Orlando Homen de Mello

**Estudo do controle uni-axial do mancal de levitação magnética
do tipo atração para potência nula (ZPC, zero power control)**

**São Paulo
2011**

Orlando Homen de Mello

**Estudo do controle uni-axial do mancal de levitação magnética
do tipo atração para potência nula (ZPC, zero power control)**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Engenharia de
Controle e Automação Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Horikawa

**São Paulo
2011**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 01 de abril de 2011

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Mello, Orlando Homen de

Estudo do controle uni-axial do mancal de levitação magnética do tipo atração para potência nula (ZPC, zero power control) / O. H. de Mello. -- ed. rev. -- São Paulo, 2011.

96 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Magnetismo 2. Mancais 3. Controle de potência nula 4. Dispositivo de assistência ventricular I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

Nome: MELLO, Orlando Homen de

Título: Estudo do controle uni-axial do mancal de levitação magnética do tipo atração para potência nula (ZPC, zero power control).

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de concentração de Engenharia de Controle e Automação Mecânica.

Aprovado em: 02/02/2011

Banca Examinadora

Prof. Dr. Oswaldo Horikawa

Julgamento: _____

Instituição: EP- USP

Assinatura: _____

Prof. Dr. Eduardo Aoun Tannuri

Julgamento: _____

Instituição: EP- USP

Assinatura: _____

Prof. Dr. Isaías da Silva

Julgamento: _____

Instituição: UNIFESP - Externo

Assinatura: _____

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus pais,
Orlando e Maria Leonir, pelo exemplo de
vida.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente ao Prof. Dr. Oswaldo Horikawa pela oportunidade, confiança e paciência na orientação neste trabalho de mestrado.

Igualmente ao Prof. Dr. Isaías da Silva, pelo apoio dispensado para a realização deste trabalho de mestrado.

Aos Professores Doutores Mauro Tomazela e Eik Tenório, diretor e coordenador respectivamente da Fatec Tatuí por incentivar e me conduzir a esta instituição.

Ao amigo e companheiro desde a graduação até agora nesta pós, o Eng. Fernando Antonio Camargo pelo fundamental apoio nos momentos mais difíceis desta jornada.

Aos Profs. Drs. Eng. Newton Maruyama e Eduardo Aoun Tanuri pelas valiosas críticas e sugestões feitas na fase de qualificação do presente trabalho.

Aos professores que conduziram brilhantemente todo o significativo conteúdo de suas disciplinas comprovando assim a competência que o cargo exige.

A esta conceituada instituição pela forma séria que administra e valoriza o conhecimento.

Enfim agradeço a todos que colaboraram direta ou indiretamente na execução deste trabalho.

*“Existem apenas duas maneiras de ver a vida; Uma é pensar que não existem milagres e a outra é que tudo é um milagre.”
(Albert Einstein)*

RESUMO

O mancal magnético base deste trabalho é de 1-GDL (grau de liberdade) de controle uni-axial com circuito magnético híbrido do tipo atração, o qual foi desenvolvido em 2000 na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo por Silva e Horikawa [1][2]. Nas duas extremidades do rotor são fixados ímãs, e em oposição ficam os atuadores eletromagnéticos com núcleos ferromagnéticos. Os ímãs são atraídos para os atuadores pelas forças magnéticas devido à presença dos núcleos ferromagnéticos dos dois atuadores. Devido à concorrência entre as forças magnéticas de atração, o rotor fica confinado na posição central do eixo axial resultando numa rigidez passiva para esforços radiais. E na direção axial, a posição do rotor é definida pelo controle ativo que produz o efeito da levitação magnética do rotor. Se o rotor do mancal magnético sofrer esforços na direção axial, o sistema de controle deve aplicar mais corrente elétrica nos atuadores para assegurar o correto posicionamento do rotor, isto pode gerar um enorme consumo de energia elétrica. Este trabalho estuda o princípio de controle de mancal magnético com potência nula para ser aplicado no projeto de uma bomba centrífuga mista, que tem seu rotor suspenso magneticamente. É chamada de potência nula a condição de operação com o mínimo de consumo de energia na levitação do rotor. A bomba em projeto será utilizada no auxílio da circulação sanguínea, aliviando a carga do bombeamento do ventrículo esquerdo do coração doente, por isso o projeto da bomba é chamado de Dispositivo de Assistência Ventricular (DAV). As necessidades técnicas do DAV justificam o emprego do sistema de mancal magnético e do controle de potência nula. Para se aplicar a técnica de controle de potência nula é essencial que o sistema magnético do mancal seja do tipo híbrido. Este estudo se desenvolveu a partir do sistema de mancal magnético desenvolvido por Silva e Horikawa [1][2] pela semelhança de propriedades que o mancal do DAV solicita. O Algoritmo do controle de potência nula (ZPC- “*zero power control*”) foi desenvolvido para proporcionar um código simples e pequeno sem comprometer a robustez do controle que o projeto do DAV requer.

Palavras chaves: Controle de potência nula. Controle zero virtual. Dispositivo de Assistência Ventricular. Mancal magnético. Órgãos artificiais.

ABSTRACT

The magnetic bearing of this work is based on the 1-DOF (degree of freedom) control uni-axial magnetic circuit with hybrid-type attraction, which was developed in 2000 at the Polytechnic School, University of São Paulo by Silva and Horikawa [1][2]. At both ends of the rotor magnets are fixed, and in opposition are the electromagnetic actuators with ferromagnetic cores. The magnets are attracted to the actuators by the forces due to the presence of ferromagnetic cores of the two actuators. Due to competition between the magnetic forces of attraction, the rotor is confined in the central position of the axial stiffness resulting in efforts to radial. And in the axial direction, the rotor position is defined by the active control that produces the effect of magnetic levitation of the rotor. If the rotor magnetic bearing suffer efforts in the axial direction, the control system should apply more electrical current in the actuators to ensure correct positioning of the rotor, this can generate a huge power consumption. This paper studies the principle of magnetic bearing control with zero power to be applied in designing a mixed centrifugal pump, which has its rotor magnetically suspended. It is called the zero power operating condition with minimal energy consumption in the levitation of the rotor. The pump design will be used to aid blood circulation, relieving the load on the pumping of the left ventricle of the heart sick, so the pump design is called a Ventricular Assist Device (VAD). The technical needs of the DAV justify the use of magnetic bearing system and zero power control. To apply the technique of zero power control is essential that the magnetic bearing system is a hybrid. This study was developed from the magnetic bearing system developed by Silva and Horikawa [1] [2] by the similarity of the bearing properties of the DAV requests. The algorithm of zero power control (ZPC-zero power control ") was developed to provide a simple and small code without compromising the robustness of the control that the project requires the VAD.

Key word: Zero Power Control. Virtual Zero Power. Ventricular assistance device. Magnetic Bearing. Bearingless. Artificial organ.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1: Exemplo de sistema de levitação Ímã-ferro e as forças envolvidas	4
Figura 1-2: Ímã em levitação diamagnético [9].....	4
Figura 1-3: Sistema elementar de MAGLEV híbrido (CPM)	5
Figura 1-4: Sistema manual de potência nula	7
Figura 1-5: Diagrama de um sistema automático de controle de potência nula	9
Figura 1-6: Diagrama de blocos de um sistema de controle com ZPC baseado no princípio manual exemplificado	9
Figura 1-7: Esquema de DAV- IDPC com rolamentos e gaxeta.....	11
Figura 1-8: Diagrama de Blocos do Sistema DAV extracorpóreo.....	11
Figura 1-9: Bomba sanguínea centrífuga de sistema 2 pivôs [14].....	12
Figura 1-10: Diagrama de Blocos do Sistema DAV intracorpóreo.....	12
Figura 1-11: Esquema básico de um AMB rotativo de 1 –GDL [15]	14
Figura 1-12: Configuração típica de um sistema de AMB rotativo [16].....	15
Figura 1-13: Sistema AMB linear para transporte [17]	15
Figura 1-14: Classificação dos mancais magnéticos [2].....	17
Figura 2-1: AMB híbrido tipo atração de Lyman com ZPC analógico [20]	18
Figura 2-2: LVAD axial de Paden [21]	19
Figura 2-3: Esforços axiais no rotor do LVAD de Paden [21]	20
Figura 2-4: Diagrama de blocos do controle do LVAD de Paden [21]	21
Figura 2-5: Veículos de MAGLEV de Simpson [22].....	22
Figura 2-6: Esquema do transportador MAGLEV de Morishita [23]	22
Figura 2-7: Diagrama de blocos do controle do transportador de Morishita [24] ..	23
Figura 2-8: Comportamento da corrente e deslocamento em resposta a um carregamento de 1,5 Kg no rotor em suspensão [24]	23

Figura 2-9: Sistema experimental do AMB de Mizuno [25]	24
Figura 3-1: Configuração do sistema do AMB EPUSP	27
Figura 3-2: Aspectos geométricos dos ímãs do AMB EPUSP	27
Figura 3-3: Diagrama de blocos do sistema de controle do AMB EPUSP sem ZPC	28
Figura 3-4: Redesenho do diagrama de blocos do sistema de controle do AMB sem ZPC	29
Figura 3-5: Diagrama de blocos generalizado do AMB EPUSP	30
Figura 3-6: Resposta ao degrau do AMB EPUSP	31
Figura 3-7: Diagrama de blocos do ZPC	31
Figura 3-8: Diagrama de blocos Geral do controle incluindo-se os blocos do ZPC ao modelo de Silva.....	32
Figura 3-9: Foto do mancal experimental.....	33
Figura 3-10: Diagrama de blocos do sistema desenvolvido	34
Figura 3-11: Sensor de posição, a)Sensor original com cabo b)Bobina modificada	35
Figura 3-12: Posição da bobina sensora no atuador.....	36
Figura 3-13: Curva resposta do sensor de posição	36
Figura 3-14: Diagrama de blocos do condicionador do sensor indutivo [21]	37
Figura 3-15: Sistema de suspensão e as forças magnéticas envolvidas (bobinas desligadas).....	38
Figura 3-16: Curvas típicas das forças magnéticas obtidas em simulação	39
Figura 3-17: Curva resultante das forças magnéticas (simuladas).....	40
Figura 3-18: Sistema utilizado para medição da força magnética ímã - núcleo x entreferro.....	41
Figura 3-19: Curva de força magnética versus entreferro (experimental)	42

