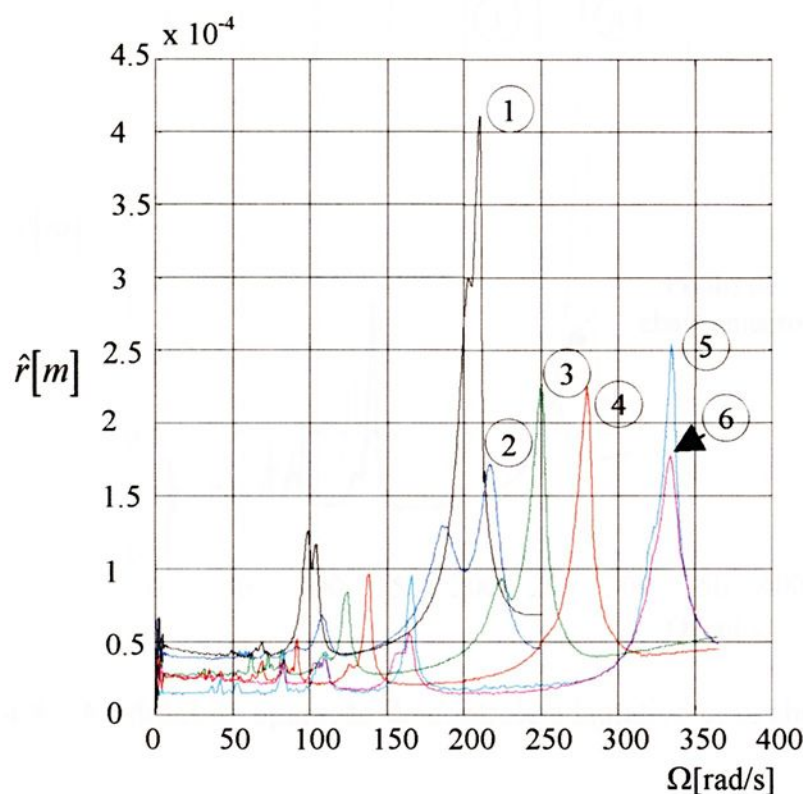


Figura 4.7 - Medidas com diferentes C_P e C_D .

4.1.5 – Medidas na Bancada de teste do controle adaptativo em malha aberta

Como descrito no item anterior foi processado no computador da bancada de teste a lei de controle adaptativa em malha aberta desenvolvido através do Simulink.

A Figura 4.8 permite visualização dos resultados obtidos através de medidas realizadas durante operação do controle adaptativo a malha aberta. Como já mencionado a rigidez ativa do eletromagneto é alterada a uma pré-determinada velocidade para parâmetros diferentes dos iniciais. A adaptação ocorre em malha aberta porque somente o sinal de entrada (velocidade de rotação) é utilizado.

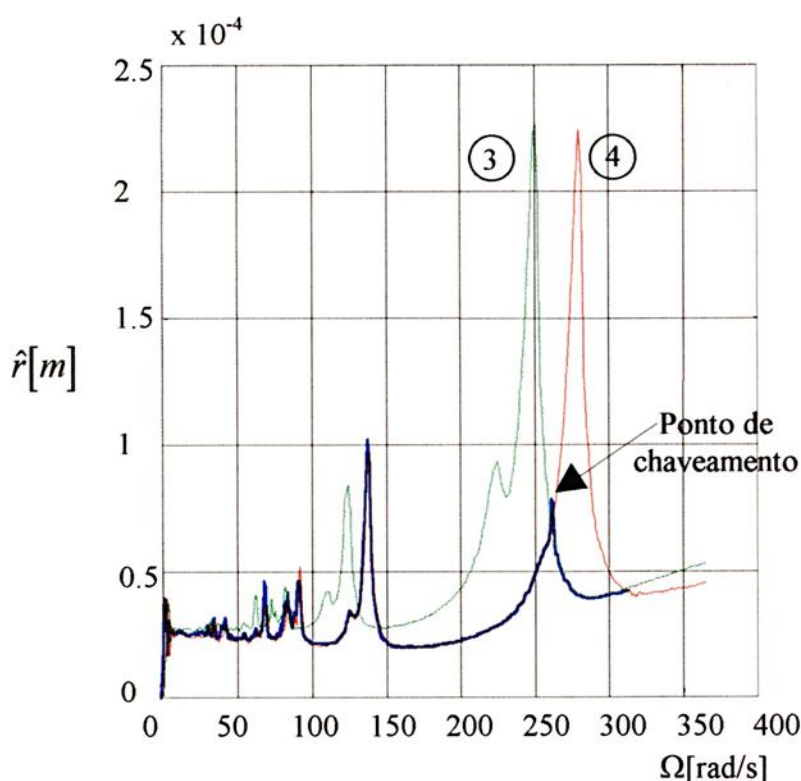


Figura 4.8 – Medidas da operação do controle adaptativo com chaveamento.

O sistema inicia a operação com parâmetros da curva 4 ($C_P=3000$ [A/m], $C_D=0.9$ [As/m]), e quando atingir o ponto de chaveamento, $\Omega \approx 263$ rad/s, o sistema muda para os parâmetros da curva 3 ($C_P=2500$ [A/m], $C_D=0.8$ [As/m]). A linha em negrito mostrada na Figura 4.8 descreve a operação do controle adaptativo em malha aberta.

4.2 - Controle adaptativo a malha fechada

Um controle adaptativo a malha fechada trabalha de acordo com um indicador mensurável, e os parâmetros do controle são atualizados continuamente para se ter uma performance ótima. Este controle é insensível a mudanças no sistema e requer um menor conhecimento das características do sistema a ser controlado. Porém, encontrar um indicador mensurável adequado pode ser difícil [4,13].

Como estratégia de controle adaptativo em malha fechada foi projetado dois modelos: um que utiliza a amplitude de deslocamento do rotor como indicador dinâmico mensurável, e outro que utiliza o ângulo de fase da deflexão do rotor do mancal como indicador.

4.2.1 - Controle adaptativo a malha fechada com amplitude de deslocamento do rotor como indicador mensurável

Eixos rotativos sofrem deflexões em certas velocidades de rotação. Existem várias razões para estas deflexões vibratórias, uma delas é a ressonância provocada pelo desbalanceamento da massa do rotor, entre outras [14]. No modelo do rotor Jeffcott a massa de desbalanceamento é a principal razão da frequência de excitação Ω . A estabilidade da amplitude de deslocamento do rotor $\hat{r}$ depende desta frequência.

Onde quer que a frequência de excitação Ω é próxima ou igual a frequência natural do sistema ω_0 , a ressonância ocorre causando uma alta amplitude de deslocamento e introduzindo grandes oscilações no sistema que podem ultrapassar a resistência dos materiais do conjunto.

Como pode ser observado na Figura 4.3 em todas as curvas, a amplitude de deslocamento do rotor aumenta a medida que aumenta a velocidade de rotação antes da ressonância. Escolhemos então a amplitude de

deslocamento do rotor como indicador mensurável dinâmico para usarmos em nossa estratégia de controle adaptativo em malha fechada.

Um indicador dinâmico deve oferecer ao controle: confiabilidade, seletividade e aplicabilidade [2]. O indicador deve ser confiável, ou seja, ser uma medida de leitura uniforme para sistemas de todas as ordens. Ele deve ter seletividade, isto é, um parâmetro que possa ser medido com precisão não tendo locais ou pontos especiais para serem medidos e aplicabilidade, isto é, ser possível usá-lo continuamente como parâmetro de entrada para o controle.

4.2.1.1 – Operação e simulação do controle adaptativo a malha fechada com amplitude de deslocamento do rotor como indicador mensurável

Escolhemos a amplitude máxima (adimensional) permitida para ser igual a 1 ($V = \left| \hat{r} / \varepsilon_s \right| = 1$). Portanto o controle começa a operar quando as vibrações atingem a este limite.

Utilizando um controle PD e mantendo a realimentação derivativa constante, utilizou-se a diferença entre a amplitude máxima de vibração permitida e a vibração medida Δr como parâmetro de realimentação para o controle adaptativo. Este sinal Δr alimenta um controle integral e o resultado é somado a um índice inicial de realimentação proporcional C_{p0} . Após esta soma, o sinal C_{p0} vai para o controle PD para executar a adaptação ($C_P = C_{p0} + K \cdot \int \Delta r \cdot dt$). A realimentação proporcional gera um acréscimo gradual da rigidez ativa do mancal magnético proporcionalmente a vibração do sistema, levando desta forma a um controle da vibração. O diagrama de bloco da operação de adaptação é mostrado na Figura 4.9.