Figura 3-20: (a)Esquema eletromagnético do AMB experimental; (b) modelo elétrico do atuador	43
Figura 3-21: Curva característica das forças no rotor do AMB (simulação computacional).....	45
Figura 3-22: Ilustração do conceito da atuação do bloco ZPC	46
Figura 3-23: Sinal típico do controle em regime	47
Figura 3-24: Diagrama de blocos da proposta inicial da rotina ZPC	48
Figura 4-1: Diagrama de blocos do controle do mancal experimental.....	50
Figura 4-2: Resposta ao degrau (simulação)	51
Figura 4-3: Resposta ao degrau no distúrbio (simulação).....	51
Figura 4-4: Diagrama de blocos do controle do mancal experimental com ZPC..	52
Figura 4-5: Resposta ao degrau no distúrbio com ZPC (simulação)	53
Figura 4-6: Modelo controle do mancal EPUSP com algoritmo ZPC de Mizuno [25]	53
Figura 4-7: Resposta ao distúrbio degrau	54
Figura 4-8: Sistema manual de aplicação de carga em degrau	54
Figura 4-9: Foto do AMB carregado	55
Figura 4-10: Resposta ao degrau do sistema experimental com controle PD (ZPC desativado).....	56
Figura 4-11: Resposta ao degrau do sistema experimental com ZPC ativado e controle PD	56
Figura 4-12: Diagrama de blocos do algoritmo do ZPC utilizado no experimento.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1- Lista dos símbolos utilizados na figura 3-2	28
Tabela 3-2- Parâmetros do sistema de desenvolvimento	34
Tabela 3-3- Dados técnicos do sensor de posição.....	35
Tabela 3-4- Parâmetros do Mancal experimental.....	42
Tabela 3-5- Parâmetros elétricos do atuador experimental.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	Analógico/Digital
ABS	Resina plástica, Acrilonitrila butadieno estireno
AMB	“ <i>Active Magnetic Bearing</i> ” (Mancal magnético ativo)
CPM	“ <i>permanent magnet control</i> ” (ímã controlado)
DAV	Dispositivo de Assistência Ventricular
DSP	“ <i>Digital Signal Processor</i> ” (processador de sinais digitais)
Gap	espaçamento (entreferro em sistema magnéticos)
GUI	“ <i>Graphical User Interface</i> ” (interface gráfica para o usuário)
LDR	“ <i>Light Dependent Resistor</i> ” (Resistor dependente da luz)
LVAD	(“ <i>left ventricular assist device</i> ”) Dispositivo de Assistência Ventricular Esquerdo.
IDPC	Instituto “Dante Pazzanese” de Cardiologia [3]
MAGLEV	“ <i>Magnetic levitation</i> ” (levitação magnética)
NdFeB	Ímã permanente de Neodímio-Ferro-Boro ¹ (Nd ₂ Fe ₁₄ B)
PWM	“ <i>Pulse Width Modulation</i> ” (pulso de largura variável)
RAM	“ <i>Random-Access Memory</i> ” (memória de acesso aleatório)
RPM	Rotações Por Minuto
TAH	“ <i>total artificial heart</i> ”(coração totalmente artificial)
TET	“ <i>Transcutaneous Energy Transfer</i> ”
VZP	“ <i>Virtual Zero Power</i> ”
ZPC	“ <i>Zero Power Control</i> ”

¹ http://en.wikipedia.org/wiki/Neodymium_magnet

SUMÁRIO

1	<u>INTRODUÇÃO</u>	<u>1</u>
1.1	O OBJETIVO.....	2
1.2	O PRINCÍPIO DO ZPC	3
1.2.1	SISTEMA MANUAL DE POTÊNCIA NULA	7
1.2.2	SISTEMA AUTOMÁTICO DE POTÊNCIA NULA	8
1.3	O PROJETO DO DAV-IDPC	10
1.4	SISTEMAS DE AMBS.....	13
2	<u>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</u>	<u>18</u>
2.1	CONCLUSÃO DA REVISÃO	25
3	<u>MATERIAIS E MÉTODOS</u>	<u>26</u>
3.1	O AMB DE SILVA E HORIKAWA (MANCAL EPUSP).....	26
3.1.1	O CONTROLE DO AMB EPUSP	28
3.1.2	A SIMULAÇÃO DO AMB EPUSP.....	30
3.1.3	DIAGRAMA DE BLOCOS GERAL DO CONTROLE INCLUINDO-SE OS BLOCOS DO ZPC AO MODELO DE SILVA	31
3.2	MODELO EXPERIMENTAL DO PROTÓTIPO DO AMB	32
3.2.1	A PLATAFORMA DE DESENVOLVIMENTO.....	33
3.2.1.1	O sensor de posição	34
3.2.2	ANÁLISE DAS FORÇAS MAGNÉTICAS DO AMB EXPERIMENTAL.....	37
3.2.2.1	Determinação da constante magnética k_h simulada	39
3.2.2.2	Determinação da constante magnética k_h experimental	40
3.2.2.3	Determinação da constante magnética k_t experimental.....	42
3.2.3	ANÁLISE DAS FORÇAS ELETROMAGNÉTICAS DO MODELO EXPERIMENTAL	43
3.2.3.1	Características elétricas do atuador eletromagnético experimental	44

3.3	O MODELO DE ZPC	45
3.3.1	<i>PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS DO ZPC.....</i>	46
3.3.2	<i>PRIMEIRA ABORDAGEM EXPERIMENTAL</i>	47
4	<u>RESULTADOS E DISCUSSÕES</u>	50
4.1	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES.....	50
4.1.1	<i>SIMULAÇÃO DO AMB EXPERIMENTAL SEM ZPC.....</i>	50
4.1.2	<i>SIMULAÇÃO DO AMB EXPERIMENTAL COM ZPC</i>	52
4.1.3	<i>AMB DE SILVA COM ZPC DE MIZUNO.....</i>	53
4.2	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	54
4.3	DISCUSSÕES	57
4.3.1	<i>ESTIMATIVA DAS POTÊNCIAS ENVOLVIDAS</i>	57
4.3.2	<i>DO CÓDIGO FONTE.....</i>	58
5	<u>CONCLUSÕES</u>	60
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	62
6	<u>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....</u>	63
7	<u>GLOSSÁRIO</u>	67
	APÊNDICE A- Ampliação da Figura 4.4.	68
	ANEXO A- O código fonte do controle com ZPC.....	69

1 INTRODUÇÃO

Os pacientes cardíacos que apresentam deficiência ventricular e que precisam de transplante cardíaco, em média podem ter que aguardar até 1,6 anos no Brasil [4]. A espera ocorre principalmente devido à escassez de doadores, e não faz parte do escopo deste trabalho a discussão dos fatores que motivam essa escassez. Sendo que neste período de espera muitos pacientes chegam a óbito.

A possibilidade de utilização de dispositivos artificiais como substituto ou como auxiliar do coração doente, incentivou as pesquisas e o desenvolvimento de complexos dispositivos mecatrônicos. Os dispositivos de substituição total são chamados de coração artificial ou TAH (*“total artificial heart”*), e os dispositivos de auxílio ventricular de DAV, sendo que particularmente para o ventrículo esquerdo o dispositivo chama-se LVAD (*“left ventricular assist device”*) [5].

Para um DAV atender a necessidade do paciente de sobrevivência por longos períodos, um dos requisitos técnicos é que o rotor da bomba propulsora tenha o mancal de levitação magnético [3]. Por isso este trabalho pretende contribuir como um subprojeto de um sistema de mancal magnético.

É de conhecimento comum que a levitação magnética (MAGLEV) aplicada em mancais magnéticos é uma solução para a eliminação do atrito na sustentação de rotores em sistemas mecânicos rotativos.

Os mancais magnéticos são ditos ativos (AMB – *“Active Magnetic Bearing”*) por utilizarem um sistema de controle para o posicionamento do rotor.

Este estudo partirá de um sistema de AMB desenvolvido por Horikawa e Silva [1][2], que é similar ao projeto deste trabalho nos seguintes pontos:

- Controle uniaxial (um grau de liberdade)
- Sistema magnético híbrido (forças eletromagnéticas e magnéticas)
- Tipo atração magnética

Assim sendo, o controle de levitação magnética de potência nula (ZPC) deste trabalho será um complemento ao sistema desenvolvido por Silva e Horikawa [1][2], e não fazem parte do escopo deste avaliar ou redefinir o modelo, apenas redimensionar as constantes devidas às diferenças físicas do sistema experimental.

O controle de mancal de levitação magnética de potência nula (ZPC) pode ser implementado por diversas técnicas, as quais serão comentadas no capítulo 2, porém todas têm o objetivo comum que é atingir a levitação magnética envolvendo o mínimo consumo de energia elétrica.

A técnica apropriada depende da aplicação, ou seja, dos requisitos exigidos pelo sistema. A técnica adotada neste trabalho para atingir o ZPC é apresentada no capítulo 3, e foi elaborada para atender especificamente o modelo do sistema de mancal magnético do dispositivo de assistência ventricular (DAV), que está sendo desenvolvido numa parceria do Instituto Dante Pazzanese de Cardiologia (IDPC) com a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (POLI-USP) sob suporte da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

O DAV desenvolvido pelo IDPC, doravante referenciado como DAV-IDPC [6], é uma bomba não pulsante de auxílio ventricular para a circulação sanguínea. Mais detalhes são apresentados no item 1.3.

1.1 O OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo primário o estudo do princípio do ZPC para ser aplicado ao mancal magnético do projeto temático DAV-IDPC [7].

O item 1.3 apresentará maiores detalhes sobre o projeto DAV-IDPC, mas antecipadamente sabe-se que o objetivo final é desenvolver um DAV implantável que proporcione mobilidade ao paciente com deficiência cardíaca enquanto aguarda fora do ambiente hospitalar por um transplante ou a regeneração cardíaca. E os principais fatores que contribuem para se obter a mobilidade do paciente são:

- a) A utilização intracorpórea do dispositivo
- b) A possibilidade de funcionamento através de baterias.

A utilização do ZPC no mancal magnético do DAV visa contribuir na eficiência energética e na redução da energia térmica produzida pelo sistema de levitação magnética do rotor.

O objetivo secundário deste trabalho é fornecer dados experimentais que venham contribuir no desenvolvimento do algoritmo de controle e gerenciamento da bomba do projeto DAV-IDPC. A necessidade de se definir o algoritmo do gerenciamento ou supervisão é justificada pelo fato de que na inicialização da suspensão magnética existe a necessidade de se determinar a posição de referência para o controle. A estratégia de inicialização não foi definida até o presente momento.

1.2 O PRINCÍPIO DO ZPC

São muito antigos e conhecidos os efeitos que um ímã exerce nos metais ferrosos. O fenômeno do magnetismo sempre exerce força de atração entre um ímã e um objeto ferromagnético. Também se podem obter forças repulsivas entre ímãs com campos em sentidos opostos, nos sistemas de levitação eletrodinâmica, e em sistemas que utilizam super condutores.

A base do ZPC em sistemas de levitação magnética é a utilização de forças magnéticas como fonte de força em detrimento da utilização de forças eletromagnéticas.

Como exemplo, a figura 1-1 apresenta um sistema de levitação magnética (MAGLEV) de forças de atração ímã-ferro formado por um ímã e um objeto ferromagnético. Pode-se afirmar que existirá uma distância (d) entre eles que a força magnética (f_m) que o ímã exerce sobre o objeto ferromagnético tem a mesma intensidade que a força peso (P) desse objeto, porém de sentidos opostos, devendo assim ocorrer o equilíbrio natural das forças ($f_m = -P$) e com isso o objeto seria mantido suspenso ou em levitação estaticamente.

Figura 1-1: Exemplo de sistema de levitação Ímã-ferro e as forças envolvidas

O teorema de Earnshaw [8] diz que não é possível atingir levitação estática estável usando uma combinação de ímãs e cargas elétricas fixas, exceto em sistemas que envolvam o diamagnetismo.

Figura 1-2: Ímã em levitação diamagnética [9]

A Figura 1-2 ilustra o fenômeno da levitação diamagnética que ocorre devido à supercondutividade dos materiais quando resfriados abaixo de uma temperatura característica (crítica).

Para se atingir a levitação de um objeto num sistema estático que não envolve o diamagnetismo é necessário o emprego de um sistema de controle de posição em malha fechada com atuadores eletromagnéticos e sensores de posição.

Caso o objeto assuma uma posição diferente da posição pré-definida, o sistema de controle utiliza-se dos atuadores eletromagnéticos para fornecer as forças eletromagnéticas extras para deslocar o objeto de volta para a posição pré-estabelecida.

A Figura 1-3 representa um sistema de levitação composto de um ímã como objeto móvel e uma bobina com núcleo ferromagnético formando assim o atuador do sistema que é responsável pela produção do campo eletromagnético extra. Essa configuração mista (forças eletromagnéticas e magnéticas) de circuito eletromagnético é chamada de híbrida.

O sistema eletromagnético híbrido de levitação magnética controlada (CPM – “*permanent magnet control*”) tornou-se um grande requisito nos métodos de economia de energia em sistemas MAGLEV [10].

Os CPMs utilizados em ZPC têm como característica única a rigidez negativa (“*negative stiffness*”), ou seja, operando sempre no modo de atração, reduzindo assim problemas de desmagnetização [11].

Figura 1-3: Sistema elementar de MAGLEV híbrido (CPM)

No sistema de MAGLEV híbrido esquematizado na figura 1-3 o objeto em suspensão sofre influência de três forças, uma é a força magnética (f_m) devido à atração que o ímã exerce com o núcleo ferromagnético da bobina do atuador eletromagnético, outra, é a força eletromagnética (f_{em}) produzida pela corrente na bobina do atuador, e esta força pode assumir os dois sentidos dependendo do sentido da corrente aplicada na bobina, a terceira é a força peso (P) devido ao campo gravitacional. A posição do objeto em relação a superfície inferior do núcleo do atuador é referenciada como eixo axial z .

Se no sistema da Figura 1-3 ocorrer o equilíbrio do objeto em suspensão vale a relação das forças da equação (1.1)

$$P = -(f_m + f_{em}) \quad (1.1)$$

Supondo-se que no sistema da Figura 1-3 o espaçamento entre o ímã e o núcleo do atuador seja a distância d , e que nesse ponto ocorra o equilíbrio natural ($f_m = -P$), então se pode considerar que a força eletromagnética seja aproximadamente nula ($f_{em} \approx 0$), porque neste caso o sistema de controle aplicará a força eletromagnética mínima necessária para a manutenção da posição do objeto na posição de referência ($Z_{ref} = d$). Doravante a posição que ocorre o equilíbrio natural será notada por “ Z_{ZR} ”, sendo que o termo “ ZR ” denota a condição de potência nula (aproximadamente nula). Portanto neste regime estático e controlado de levitação ocorrerá o menor consumo de energia pelo sistema.

Supondo-se agora que o sistema seja perturbado por uma alteração da força peso, então haverá uma nova posição (Z_{ZR}') para o objeto onde ocorrerá o equilíbrio natural novamente.

Portanto a principal função do controle de potência nula (ZPC) é determinar automaticamente e dinamicamente a posição do equilíbrio natural (Z_{ZR}) do objeto levitado.

1.2.1 SISTEMA MANUAL DE POTÊNCIA NULA

Nesta seção pretende-se exemplificar o princípio de controle de potência nula (ZPC) de forma manual, ou seja, o usuário determinará manualmente a posição de equilíbrio de potência nula (Z_{ZR}). A Figura 1-4 apresenta o esquema de um sistema elementar de suspensão magnética com controle em malha fechada para exemplificar o princípio.

O procedimento inicia-se considerando que o usuário tenha obtido a levitação do objeto numa posição qualquer, em seguida ajustará o potenciômetro (Z_{ref}) observando a intensidade da corrente do atuador eletromagnético até que a corrente indicada pelo amperímetro seja a mínima. Com isso pode-se considerar que a posição obtida como referência coincide com posição de equilíbrio natural ($Z_{ref} = Z_{ZR}$), e neste caso pode-se dizer que foi atingida a condição de potência nula.

A manutenção da posição e a estabilidade da suspensão do objeto ficarão a cargo do circuito de controle formado pelo amplificador, sensor e atuador.

Figura 1-4: Sistema manual de potência nula

Se após o sistema atingir a posição de equilíbrio natural ocorrer uma alteração na intensidade da força peso do objeto, será necessário repetir o procedimento de ajuste para se atingir novamente a condição de equilíbrio natural. Portanto, sempre que houver uma perturbação deve-se reajustar a posição (Z_{ref}) para se atingir a posição natural onde ocorrerá o menor consumo de energia. E se esse reajuste for suficientemente rápido tem-se o consumo mínimo possível para sistemas que sofrem constantes perturbações.

Pelo princípio exposto pode-se dizer que o sistema atinge a condição de mínimo consumo de energia pela observação da corrente elétrica no atuador, e essa corrente (I_L) é a variável controlada do sistema de suspensão de potência nula (ZPC).

1.2.2 SISTEMA AUTOMÁTICO DE POTÊNCIA NULA

Neste subitem pretende-se continuar com a exemplificação do princípio do ZPC, com objetivo de estabelecer uma base de entendimento do sistema que será desenvolvido no capítulo 3.

A Figura 1-5 representa de forma ilustrativa o sistema de controle automático de potência nula, baseado no sistema manual apresentado no subitem 1.2.1.

No sistema da Figura 1-5, o bloco $k.I_L$ faz uma conversão do sinal da corrente do atuador (I_L) em tensão ($V_m(I_L)$) de forma proporcional para acionar um motor bidirecional que atuará movendo o cursor do potenciômetro na direção necessária para alterar a tensão de referência do controle de posição até atingir a condição de corrente nula, que é o objetivo do sistema. Essa configuração é semelhante a dois sistemas de servo controle de posição entrelaçados, sendo um encarregado de controlar a levitação e outro a corrente. Por princípio este sistema de controle será robusto se a velocidade de resposta do controle da corrente for menor que o controle de posição do rotor.

Figura 1-5: Diagrama de um sistema automático de controle de potência nula

A Figura 1-6 apresenta em blocos o sistema de controle esquematizado na Figura 1-5, com objetivo de localizar a ação do bloco ZPC dentro do sistema. Onde, I_L representa a corrente no atuador eletromagnético e I_{ref} a corrente de referência que é constante igual à zero.

Figura 1-6: Diagrama de blocos de um sistema de controle com ZPC baseado no princípio manual exemplificado

O bloco “ZPC” é o responsável pela ação automática na determinação da posição Z_{ZR} e o faz utilizando o retorno da intensidade de corrente do atuador da planta. As estratégias existentes para a implementação do bloco “ZPC” serão abordadas no capítulo 2, e a estratégia adotada neste trabalho será abordada no capítulo 3.

1.3 O PROJETO DO DAV-IDPC

O projeto do DAV-IDPC é um projeto multicêntrico que envolve três grandes áreas, a Medicina, Engenharia Mecânica e Elétrica. As especificações técnico-biológicas e mecânicas foram estabelecidas pelos pesquisadores do conceituado Instituto Dante Pazzanese de Cardiologia (IDPC).

Numa parceria do IDPC com a Escola Politécnica da Universidade o projeto foi apresentado e aprovado pela FAPESP com período de execução de 01/12/2007 a 30/11/2011.

O objetivo do projeto é *“desenvolver novas tecnologias, componentes e subsistemas para uma bomba centrífuga implantável para assistência ventricular, de longa duração, para pacientes à espera de um transplante ou durante o tempo que durar sua terapia”* [7].

O projeto conta também com o apoio de diversas instituições e fundações de ensino e pesquisa do Brasil [12].

O DAV desenvolvido possui uma arquitetura inédita, cujo esquema é apresentado na Figura 1-7, o que o distingue dos demais DAVs conhecidos. O seu rotor consiste de um cone no qual são distribuídas aletas em forma de espiras helicoidais, que propulsionam o sangue. Essa configuração de bomba apresenta características intermediárias entre a bomba axial e a centrífuga (radial), ou seja, uma relação equilibrada de velocidade versus dimensão, essencial quando se deseja implantar o dispositivo no corpo.

Outra característica que o dispositivo apresenta é o bom desempenho de vazão e pressão.

A sua eficiência já foi demonstrada através de ensaios in vitro, in vivo (implante em bezerros) e finalmente em pacientes, sendo a sua eficácia comprovada.

Figura 1-7: Esquema de DAV- IDPC com rolamentos e gaxeta

A Figura 1-7 apresenta a versão inicial do DAV, sendo que o seu uso é indicado apenas em cirurgia cardíaca com circulação extracorpórea e com tempo máximo de utilização de até dois dias [13]. A Figura 1-8 representa o diagrama de blocos do sistema DAV-IDPC que utiliza a bomba da Figura 1-7 para auxílio do ventrículo esquerdo.

Figura 1-8: Diagrama de Blocos do Sistema DAV extracorpóreo

O desenvolvimento evoluiu para uma bomba de hélice dupla, que melhorou o fluxo de sangue de forma a evitar trombos, e pela substituição dos mancais de rolamento por pivôs cerâmicos (Figura 1-9) [14].