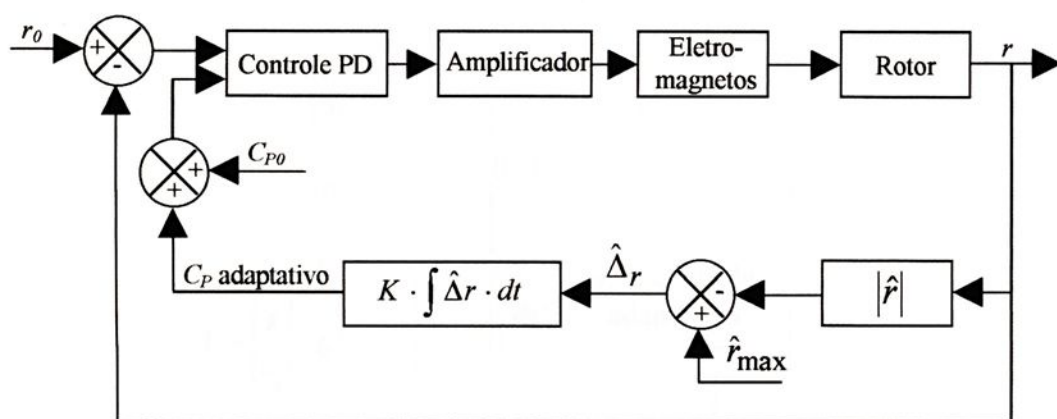


Figura 4.9 – Diagrama de bloco da adaptação.

Deve se observar que o sistema de controle não tem informações das características do sistema como rigidez e amortecimento. O controle sempre avalia a amplitude de vibração e inicia sua operação quando esta é igual $0,99|\varepsilon_s|$ ou $V=0.99$, abaixo deste limite o sistema permanece inativo e opera com condições iniciais.

Na Figura 4.10 é mostrado a operação do modelo de controle com e sem controle adaptativo, e pode ser observado que as vibrações são controladas após o sistema começar a operação, ou seja em torno da amplitude de deslocamento adimensional de 1.

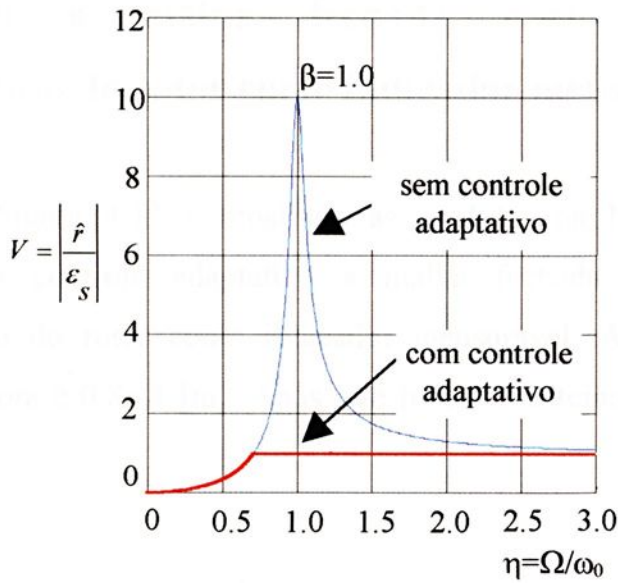


Figura 4.10 - Curva V versus η , com e sem controle adaptativo.

Na Figura 4.11 é mostrado o ganho da realimentação proporcional C_p durante a operação do controle adaptativo mostrado na Figura 4.10.

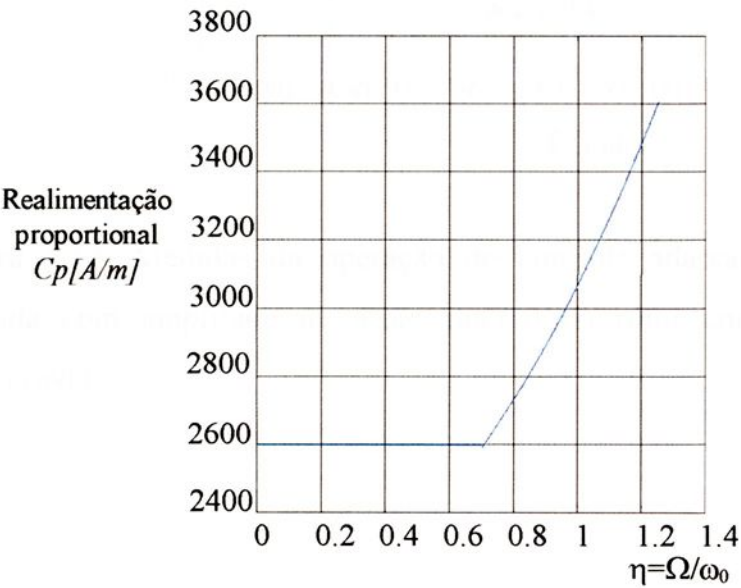


Figura 4.11 – Realimentação proporcional C_p .