Figura 1-9: Bomba sanguínea centrífuga de sistema 2 pivôs [14]

Apesar da melhoria da eficiência do modelo pivotado (Figura 1-9), este ainda não permite que o DAV possa ser utilizado por longos períodos, o que motivou a pesquisa para o desenvolvimento do DAV com o rotor suspenso por um mancal magnético [10].

Como segunda fase do projeto, visa-se o desenvolvimento de um DAV implantável (Figura 1-10) e que permita uma sobrevida ao paciente de 6 a 24 meses, aumentando as chances de encontrar um doador compatível.

Figura 1-10: Diagrama de Blocos do Sistema DAV intracorpóreo

O diagrama de blocos da Figura 1-10 representa um sistema DAV totalmente intracorpóreo, onde a energia é transmitida através da pele por indução eletromagnética, sendo esta armazenada numa bateria interna. Este sistema proporciona certa mobilidade e autonomia ao paciente pelo tempo que a carga da bateria suportar.

O DAV intracorpóreo deve apresentar baixos índices de hemólise² e trombos³ para permitir longos períodos de funcionamento, e para atingir os índices necessários a bomba deve apresentar uma boa fluidez para reduzir os trombos e imprimir baixa tensão de cisalhamento no fluido reduzindo assim a hemólise [8]. Outro fator que contribui negativamente é o atrito gerado pelo mancal de rolamentos ou pivôs, e uma alternativa para eliminar esta parcela usa-se o mancal magnético.

A Figura 1-10 não apresenta o sistema do mancal magnético porque até o presente momento não está totalmente definido.

1.4 SISTEMAS DE AMBs

Nesta seção pretende-se apresentar sucintamente os princípios básicos de funcionamento e as classes de mancais magnéticos ativos (AMBs).

A principal propriedade do AMB é a ausência de atrito entre rotor e estator, o que propicia algumas vantagens em relação aos mancais de rolamentos, como dispensar manutenção para lubrificação, rejeitar perturbações de forma ativa permitindo assim diversas aplicações industriais, tais como bombas de vácuo, unidades de disco rígido, centrífugas de alta velocidade, turbo máquinas, etc. [15].

² Hemólise é a destruição das hemácias pela tensão de cisalhamento

³ Trombos é a coagulação indesejável que ocorre quando o sangue fica estagnado.

Os AMBs podem ser do tipo rotativo ou linear, sendo o linear utilizado nas aplicações de transporte. No capítulo 2 serão apresentados exemplos de aplicação para os dois tipos de AMBs.

Figura 1-11: Esquema básico de um AMB rotativo de 1 –GDL [15]

A Figura 1-11 representa o princípio básico de um AMB rotativo, onde o circuito eletromagnético é o único responsável pela geração das forças de levitação do rotor ferromagnético. As tensões V_1 e V_2 são controladas individualmente por um sistema de controle que opera baseado na posição do rotor na direção do eixo x . Os esforços perpendiculares ao eixo x no plano radial do rotor serão neutralizados pela geometria dos estatores (atuadores) que formam quatro pólos magnéticos atuando nos quatro quadrantes do rotor. Assim, pode-se considerar que as forças F_1 e F_2 são apenas resultantes no eixo x .

Não é do escopo desse estudo analisar os tipos de AMBs, mas apenas apresentar as configurações e as propriedades relevantes.

Figura 1-12: Configuração típica de um sistema de AMB rotativo [16]

A Figura 1-12 apresenta a estrutura básica de um sistema de AMB rotativo que não utiliza ímãs no sistema magnético, ou seja, todas as forças de posicionamento do rotor são oriundas do sistema eletromagnético. Para cada eixo controlado é utilizado um sensor e dois atuadores que produzem as forças radiais necessárias para manter a posição do rotor sob controle.

Figura 1-13: Sistema AMB linear para transporte [17]

A Figura 1-13 apresenta um AMB linear de um transportador patenteado por Morishita [17], onde no desenho à direita mostra o atuador eletromagnético acoplado mecanicamente ao rotor. O rotor é formado por quatro atuadores eletromagnéticos híbridos (CPM) do tipo atração. No centro entre as bobinas do atuador encontra-se o sensor de posição, sendo utilizado um sensor em cada atuador.

No AMB da Figura 1-13 a suspensão do rotor em regime pode ser obtida pela força magnética dos ímãs se a posição de referência coincidir com a posição de equilíbrio natural, ou seja, se o controle for do tipo potência nula a levitação ocorrerá utilizando apenas a força magnética dos ímãs.

Os AMBs do tipo híbrido (ou CPM) são sistemas de menor consumo elétrico em relação aos sistemas sem ímãs [10].

Normalmente, um AMB sem ímãs opera com a introdução de um fluxo magnético (ou corrente elétrica) constante e de nível suficientemente elevado no respectivo eletroímã, sendo assim chamado de fluxo de polarização (“bias flux”) [18].

Quando o AMB sem ímãs está em regime, a corrente elétrica do fluxo de polarização produz perdas de energia na componente ôhmica do atuador, dissipando essa energia na forma de calor podendo prejudicar o funcionamento do sistema. Existem diversos estudos apresentando técnicas de redução dessas perdas através do controle, pode-se encontrar nos trabalhos de Motee [18], Queiroz [19], Tsiotras [15] e outros. Apesar de se desejar a redução do fluxo de polarização, a não-linearidade do sistema AMB será acentuada, podendo levar a uma singularidade de controle [15][19].

Os sistemas de mancais magnéticos ativos podem ser classificados pela característica magnética da suspensão e pelo número de graus de liberdade controlada.

As características do sistema magnético da suspensão classificam os AMBs em relação ao emprego ou não de ímãs, e quanto ao modo da atuação dos ímãs, ou seja, se trabalham no modo atração ou repulsão.

A Figura 1-14 representa um quadro de classificação de AMBs extraído da tese de doutorado de Silva [2], onde os blocos destacados indicam a classificação do sistema de AMB que será utilizado neste estudo.

Figura 1-14: Classificação dos mancais magnéticos [2]

Pode-se observar que a classe do AMB em estudo contempla as vantagens de um mancal híbrido que permite menor consumo de energia, no modo atração que reduz a desmagnetização dos ímãs como acontece nos sistemas do tipo repulsão, e é de controle uniaxial que simplifica o sistema de controle.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, apresentam-se os principais trabalhos documentados sobre o ZPC com o propósito de informar sobre os métodos já desenvolvidos e as principais aplicações.

Os princípios de obtenção do ZPC serão abordados apenas para informação, e não serão analisados quanto ao desempenho individual ou comparativo.

O primeiro documento encontrado sobre ZPC é do inventor Joseph Lyman de 1975 [20], cujo esquema básico do dispositivo experimental está representado na Figura 2-1. Trabalho este desenvolvido e patenteado sob contrato com a NASA, e trata-se de um AMB híbrido do tipo atração e de controle uniaxial totalmente analógico. O autor utilizou lâmpadas e fotocélulas para os sensoriamentos de posição e da corrente do atuador eletromagnético.

Figura 2-1: AMB híbrido tipo atração de Lyman com ZPC analógico [20]

No dispositivo da Figura 2-1 pode-se observar que a bobina localizada no lado direito próxima ao ímã tem a função de produzir um sinal ao controle de característica derivativa e os sensores ópticos com característica proporcional. Para a ação do ZPC o autor utiliza duas lâmpadas instaladas em paralelo com os atuadores e dois sensores ópticos tipo LDR (resistor dependente da luz), onde o LDR atua no circuito como o elemento resistivo de um filtro passa baixa formado pela associação com um capacitor. Essa configuração determina que o ZPC seja atingido através de um filtro passa baixa para o sinal da corrente no atuador. A documentação da patente não detalha ou avalia o sistema de controle, portanto não está definindo a existência de uma ação integrativa no controle, porém o pesquisador Brad Paden [21] utiliza o princípio de ZPC de Lyman num projeto de um LVAD (*“Left Ventricular Assist Device”*) implantável e o divulga em 2002.

A Figura 2-2 apresenta uma vista em corte da bomba axial de Paden conhecido como LVAD, onde o fluxo sanguíneo ocorre da direita para a esquerda, e os elementos magnéticos que compõem o rotor vão inseridos na turbina isolados do sangue.

Figura 2-2: LVAD axial de Paden [21]

Segundo Paden informa em sua apresentação pela Figura 2-3, o rotor da bomba sofre um esforço médio axial quando em operação de 4,0 N o que pode representar um enorme consumo de energia para manter o rotor em levitação. Como solução para a redução dessa energia ele também utiliza o ZPC em seu sistema de controle e informa que a potência que os atuadores da suspensão dissipam em pleno funcionamento é de apenas 1,5 W.

Figura 2-3: Esforços axiais no rotor do LVAD de Paden [21]

Da Figura 2-3 pode-se observar que os esforços sob o rotor são pulsantes de forma semelhante à pulsação cardíaca, e pela curva essa pulsação ocorre na taxa de 60 por minuto. O motor é do tipo BLDC (sem escovas) e “sensorless” (sem sensores de posição angular do rotor).

Na Figura 2-4 Paden apresenta o diagrama de blocos do controle do seu LVAD, onde se pode observar que a estratégia de controle é PD incluindo-se o ZPC baseado em Lyman. Diversos pesquisadores se referem ao ZPC utilizando a sigla VZP (“*Virtual zero Power*”).

Figura 2-4: Diagrama de blocos do controle do LVAD de Paden [21]

No sistema de controle da figura 2-4, no bloco de ZPC que está notado como “VZP controller”, Paden faz uma integração da corrente e converte num sinal de posição que é utilizado como referência de posição para o controlador PD. Ainda no bloco ZPC ele inclui a ação “anti-windup” como limitador da ação do ZPC configurando uma ação não linear que previne a perda de sintonia pelo integrador.

No ano seguinte (1976) após Lyman registrar sua patente, e na mesma instituição, surge Paul A. Simpson [22] registrando patente do projeto de um veículo de transporte de levitação magnética (figura 2-5) que também utiliza o ZPC.

Figura 2-5: Veículos de MAGLEV de Simpson [22]

Os registros apontam que somente a partir de 1986 surgiram novos trabalhos acadêmicos neste tema, tanto que o trabalho de Morishita [23] publicado nesta data tornou-se referência para todos os pesquisadores. Morishita propõe a aplicação da técnica ZPC num transportador de levitação magnética em ambiente limpo para a fabricação de circuitos integrados. A

Figura 2-6 esquematiza o dispositivo transportador classificado como um AMB linear híbrido semelhante ao sistema da Figura 1-13.

Figura 2-6: Esquema do transportador MAGLEV de Morishita [23]

No diagrama da Figura 2-7 o bloco detector de corrente do atuador o faz através de resistor shunt produzindo assim um valor real. A corrente é comparada com a referência zero resultando no sinal $-I(s)$, onde o bloco seguinte integra e reduz convertendo o sinal em posição de referência para o bloco de controle de posição.

Figura 2-7: Diagrama de blocos do controle do transportador de Morishita [24]

Os resultados experimentais do sistema de Morishita podem ser observados através da Figura 2-8, onde a curva inferior mostra a variação da corrente do atuador, e na superior a variação da posição do rotor (gap) quando o sistema é submetido a um degrau de carga de 1,5 Kg.

Figura 2-8: Comportamento da corrente e deslocamento em resposta a um carregamento de 1,5 Kg no rotor em suspensão [24]

Posteriormente surgiram diversos trabalhos científicos no tema e a maioria citam Morishita [23][24] como referência.

Em 2002 o pesquisador Mizuno [25] publica um trabalho onde avalia duas técnicas para atingir o ZPC e cita as técnicas concorrentes. Ele relaciona os seguintes tipos de abordagem de ZPC:

- 1- *Pela realimentação da velocidade do objeto suspenso* [26][27]
- 2- *Por uma redução da integral do feedback⁴ da corrente* [24][28]
- 3- *Construindo um controlador baseado em observador com o função de estimar as perturbações que atuam sobre o objeto em suspensão* [10][23]
- 4- *Usando um filtro Passa Baixa* [20][23]
- 5- *Por uma redução da integral do feedback da tensão* [29]

Neste artigo, Mizuno [25] desenvolve e avalia experimentalmente os sistemas de suspensão controlados por tensão e controlados por corrente, concluindo que ambos atingiram o ZPC com igual eficiência. A Figura 2-9 apresenta o modelo experimental utilizado.

Figura 2-9: Sistema experimental do AMB de Mizuno [25]

No capítulo 4 será apresentada uma simulação do sistema de ZPC controlado por tensão utilizando o sistema desenvolvido por Mizuno [25] baseado nos parâmetros do mancal de Silva & Horikawa [1][2].

⁴ Feedback- se refere ao sinal de realimentação

Uma característica única do ZPC é que o sistema seja de rigidez negativa (atração); quando uma força externa é aplicada ao corpo em levitação, este será movimentado em direção oposta a força, até atingir a nova posição de equilíbrio. Esta propriedade propõe um novo sistema de isolamento de vibrações, o qual tem alta rigidez contra perturbações diretas sem prejudicar o desempenho na redução de vibrações do solo [30] apud [25]. (tradução nossa).

Também existem diversos trabalhos publicados relacionados a isolamento de vibrações de diferentes graus de liberdade, e os termos mais comuns utilizados como chave são: “Vibration isolation”, “Zero-compliance” e “Disturbance cancellation”.

Verificam-se outras publicações correlatas ao ZPC propondo:

- O emprego da técnica PWM no acionamento dos atuadores [31][32][33]
- O sistema “self-sensing” (auto-sensor) de posição [34][35] que dispensa o sensor de posição, a própria bobina do atuador servindo como sensor.
- Estudos da controlabilidade com a integração do PWM e “self-sensing” [36][37][38]
- Estudos de avaliação para distúrbios quase periódicos [5]

2.1 CONCLUSÃO DA REVISÃO

Os resultados dos trabalhos de Morishita [17] e Youn [10] se mostraram ótimos, porém, ambos utilizam o sinal de retorno da corrente obtido fisicamente através de um circuito “shunt”.

Os trabalhos de Paden [21] e Mizuno [25] utilizam a variável de controle ($V_C(s)$) para determinar a corrente do atuador, dispensando o circuito shunt e simplificando assim o sistema elétrico. Pela simplicidade do circuito e pela semelhança dos trabalhos desenvolvidos com a aplicação deste projeto, conclui-se inicialmente que seja a abordagem mais indicada do ZPC para o DAV.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os dispositivos envolvidos no trabalho, os princípios e os critérios adotados no desenvolvimento.

3.1 O AMB DE SILVA E HORIKAWA (MANCAL EPUSP)

O mancal EPUSP será a base para o desenvolvimento deste estudo porque ele apresenta todas as propriedades necessárias, como citadas no capítulo anterior, para se realizar a implementação do ZPC.

O objetivo desta seção é apresentar o mancal magnético EPUSP (Escola Politécnica da Universidade de São Paulo) abordando sucintamente a arquitetura e mais detalhadamente o modelo e a estratégia de controle, permitindo assim que se concentrem esforços neste trabalho complementar.

O conceito do mancal magnético com atuação ativa em apenas um eixo (1-GDL) foi estabelecido nos trabalhos de Silva e Horikawa [1][2], sendo referenciado como mancal magnético EPUSP, ou na forma reduzida de AMB EPUSP.

A Figura 3-1 apresenta a configuração do mancal magnético EPUSP, onde apenas o eixo axial do rotor requer um controle ativo. O movimento nas demais direções é restrito somente pela ação dos ímãs permanentes que operam em modo de atração.

Figura 3-1: Configuração do sistema do AMB EPUSP

Como apresentado na Figura 3-1, em cada extremidade do rotor é fixado um ímã em forma de coroa circular. A parte fixa próxima aos ímãs do rotor será referida como estator, sendo este formado por um sistema híbrido de eletroímã um para cada lado. Um sensor indutivo de posição faz a leitura do deslocamento axial do rotor e envia ao controlador que atuará sob o rotor através dos atuadores eletromagnéticos a fim de reposicionar o rotor quando necessário.

Silva [2] apresenta um conjunto de equações que descreve o sistema de suspensão magnética com base no ângulo θ de desvio, na distância e entre as faces internas dos ímãs e nos parâmetros dos ímãs permanentes: a magnetização J , a área S da seção transversal, o raio R , o perímetro p , a espessura a , e l o comprimento do rotor.

Figura 3-2: Aspectos geométricos dos ímãs do AMB EPUSP

A estabilidade passiva do mancal é garantida pela geometria do rotor em relação às dimensões do ímã, sendo a equação 3.1 determinante da relação ideal entre o comprimento do rotor (l) com o raio (R) do ímã.

$$l > 2R \quad (3.1)$$

As equações 3.2 e 3.3 definem a rigidez radial (k_r) e axial (k_a) do mancal, sendo $\sigma = e + a$ e $B = \frac{J^2 s^2 p}{2\pi\mu_0}$.

$$K_r = \frac{6\beta \cos(4\theta)}{\sigma^4} \quad (3.2)$$

$$K_a = -2K_r \quad (3.3)$$

3.1.1 O CONTROLE DO AMB EPUSP

A Figura 3-3 apresenta o diagrama de blocos do sistema de controle do mancal magnético desenvolvido por Silva & Horikawa [1], utilizando a estratégia de controle PID.

Figura 3-3: Diagrama de blocos do sistema de controle do AMB EPUSP sem ZPC

Tabela 3-1- Lista dos símbolos utilizados na figura 3-2

Símbolo	Descrição	Unidade	Símbolo	Descrição	Unidade
Z	Eixo axial do rotor	Metro	D	Força distúrbio	Newton
Z_r	Posição de referência	Metro	M	Massa do rotor	Kilograma

V_r	Tensão de referência	Volt	V_c	Saída controle	Volt
E	Erro	Volt	V_s	Saída do sensor	Volt
V	Saída amplificador	Volt	k_t	Constante eletromagnética	Newton/Ampère
L	Indutância do atuador	Henry	k_h	Constante magnética	Newton/Metro
R	Resistência da bobina do atuador	Ohms	k_a	Ganho do amplificador	Volt/Volt
I	Corrente na bobina	Ampère	k_s	Ganho do sensor	Volt/Metro

A Figura 3-4 é o redesenho do diagrama de blocos de fig. 3-3 com pequenas alterações nos blocos $G_c(s)$ e $G_2(s)$ com o objetivo de se obter uma visão geral dos blocos que formam o sistema de controle.

Figura 3-4: Redesenho do diagrama de blocos do sistema de controle do AMB sem ZPC

Considerações:

- O termo $G_c(s)$ para representar apenas o bloco de controle PID.
- O termo $V_c(s)$ representa a tensão de controle na saída de $G_c(s)$.

Redesenhando, considerando apenas os blocos do sistema, tem-se:

Figura 3-5: Diagrama de blocos generalizado do AMB EPUSP

O diagrama apresentado pela Figura 3-5 será utilizado no subitem 3.1.3 como base para a inserção do bloco de controle de potência nula (ZPC).

3.1.2 A SIMULAÇÃO DO AMB EPUSP

Esta seção apresenta uma simulação baseada nos resultados obtidos na tese de doutorado de Silva [2] para o controle do mancal, servindo como referência para as futuras análises dos resultados que forem apresentados neste trabalho.

A figura 3-6 apresenta a resposta da simulação computacional do sistema de controle empregado no AMB EPUSP ao degrau.

Figura 3-6: Resposta ao degrau do AMB EPUSP

3.1.3 DIAGRAMA DE BLOCOS GERAL DO CONTROLE INCLUINDO-SE OS BLOCOS DO ZPC AO MODELO DE SILVA

Esta seção apresentará uma visão geral do sistema de controle do mancal destacando a área dos blocos de ZPC.

A figura 3-7 apresenta o diagrama de blocos do ZPC elaborado a partir dos princípios fundamentais do ZPC detalhados no subitem 3.3.1 e pela abordagem definida no item 2.1, que se resumem nas seguintes etapas: 1- determinar a corrente do atuador ($I_L(s)$) a partir da tensão de controle $V_C(s)$ que é uma variável interna de valor estabelecido pela função de controle (PD ou PID) do mancal; 2- compara-la com a referencia ($I_{ref}(s)=0$); 3- converter a corrente em tensão relativa a posição ($V_Z(s)$); 4- acumular a tensão de posição através do integrador obtendo-se como resultado a tensão $V_{ZR}(s)$, que ao ser adicionada a tensão da posição de referência $V_{ref}(s)$ determinará na nova posição de referência para o controlador de posição.

Figura 3-7: Diagrama de blocos do ZPC

Pode-se considerar que o sistema de controle geral é formado por dois controladores entrelaçados, onde um se encarrega do controle da posição e outro na redução da corrente do atuador.