4.2.1.2 – Medidas na bancada de teste do controle adaptativo a malha fechada com amplitude de deslocamento do rotor como indicador mensurável

Na Figura 4.12 é mostrado as medidas na bancada de teste da operação do controle adaptativo a malha fechada com amplitude de deslocamento do rotor como indicador mensurável. A amplitude máxima permitida agora é 0.8×10^{-4} [m]. Após este limite o sistema de controle começa sua operação.

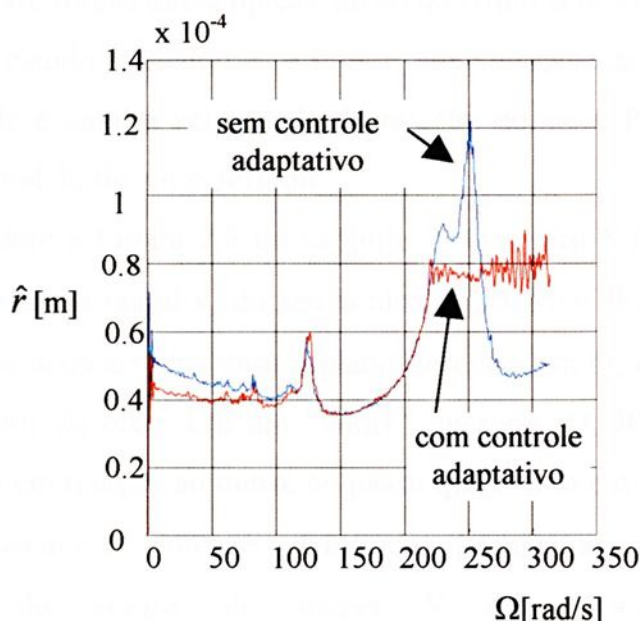


Figura 4.12- Medidas da operação do controle adaptativo a malha fechada com amplitude de deslocamento do rotor como indicador mensurável.

4.2.2 - Controle adaptativo a malha fechada com ângulo de fase como indicador mensurável

Como mencionado anteriormente os eixos rotativos tendem a curvar quando atingem certas velocidades, e gira de um forma adversa. Este fenômeno é denominado “whirling”, o qual é definido como a rotação do plano formado pelo eixo curvado e a reta que passa pelos centros dos mancais. O “whirling” pode ocorrer na direção de rotação do eixo ou na direção oposta e sua velocidade pode ser igual ou diversa da do eixo [14]. As causas deste fenômeno são várias, tais como o desequilíbrio de massa, o amortecimento de histerese do eixo, forças giroscópicas, atrito dos fluidos nos mancais etc.

Neste estudo considerou-se o caso mais simples de “whirl” síncrono, cuja velocidade é igual a velocidade de rotação do eixo. Para este propósito utilizou-se o modelo do rotor Jeffcott.

Considere a Figura 2.3 do capítulo 2. O centro S da massa do disco está a uma distância radial ε_s do seu centro geométrico W . A reta que passa pelo centro dos mancais atravessa o plano do disco em O , e OW representa a flexão do centro do eixo. Em um “whirl” síncrono, O , W e S permanecem fixos, cada um em relação ao outro, ao passo que o eixo e o disco giram a uma velocidade constante Ω . Com z e y definindo a posição do centro do eixo W , as coordenadas do centro de massa S são: $y + \varepsilon_s \sin(\Omega t + \delta)$ e $z + \varepsilon_s \cos(\Omega t + \delta)$.

As equações de movimento nas direções y e z obtidas no capítulo 2 e sem o mancal magnético são:

$$m\ddot{y} + b\dot{y} + c_W y = m\varepsilon_s \Omega^2 \sin(\Omega t + \delta) \quad (4.9)$$

$$m\ddot{z} + b\dot{z} + c_W z = m\varepsilon_s \Omega^2 \cos(\Omega t + \delta) \quad (4.10)$$