A Figura 3-8 apresenta o diagrama de blocos completo do sistema de controle, onde a área assinalada pelo pontilhado representa o sistema de controle de potencia nula, e os blocos restantes compõem o sistema de controle de posição em malha fechada do modelo de Silva [2].

Figura 3-8: Diagrama de blocos Geral do controle incluindo-se os blocos do ZPC ao modelo de Silva

3.2 MODELO EXPERIMENTAL DO PROTÓTIPO DO AMB

Para o desenvolvimento do sistema de suspensão magnética é conveniente utilizar um modelo experimental o mais aproximado possível do sistema real e que permita as manipulações e as alterações que forem necessárias.

Nesta seção será apresentado o modelo experimental de desenvolvimento que foi caracterizado nos moldes do projeto DAV-IDPC, e devido as semelhanças técnicas já comentadas na introdução deste trabalho, o sistema de controle será o mesmo que foi desenvolvido para o mancal EPUSP, alterando-se apenas as constantes.

Principais características do modelo experimental de AMB:

- Sistema magnético do tipo atração
- Não motorizado (rotor livre)

- Sensor indutivo de posição que não compromete o núcleo do atuador (não disputa espaço)
- Permite aplicação de esforços radiais e axiais

A figura 3-9 apresenta a foto do mancal experimental com o rotor em levitação.

Figura 3-9: Foto do mancal experimental

3.2.1 A PLATAFORMA DE DESENVOLVIMENTO

A figura 3-10 apresenta o sistema de desenvolvimento para o mancal EPUSP, o algoritmo de ZPC será implantado sobre o programa existente de controle PID.

Figura 3-10: Diagrama de blocos do sistema desenvolvido

A plataforma conta com um microcomputador (IBM-PC) equipado com uma placa de aquisição de 16 bits de resolução e taxa da amostragem limite de 100 KHz, e o compilador Turbo Pascal 7.0 sobre o Sistema operacional Windows 98. Também é utilizado um amplificador linear com capacidade de até três ampères de corrente com 12 Volts e ganho de tensão $k_a = 10$. Um sensor de posição (medidor do entreferro) e o mancal magnético com as características citadas no item 3.2.

Tabela 3-2- Parâmetros do sistema de desenvolvimento

Descrição do parâmetro	Valor
Ganho do amplificado (k_a)	10 [V/V]
Tempo de amostragem (t_{am})	320 μ s
Constante de tempo do atuador (τ)	1,0 ms
Impedância do atuador ($Z(63 \text{ rad/s})$)	2,5 Ω

3.2.1.1 O sensor de posição

O sensor de posição é um sensor analógico de característica indutiva cujas especificações são apresentadas na tabela 3-2.

O sensor original, fornecido pelo fabricante tem a forma cilíndrica (figura 3-11 a) com diâmetro de 5 mm e comprimento de 38 mm com rosca, porém, para a medição do deslocamento axial do rotor era necessário que sensor ficasse exatamente no lugar do núcleo do atuador, por isso foi necessário modificar o elemento transdutor (a bobina) para a forma apresentada na figura 3-11 b, onde a bobina é do tipo anel com 10 mm de diâmetro interno e é alojada sobre o carretel do atuador (figura 3-12). O núcleo ferro magnético deve ficar cerca de 0,5 mm abaixo da bobina para que este não sature o sensor e prejudique a sua sensibilidade.

Tabela 3-3- Dados técnicos do sensor de posição

Descrição do parâmetro	Valor
Tensão de alimentação	± 12 VDC
Faixa de tensão de saída	± 5 VDC
Tensão de saída à máxima distância	5 VDC
Faixa de medição recomendada	$0 \dots 2 \times 10^{-3}$ m
Resolução	0,5 μ m
Espessura recomendável do alvo	$>0,2 \times 10^{-3}$ m
Diâmetro da ponta (original)	5×10^{-3} m
Resposta de frequência	DC – 20 KHz
Ref. Comercial do sensor	PU-05
Ref. Comercial do condicionador	AEC-5505

Figura 3-11: Sensor de posição, a) Sensor original com cabo b) Bobina modificada

Figura 3-12: Posição da bobina sensora no atuador

A modificação do formato da bobina transdutora permitiu a presença do núcleo ferromagnético centralizado no eixo axial do atuador conforme representa o esquema da figura 3-12. Pode-se observar um esquema completo do mancal experimental pela figura 3-15 no subitem 3.2.2.

3.2.1.1.1 Determinação da constante k_s (ganho do sensor)

Através da curva da Figura 3-13 será obtido o valor da constante k_s que relaciona a tensão de saída pela posição (distância do alvo ao sensor). A distorção que a curva mostra pode ser justificada por diversos fatores, por exemplo, a geometria da bobina não é original, foi modificada para atender a necessidade de não prejudicar a forma do núcleo do atuador e também o método de ensaio que não permita precisão suficiente. Para obter o valor de k_s e minimizar o problema da não linearidade pode-se definir a região de trabalho e linearizar dentro desta região.

Figura 3-13: Curva resposta do sensor de posição

A região de operação do mancal experimental será entre 1,5 mm e 2,5 mm, sendo estes valores obtidos experimentalmente na observação da região de controle e explica-se pelo fato do atuador apresentar menor relação de força/corrente do que a simulação (fig. 3-19).

Portanto, para a região definida, a inclinação determinada pela curva da Figura 3-13 é de 2,5 V/mm, então $k_s = 2500$ V/m.

A Figura 3-14 apresenta um diagrama de blocos do condicionador de sinais para o sensor indutivo analógico.

Figura 3-14: Diagrama de blocos do condicionador do sensor indutivo [21]

3.2.2 ANÁLISE DAS FORÇAS MAGNÉTICAS DO AMB EXPERIMENTAL

Esta seção apresenta uma avaliação do comportamento das forças magnéticas (ímãs) atuantes sob o rotor em função da posição do mesmo. Esse estudo pode contribuir na definição da região de controle para se estabelecer os limites de atuação do ZPC pela função anti-windup, e também para auxiliar na definição da estratégia de inicialização funcionamento do mancal do DAV.

A Figura 3-15 apresenta o esquema básico elaborado para o desenvolvimento do Mancal EPUSP para o projeto do DAV-IDPC. Desconsiderando a força da gravidade e considerando os ímãs idênticos, pode-se concluir que quando os entreferos da base e do topo forem iguais, ocorrerá um equilíbrio de forças e o rotor ficaria suspenso momentaneamente, pois o sistema é instável. Nesse caso considera-se que $f_{m1} = -f_{m2}$, e observando-se as curvas da Figura 3-15 no ponto de simetria em 2,0 mm as forças magnéticas têm a mesma intensidade porem sentidos opostos.

Figura 3-15: Sistema de suspensão e as forças magnéticas envolvidas (bobinas desligadas)

A Figura 3-16 apresenta o comportamento das forças magnéticas do sistema da Figura 3-15 obtido através de simulação computacional, onde a simulação se inicia com um entreferro de 0,5 mm e se encerra com 3,5 mm. Essas medidas foram estrategicamente definidas em função das dimensões do dispositivo experimental. As curvas das forças magnéticas foram traçadas separadamente para permitir a verificação do comportamento individual de cada atuador sob o rotor.

Figura 3-16: Curvas típicas das forças magnéticas obtidas em simulação

As regiões chamadas de “parede separadora” e “núcleo” da Figura 3-16 são respectivamente as paredes acrílicas que separam a parte interna da bomba (que tem contato com o sangue) da parte externa onde será fixada a bobina com o referido núcleo do circuito magnético. Convenientemente a parede separadora garante que o rotor não atinja medidas muito reduzidas, pois quando o ímã chega muito próximo ao núcleo ferromagnético a força de atração aumenta de forma não linear prejudicando o controle. Pode-se observar o comportamento não linear nos extremo esquerdo e direito das curvas do gráfico.

3.2.2.1 Determinação da constante magnética k_h simulada

Escolhendo-se a curva da força magnética de um atuador apresentada na Figura 3-16, no caso escolhendo f_{m2} , e tomando-se a variação da força na região central (em 2,0 mm) de $\pm 0,5$ mm, tem-se $\Delta f_{m2} = 2,7$ N com $\Delta z = 1$ mm, determina-se a constante k_h pela equação (3.4) o valor encontrado é de 2700 N/m.

$$k_h = \frac{\Delta f}{\Delta z} \quad (3.4)$$

As simulações foram realizadas para um atuador e projetadas para o outro considerando-se que o sistema seja simétrico.

Figura 3-17: Curva resultante das forças magnéticas (simuladas)

A curva da Figura 3-17 apresenta a simulação das forças magnéticas resultantes no rotor em função do entreferro. A região central da curva está destacada por ser a região de controle, a qual será definida no tópico 3.2.3.

3.2.2.2 Determinação da constante magnética k_h experimental

A constante magnética k_h relaciona a força de atração existente entre o ímã e o núcleo ferromagnético do atuador desenergizado em função da distância [N/m].

Para a determinação da constante magnética (k_h) do AMB experimental foi utilizado o dispositivo esquematizado pela Figura 3-18.

Figura 3-18: Sistema utilizado para medição da força magnética ímã - núcleo x entreferro

O procedimento experimental com o sistema da fig. 3-18 foi realizado fazendo-se marcas na barra de material acrílico para as posições de apoio, da carga e do centro do ímã. Também foi estabelecido um apoio numa ponta da barra com a altura necessária para fazer a barra ficar na posição horizontal e a outra ponta apoiada sobre o ímã. A seguir, o carregamento foi realizado acrescentando-se pesos conhecidos até romper a sustentação feita pelo ímã. Com isso pode-se determinar o valor da força magnética para a espessura definida pela barra acrílica. Para determinar outro ponto, a barra foi substituída por outra de espessura diferente e repetido o carregamento até romper novamente a sustentação, e assim variando-se a espessura da barra pode-se obter ao menos três pontos possibilitando a construção da curva da força magnética e o entreferro.

A Figura 3-19 apresenta a curva obtida experimentalmente e a simulada da relação de força magnética versus entreferro para a determinação da constante magnética k_h através da equação 3.4. Tomando-se os pontos de entreferro 1,5 mm a 2,5 mm tem-se $\Delta z = 1,0$ mm e $\Delta f = - 2,75$ N, obtendo-se o resultado de $k_h = - 2750$ N/m.

Figura 3-19: Curva de força magnética versus entreferro (experimental)

3.2.2.3 Determinação da constante magnética k_t experimental

A constante eletromagnética k_t relaciona a força eletromagnética por corrente do sistema atuador do mancal.

A obtenção dos dados foi feita utilizando-se o próprio sistema experimental operando sob controle PID somente. Com o rotor na condição de repouso do foi observado a corrente do atuador, a seguir, foi aplicado uma carga conhecida diretamente sob o rotor e assim pode-se observar o novo valor da corrente. Portanto, foi considerado o incremento de corrente (ΔI_L) como a geradora da força de equilíbrio da carga aplicada.

Foram obtidos os seguintes valores, para $\Delta I_L = 0,44$ A; e $P' = 0,217$ N .

A constante k_t é definida pela equação 3.5.

$$k_t = \frac{P'}{\Delta I_L} \quad (3.5)$$

Portanto, o resultado obtido foi $k_t = 0,49$ (N/A) .

Tabela 3-4- Parâmetros do Mancal experimental

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Constante magnética	k_h	-2750	N/m
Constante eletromagnética	k_t	0,49	N/A
Ganho do Sensor	k_s	2500	V/m

Massa do Rotor	M	0,055	kg
-----------------------	-----	-------	----

3.2.3 ANÁLISE DAS FORÇAS ELETROMAGNÉTICAS DO MODELO EXPERIMENTAL

Nesta seção serão estudados o comportamento das forças eletromagnéticas e a relação com as magnéticas do dispositivo experimental para verificar os limites de controle da levitação. Estes limites serão utilizados na definição dos parâmetros do bloco anti-windup do algoritmo final de controle do DAV. A função do termo anti-windup é necessária pelo fato do ZPC ser um integrador e, se o mancal sofrer esforços excessivos, pode-se ter a saturação do atuador e como consequência o sistema perderá a estabilidade.

Figura 3-20: (a)Esquema eletromagnético do AMB experimental; (b) modelo elétrico do atuador

A figura 3-20(a) apresenta o modelo eletromagnético do AMB experimental, onde para o arranjo dado aos ímãs observa-se que é necessário que os campos magnéticos produzidos pelos dois atuadores sejam contrários para que as forças eletromagnéticas sejam concordantes, assim se conclui que as bobinas devem ser ligadas com as polaridades invertidas.

3.2.3.1 Características elétricas do atuador eletromagnético experimental

Oportunamente deve-se observar que a equação diferencial que descreve a dinâmica do atuador é dada pela equação 3.6 e o termo $(k_b \cdot dz/dt)$ que significa a tensão induzida devido ao deslocamento do ímã em relação à bobina, poderá ser desprezado devido a baixa velocidade de deslocamento axial que está prevista para o funcionamento do DAV, causado pelo amortecimento hidráulico.

$$M \frac{d^2 z}{dt} = k_h z(t) + k_t i(t) + k_b \frac{dz}{dt} \quad (3.6)$$

Tabela 3-5- Parâmetros elétricos do atuador experimental

Descrição do parâmetro	Valor
Indutância total (duas bobinas)	0,0025 Henry
Resistência total (duas bobinas)	2,5 Ohms
Números de espiras (cada bobina)	450

A Figura 3-21 é resultado da simulação do sistema eletromagnético do AMB e apresenta a família de curvas de forças que o rotor está submetido. Nota-se que a curva de força para corrente nula (de 0 A) representa a força resultante unicamente das forças magnéticas (ímãs), e fica exatamente no meio delas, sendo notada por f_m .

Figura 3-21: Curva característica das forças no rotor do AMB (simulação computacional)

Através das curvas de Figura 3-21 observa-se que para o entreferro de 2,0 mm têm-se apenas forças eletromagnéticas (f_{elm}) e o valor máximo é de 4 N em cada direção, portanto pode-se definir que os limites de controle vão de 1,3 mm até 2,7 mm. Também se pode considerar que dentro do limite de controle o comportamento das forças em função da corrente seja linear.

3.3 O MODELO DE ZPC

O modelo considerado adequado para este trabalho é o tipo 5 da classificação de Mizuno [25], que aborda o ZPC controlado por tensão. Este modelo já foi utilizado pelos pesquisadores desde Lyman [20], Mizuno [25], até Paden [21] em seu LVAD. O modelo de controle desenvolvido por Mizuno foi simulado para o AMB EPUSP apresentando um excelente desempenho conforme será mostrado no capítulo 4.

3.3.1 PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS DO ZPC

a) O controle precisa do sinal da corrente do atuador.

Como a função de transferência $G1(s)$ (amplificador + atuador eletromagnético) é de primeira ordem e a frequência natural do rotor ($\omega_{nr} \approx 63 \text{ rad/s}$) é muito menor que a frequência natural do atuador eletromagnético (ω_{na} , na ordem de 10^3 rad/s), se pode considerar que a corrente no atuador (I_L) é proporcional a tensão de controle V_c .

Portanto este princípio permite que se utilize a variável interna

$V_c(s)$ para determinar a corrente do atuador dispensando assim o circuito “shunt” (detector do sinal corrente).

O cálculo da corrente implementado experimentalmente é apresentado no subitem 3.3.2 .

A rigor, na simulação a corrente pode ser determinada a partir do termo representado na equação 3.7 que também é utilizado em $G1(s)$.

$$I(s) = V_c(s) \cdot k_a \cdot \frac{1}{Ls + R} \quad (3.7)$$

b) O ZPC deve atuar quando o rotor estiver em regime (baixa velocidade) e existir corrente no atuador.

Figura 3-22: Ilustração do conceito da atuação do bloco ZPC

Os distúrbios devem ser controlados pela ação do PID, mas quando a posição do rotor estiver acomodando, ou seja, a velocidade diminuindo e existindo corrente no atuador o ZPC deve atuar.

Em outras palavras, o ZPC deve responder nas baixas frequências e o controle de posição nas altas.

3.3.2 PRIMEIRA ABORDAGEM EXPERIMENTAL

Esta seção descreve a abordagem inicial que foi elaborada de forma intuitiva para evidenciar o princípio do ZPC.

Tipicamente, um sistema de controle discreto em regime apresenta na saída do bloco de controle ($V_c(s)$) um sinal semelhante ao apresentado na Figura 3-23 .

Figura 3-23: Sinal típico do controle em regime

Com intuito de filtrar as pequenas variações do sinal ($V_c(s)$) resultantes da característica PD da função $G_c(s)$, foi adotada a estratégia da média aritmética para o sinal $V_c(s)$, configurando uma ação de filtro passa baixa para os sinais com característica apresentada na fig. 3-23 .

Figura 3-24: Diagrama de blocos da proposta inicial da rotina ZPC

Onde, V_c , I_{LM} , I_{ref} , k_z , V'_Z e V_{ZR} são a tensão de controle, a corrente média do atuador, a corrente de referência, a constante de conversão corrente tensão, a tensão correspondente a diferença da posição do rotor e a posição de equilíbrio natural ($f_{em} = 0$), a tensão relativa a nova posição (equilíbrio natural).

Descrição dos blocos da rotina ZPC da Figura 3-24:

Bloco 1: Cálculo da corrente média do atuador

Para o cálculo da corrente consideram-se conhecidas as constantes: ganho de tensão do amplificador, a Indutância de atuador e a taxa de amostragem.

A tensão média da saída do controle é dada pela equação 3.8.

$$V_M = \frac{(V_{c,n} + V_{c,n-1})}{2} \quad (3.8)$$

Onde, $V_{c,n}$ e $V_{c,n-1}$ são a tensão atual na saída do controle ($G_C(s)$) e o valor anterior.

A equação 3.9 representa a corrente do indutor em resposta a um degrau de tensão.

$$i_L(t) = I_{max} \times \left(1 - e^{-t/\tau}\right) \quad (3.9)$$

Considerando que a frequência natural do rotor é muito menor que a do atuador, então as variações da tensão $V_M(t)$ ocorrerão por períodos muito maiores que a constante de tempo do atuador, ou seja, pode-se considerar que $t \gg \tau$, tornando assim o termo $e^{-\frac{t}{\tau}} \approx 0$, então vale dizer que $I_{max} = \frac{V_c \cdot k_a}{R}$.

Portanto a corrente média pode ser determinada pela equação 3.10:

$$I_{LM} = \frac{V_M \times k_a}{R} \quad (3.10)$$

Calculando pelos parâmetros do sistema experimental, tem-se:

$$I_{LM} = V_M \times 4 \text{ [A]} \quad (3.11)$$

Bloco 2: Cálculo da constante k_Z

A constante conversora k_Z de corrente (I_{LM}) em tensão de posição (V'_Z), pode ser determinada pela equação 3.12.

$$k_Z = k_s \cdot k_t \cdot \frac{1}{k_h} \quad [\text{VA}^{-1}] \quad (3.12)$$

Portanto, para o sistema de desenvolvimento tem-se:

$$k_Z = -0,44 \text{ VA}^{-1}$$

Bloco Integrador: Determina V_{ZR} (s)

Este bloco é o elemento fundamental do ZPC, onde a tensão de posição (V'_Z) é acumulada em cada amostragem produzindo a tensão de posição (V_{ZR}) que ao ser adicionada à tensão da posição de referência (V_{ref}) determina a posição de potência nula.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

As simulações foram realizadas em caráter comprobatório do conceito não entrando no mérito de avaliação de estabilidade que dispensaria muito tempo sendo que ainda não existe uma definição final do protótipo.

4.1.1 SIMULAÇÃO DO AMB EXPERIMENTAL SEM ZPC

Esta seção apresenta a simulação do modelo de AMB experimental sem a função ZPC para servir de base de avaliação do sistema de controle.

A figura 4-1 apresenta o diagrama do sistema de controle experimental baseado no modelo de Silva [2] com alterações apenas nos parâmetros físicos devidos as diferenças físicas dos mancais.

Figura 4-1: Diagrama de blocos do controle do mancal experimental

A figura 4-2 apresenta a resposta simulada do sistema de controle para um degrau no sinal de posição de referência de 0,4 mm. Onde se pode observar que o tempo de estabilização é menor que 50 ms, indicando que o controle responderá com o dobro da frequência natural típica do rotor do DAV.

O resíduo na posição é devido a minimização da ação integrativa, caracterizando assim o controle como PD.

Figura 4-2: Resposta ao degrau (simulação)

A figura 4-3 apresenta o resultado da simulação do sistema de controle para um degrau na força de distúrbio de 1 Newton, onde se obteve um tempo de estabilização de aproximadamente de 75 ms.

Figura 4-3: Resposta ao degrau no distúrbio (simulação)

4.1.2 SIMULAÇÃO DO AMB EXPERIMENTAL COM ZPC

A figura 4-4 apresenta o diagrama do sistema de controle do AMB experimental incluindo a função ZPC. O bloco $G_i(s)$ da fig. 3-7 é responsável pelo cálculo da corrente, e na simulação foi utilizada a equação 3.7 como função de transferência (figura 4.4 ampliada no anexo A).