Pode-se escrever a solução para o estado de equilíbrio das equações (4.9) e (4.10) como [14]:

$$y = \frac{m\varepsilon_s\Omega^2 \sin(\Omega t - \psi)}{\sqrt{(c_W - m\Omega^2)^2 + (b\Omega)^2}} \quad (4.11)$$

$$z = \frac{m\varepsilon_s\Omega^2 \cos(\Omega t - \psi)}{\sqrt{(c_W - m\Omega^2)^2 + (b\Omega)^2}} \quad (4.12)$$

$$OW = r = \sqrt{y^2 + z^2} = \frac{m\varepsilon_s\Omega^2}{\sqrt{(c_W - m\Omega^2)^2 + (b\Omega)^2}} \quad (4.13)$$

$$\tan \psi = \frac{b\Omega}{c_W - m\Omega^2} \quad (4.14)$$

Pode-se observar que a linha $WS = \varepsilon_s$, esta adiantada de um ângulo de fase ψ sobre o deslocamento da reta $OW = r$, ângulo este que depende da quantidade de amortecimento e da velocidade de rotação Ω . Quando a velocidade de rotação Ω é igual a velocidade crítica $\omega_0 = \sqrt{\frac{c_W}{m}}$, ou a frequência natural do eixo, encontra-se uma condição de ressonância na qual a amplitude é contida apenas pelo amortecimento. A Figura 4.13 mostra o sistema disco-eixo sob três condições diferentes de velocidade.

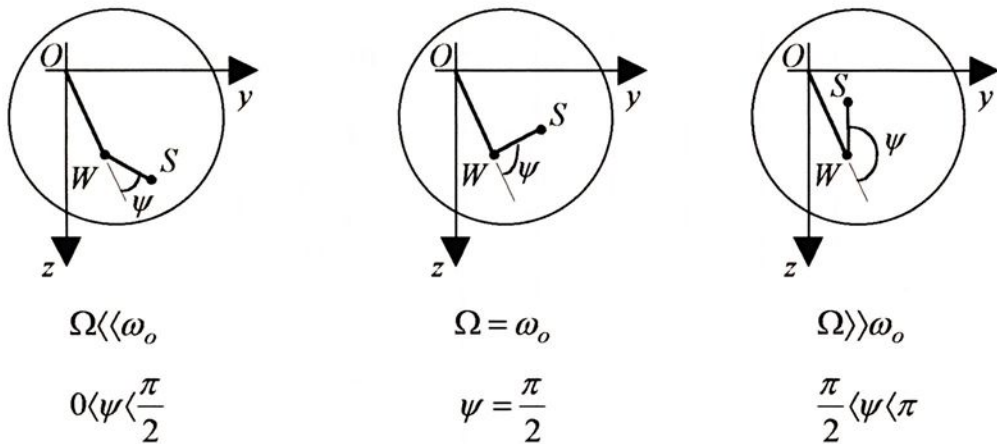


Figura 4.13 – Relação amplitude - fase em rotação síncrona.

4.2.2.1 – Operação e simulação do controle adaptativo a malha fechada com ângulo de fase como indicador mensurável

Utilizando a relação entre o ângulo de fase e a amplitude de deslocamento como indicador mensurável para controlar a vibração.

Como mostrado na figura 4.14 a condição de ressonância ocorre quando o ângulo de fase é de 90° . Foi estabelecido o máximo valor permitido o ângulo de 5° . Portanto o controle atua para níveis de vibração correspondente a este ângulo de fase.

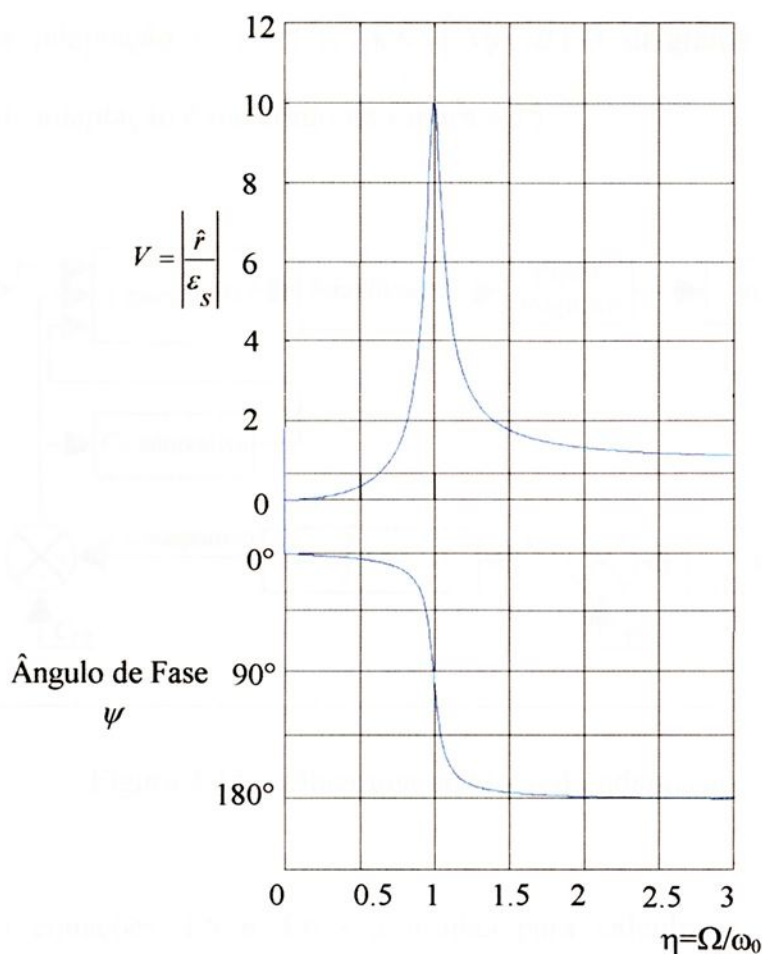


Figura 4.14 – Ângulo de fase ψ e amplitude de deslocamento V .

Para obter o ângulo de fase nas simulações utilizou-se uma função trigonométrica do Simulink.

O modelo que adota o ângulo de fase como indicador é diferente do que utiliza a amplitude de deslocamento do rotor, mas em concepção a malha de realimentação é similar. Usando um controle PD, quando o sistema alcança o limite do ângulo de fase de 5°, a diferença $\Delta\psi$ entre o ângulo máximo e o ângulo medido realimenta o sistema. Este sinal $\Delta\psi$ alimenta um controle integral e o resultado é somado a um índice inicial de realimentação proporcional C_{p0} . Após esta soma, este sinal C_p vai para o controle PD para

executar a adaptação ($C_P = C_{P0} + K \cdot \int \Delta\psi \cdot dt$). O diagrama de bloco da operação de adaptação é mostrado na Figura 4.15.

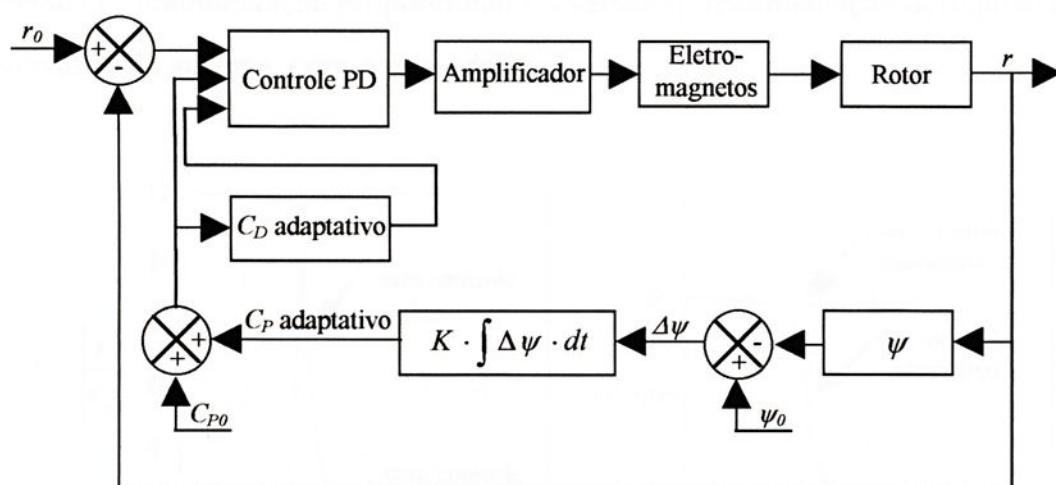


Figura 4.15 – Diagrama de bloco da adaptação.

As equações 4.5 e 4.6 são usadas para calcular a realimentação proporcional e derivativa do sistema. E substituindo a equação 4.7 na 4.8 obtemos a equação abaixo que é a forma pela qual alimentamos os ganhos proporcional e derivativo de forma igualmente proporcional:

$$C_D \text{ adaptativo} = \frac{\left(\sqrt{\frac{C_P \cdot k_i - C_{MO}}{c_W} + 1} \right) \cdot 2 \cdot m \cdot \omega_0}{k_i} \quad (4.13)$$

Então o sistema do rotor irá receber uma rigidez e um amortecimento adicional quando o controle detecta que o ângulo de fase medido esta no limiar de atingir o ângulo permitido. Obtém-se o controle de vibração através do acréscimo da rigidez adicional, e quando a rotação aumenta, a amplitude de deslocamento do rotor também aumenta, para prevenir isto introduziu-se no sistema um acréscimo de amortecimento. A partida do sistema se dá com

valores iniciais de $C_P=2597$ A/m e $C_D=0$ As/m ($\beta=0$), os quais são acrescidos quando o controle começa a atuar.

Na Figura 4.16 é mostrado as curvas: V versus η , ângulo de fase ψ versus η , realimentação proporcional C_P versus η , realimentação derivativa C_D versus η do sistema, com e sem adaptação.

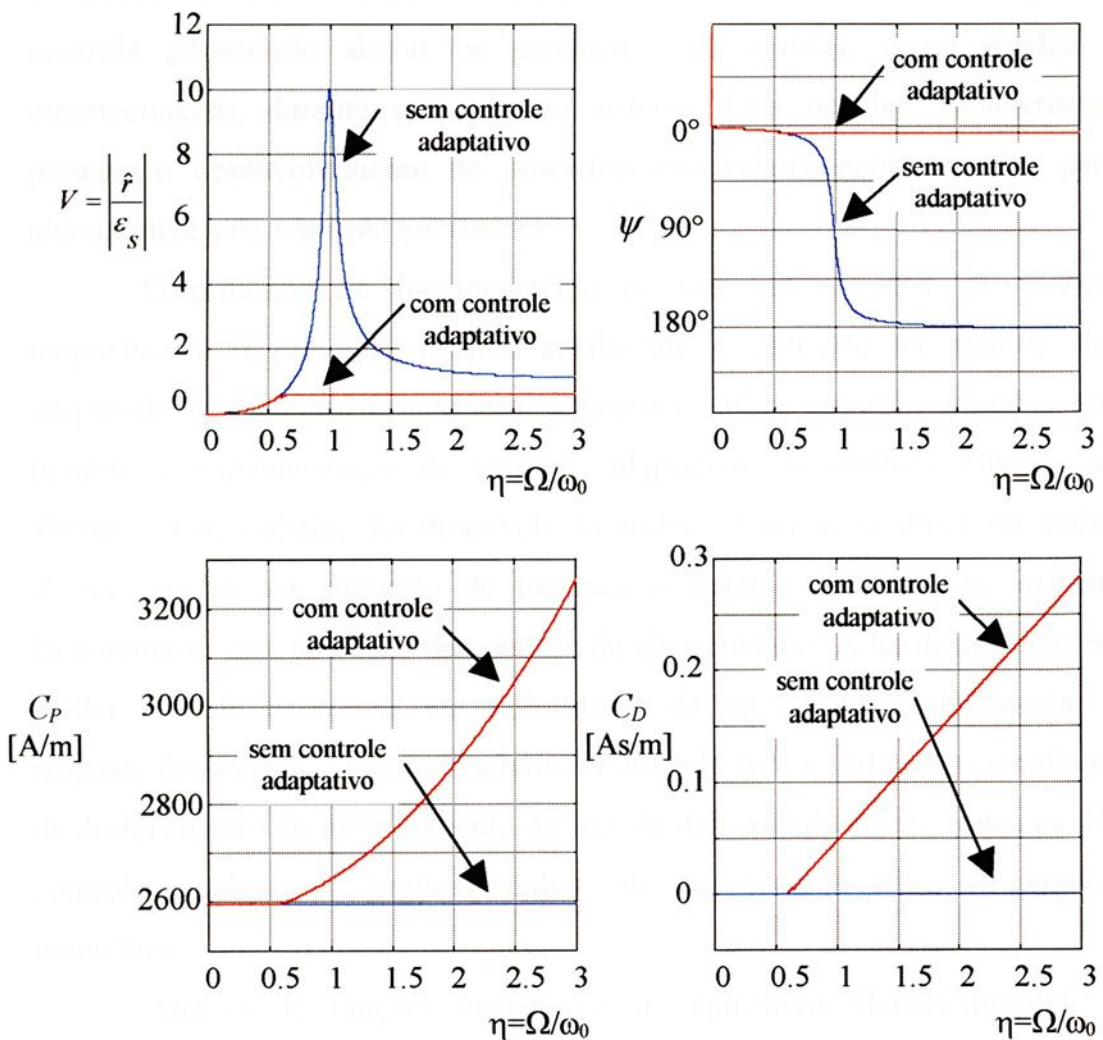


Figura 4.16 – Operação do controle adaptativo a malha fechada com ângulo de fase como indicador mensurável.

Capítulo 5

Conclusões

Para o desenvolvimento de estratégias de controle que utiliza mancais magnéticos é necessário aliar conhecimento das áreas de mecânica e eletrônica. O mancal magnético proporciona flexibilidade na estratégia de controle permitindo alterar os parâmetros do mancal, como rigidez e amortecimento, durante operação do sistema. Esta peculiar característica permite o desenvolvimento de procedimentos relativamente simples para atenuar níveis de vibração em rotores.

O princípio de funcionamento de um sistema ativo de mancal magnético é o princípio o qual atualmente é utilizado na maioria das suspensões magnéticas [3]. Mancal magnético utiliza controle digital o que permite a implementação de controle adaptativo em malhas fechadas ou abertas. Neste trabalho foi desenvolvido ambas. A lei de controle em malha aberta consiste na alteração de parâmetros durante operação do sistema. Denomina-se esta operação de controle de chaveamento. A lei de controle em malha fechada baseou-se em indicadores de medida para realimentar a resposta do sistema. Dois indicadores de medida foram utilizados: amplitude de deslocamento do rotor e ângulo de fase da deflexão do rotor. Todos os três controles podem ser implementados em um sistema ativo de mancal magnético.

Através de funções disponíveis no aplicativo Matlab/Simulink, é possível projetar e desenvolver várias estratégias de controle para operar sistemas com mancais magnéticos.

Finalmente, foi demonstrado através de simulações e medidas em uma bancada de teste que diferentes estratégias de controle minimizam os níveis de vibração em um sistema flexível de rotor (exemplificado pelo modelo do rotor Jeffcott com mancal magnético).

Futuras direções para esta pesquisa :1. controle adaptativo utilizando malha aberta e fechada simultaneamente; 2. controle do sistema do rotor com “whirl” não síncrono; 3. ajustar o modelo de controle para considerar efeito giroscópico; 4. desenvolver uma estratégia de controle adaptativo que considere múltiplos graus de liberdade do rotor.

Referências bibliográficas

1. REVOLVE MAGNETIC BEARINGS INC. *Magnetic bearing systems basic principles of operation and how do magnetic bearings work?*. Calgary, Canada.1999. 18p.
2. OGATA, K. *Engenharia de controle moderno*. 2.ed. Rio de Janeiro: Prentice Hall Brasil,1998. 813p.
3. SCHWEITZER, G. , BLEUTER, H., TRAXLER A. *Active magnetic bearings :Basics, properties and applications of active magnetic bearings*. Zurich : vdf Hochschulverlag AG an der ETH, 1994. 244p.
4. HOFFMANN, K. -J. , LAIER, D. , MARKERT, R. , FRANK, M. R., Glesner, M. Integrated active magnetic bearings. In: INT. SYMPOSIUM ON MAGNETIC BEARINGS, 6, 1998. Proceedings... Darmstadt: University of Technology, Germany, 1998.1-11.
5. DRAIN, B.J. *Implementation of an integrated magnetic bearings system..* Calgary, Canadá.11p. (Revolve Technologies Inc).
6. S2M-ACTIDYNE. Frequently Asked Questions [online]. Available from World Wide Web : <URL:<http://www.s2m.fr/g2/questions.html>>, 1999.
7. VANCE, J. M. *Rotordynamics of tubormachinery*, New York: J.Wiley, 1988.388p.
8. MEIROVITCH, L. *Elements of vibration analysis*. 2.ed.New York: McGraw-Hill Book , 1986. 560p.

9. GASCH, R. , PFÜTZNER, H. *Rotordynamic eine einföhrung*. Berlin :Springer-Verlag, 1975. 188p.
10. LAIER, D. , MARKERT, R. Simulation of nonlinear effects on magnetically suspended rotors. In: INT. CONF. ON ENGINEERING COMPUTATION AND COMPUTER SIMULATION ECCS, 1, 1995. Proceedings... Darmstadt: University of Technology, Germany. 1995, Vol.I, 473-82.
11. THE MATH WORKS INC. *Reference handbook: Simulink, dynamic system simulation for Matlab*. 2ed. 1997.
12. HANSELMAN, D., LITTLEFIELD, B. *Matlab 5 versão do estudante: - Guia do usuário*. São Paulo: Makron Books, 1999.413p.
13. ASTRÖN, K. A., WITTENMARK, B. *Adaptive control*. Massachusets: Addison-Wesley, 1995. 574p.
14. THOMSON, W. T. *Teoria da vibração com aplicações*. Rio de Janeiro: Interciência , 1978. 462p.