Figura 4-4: Diagrama de blocos do controle do mancal experimental com ZPC

A figura 4-5 apresenta o resultado da simulação do sistema de controle para um degrau na força de distúrbio de um Newton, donde se observa que a posição de referência variou e a força eletromagnética decaiu na mesma proporção, demonstrando assim a característica do ZPC em funcionamento. Porém, o tempo de estabilização foi maior que 1,5 s indicando uma baixa velocidade de resposta e que os parâmetros utilizados no modelo da função de transferência do bloco ZPC ou do controle devem ser revisados. A velocidade de resposta do ZPC seria coerente se o tempo fosse próximo de 200 ms, isto, baseando-se nos resultados experimentais.

Os resultados da simulação com ZPC se mostraram iguais com a utilização das equações 3.7 e 3.11 como função de transferência do bloco ($G_i(s)$) que calcula $I(s)$. O resultado ficaria mais próximo ao experimental se o valor de k_z estivesse entorno de $4,0 \text{ V.A}^{-1}$ ao invés de $0,44 \text{ V.A}^{-1}$ como calculado.

Figura 4-5: Resposta ao degrau no distúrbio com ZPC (simulação)

4.1.3 *AMB DE SILVA COM ZPC DE MIZUNO*

Esta seção apresenta uma simulação de verificação do desempenho do algoritmo de Mizuno [25] para ZPC adaptado aos parâmetros do mancal EPUSP. Nesta abordagem, as funções do ZPC e do controle são unificadas.

Figura 4-6: Modelo controle do mancal EPUSP com algoritmo ZPC de Mizuno [25]

A figura 4-7 apresenta a resposta da simulação para um distúrbio em degrau de 2,5 N, donde se observa que o tempo de estabilização é de aproximadamente de 100 ms, e após esse período o sinal de controle (UC) permanece como valor zero caracterizando o funcionamento do ZPC.

Figura 4-7: Resposta ao distúrbio degrau

4.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A figura 4-8 apresenta o esquema do sistema utilizado para aplicar esforços axiais sobre o rotor. O garfo é uma alavanca formada por uma barra de material plástico (ABS) apoiada num ponto apenas como também se pode observar na figura 4-9.

A aplicação da carga em degrau foi realizada manualmente atuando sobre o garfo na ponta oposta ao rotor.

Figura 4-8: Sistema manual de aplicação de carga em degrau

A aquisição foi através do osciloscópio com disparo manual e a aplicação do degrau também. O procedimento da aplicação da carga em degrau foi de forma que a carga fosse liberada a partir do contato estabelecido do garfo com o rotor.

Para a aquisição do sinal da corrente foi utilizado um resistor “shunt” no circuito de alimentação do atuador.

Figura 4-9: Foto do AMB carregado

O sinal da figura 4-10 apresenta o comportamento da corrente em função do distúrbio em degrau aplicado sem o controle ZPC. Onde se pode notar o degrau de corrente que se estabeleceu em regime com um pequeno deslocamento da posição. Sendo que o controle de posição estava operando sob controle PD.

Figura 4-10: Resposta ao degrau do sistema experimental com controle PD (ZPC desativado)

Figura 4-11: Resposta ao degrau do sistema experimental com ZPC ativado e controle PD

O sinal da figura 4-11 apresenta o comportamento da corrente do atuador em resposta ao distúrbio em degrau aplicado com o controle ZPC ativo. Onde se pode notar a reação temporária de corrente, mas em seguida convergindo para zero, e a posição do rotor se alterando em regime. O tempo apresentado para atingir o regime foi de 200 ms indicando que para distúrbios com pulsação abaixo de 5 HZ o ZPC apresentará economia energética.

4.3 DISCUSSÕES

4.3.1 *ESTIMATIVA DAS POTÊNCIAS ENVOLVIDAS*

Segundo Paden [21] apresenta em seu trabalho, seu mancal consumiu 1,5 W sofrendo um esforço axial médio de 4 N com pulsação de aproximadamente 1 ciclo por segundo, frequência essa próxima a pulsação cardíaca. Mas ele não informa os valores das constantes do sistema magnético de seu mancal.

Fazendo uma rápida avaliação comparativa, se o esforço que ele cita for aplicado ao mancal experimental controlado apenas com a estratégia PD, chega-se ao seguinte resultado:

A corrente do atuador para tal esforço pode ser determinada pela equação 4.1 que é baseada na constante eletromagnética (k_t) do mancal.

$$I_L = \frac{f}{k_t} \quad (4.1)$$

Resultando que $I_L = 4/0,49$, então $I_L = 8,16$ A.

Considerando a corrente em regime, apenas a componente resistiva limita a corrente e dissipa a potência do atuador, então pode-se obter a potência através da equação 4.2.

$$P = R \cdot I_L^2 \quad (4.2)$$

Resultando que $P = 2,5 \cdot (8.16)^2$, então $P = 166,4 \text{ W}$

Deve-se observar que a potência determinada estabelece a impossibilidade de utilização intra-corpórea do dispositivo nesse regime, pois essa potência é suficiente para danificar os tecidos do paciente.

Também ficou evidente que a constante k_t ([N/A]) é um significativo fator de eficiência do atuador, pois influencia diretamente na corrente de trabalho.

4.3.2 DO CÓDIGO FONTE

A rotina do ZPC foi desenvolvida sobre código fonte do programa de controle do mancal EPUSP que já estava estabelecida com a estratégia de controle PID. O programa básico do mancal foi desenvolvido em Pascal e permite que os parâmetros do controlador PID sejam configuráveis. O código fonte completo está no anexo A.

Para a implementação da rotina do ZPC foi necessário alterar as funções “entrada_zero” (Anexo A- pag. 75) e o “programa Principal” (pag. 78), e também incluir a função “ZPC” (pag. 78) ao código.

Para a inicialização (startup) do sistema de controle do mancal experimental é necessário estabelecer como premissas os seguintes passos: 1- iniciar o controle no modo PID; 2- ajustar o offset do condicionador do sensor de posição observando a mínima corrente dos atuadores (este procedimento colocará o rotor na posição de equilíbrio com tensão de 0 Volts na saída do condicionador); 3- ativar o ZPC através do teclado (neste passo, a corrente deverá se manter minimizada), a partir deste passo pode-se aplicar carga sobre o rotor e observar o comportamento da corrente.

Para se definir os limites de controle para o algoritmo do ZPC, ou seja, o “anti-windup” pode-se utilizar as curvas características (fig.3-20) do atuador onde se obtém os limites de controle. Determinado o valor mínimo e máximo do deslocamento, determinam-se as respectivas tensões relativas às posições através da curva de resposta do sensor de posição. Para um controle discreto, pode-se implementar a função anti-windup utilizando uma rotina de decisão por exemplo:

IF $V_{ZR} \geq V_{Z(\text{máx})}$ then $V_{ZR} = V_{Z(\text{máx})}$;

IF $V_{ZR} \leq V_{Z(\text{mín})}$ then $V_{ZR} = V_{Z(\text{mín})}$;

A figura 4-12 apresenta o diagrama de blocos do ZPC do algoritmo experimental incluindo-se o bloco “anti-windup”.

Figura 4-12: Diagrama de blocos do algoritmo do ZPC utilizado no experimento

5 CONCLUSÕES

Conforme observado na revisão bibliográfica, já existem diversos trabalhos do tema “ZPC”. Especificamente na aplicação de interesse deste, o pesquisador Paden apresentou dados fundamentais para destacar a importância da técnica ZPC, porém das publicações encontradas não foi possível obter dados suficientes que quantifique precisamente a eficiência desta estratégia na aplicação em DAV.

No item 4.3 deste trabalho é feito um comparativo relacionando a potência necessária para a levitação do mancal experimental com controle PD e o valor apresentado por Paden utilizando o ZPC em seu mancal. Para fazer tal comparação foram utilizados os parâmetros de esforços que ele publicou como típicos da aplicação em DAV. Os resultados dos cálculos indicam ser impossível implantar o “DAV” num paciente mediante os valores das potências envolvidas, a não ser utilizando o ZPC.

A estratégia adotada neste trabalho foi a mesma que Paden utilizou, e também é avaliada por Mizuno como eficiente, sendo que o fato de dispensar o sinal de realimentação física do sinal da corrente do atuador muito interessante para a simplicidade do circuito elétrico. E também, pela simplicidade do algoritmo de controle, é possível estabelecer o controle em dispositivos microcontroladores de baixa capacidade.

Será possível avaliar e quantificar a economia de energia que a técnica ZPC proporcionará no mancal do DAV quando o protótipo e o modelo dos esforços estiverem definidos.

Os resultados da simulação do sistema de ZPC do mancal experimental mostrou que as equações 3.9 e 3.11 da função de transferência $G_i(s)$ são equivalentes comprovando o princípio fundamental apresentado no subitem 3,3,1-a. Apesar da simulação demonstrar o comportamento do ZPC, ela apresentou uma diferença em relação aos resultados experimentais no tempo de resposta, sendo que experimentalmente foi verificado 200 ms e na simulação quase 2 s. Pode-se justificar a boa resposta do sistema experimental pelo fator que a constante K_v utilizada no código foi sintonizada manualmente, sendo esta responsável pela conversão total da corrente em tensão de posição do bloco ZPC.

Apesar dos resultados da simulação demonstrar o comportamento do ZPC, o tempo de estabilização foi muito grande, indicando que o sistema só responde em baixa frequência. Como foi comentado no subitem 4.1.2, se o valor da constante k_z fosse próximo de 4,0 o comportamento da simulação seria igual ao experimental. Uma possível origem da diferença seja devido algum erro na definição ou no cálculo da constante k_z .

Foi experimentado desativar o filtro do bloco (1) do algoritmo do ZPC, onde se calcula a tensão média para se determinar a corrente, e o sistema continuou funcionando corretamente. Como previsto conceitualmente, devido a alta taxa de amostragem a média aritmética como filtro passa baixa apresentaria uma ação inócua.

Em resumo, o algoritmo do “ZPC” demonstrou o princípio da potência nula tanto teoricamente quanto experimentalmente. Conceitualmente é possível concluir que o ZPC será mais eficiente se quando aplicado em sistemas onde o distúrbios tenham frequência menor que a frequência natural do conjunto atuador-rotor.

Também foi observado que é essencial a utilização da função de transferência “anti-windup” no algoritmo do ZPC, detalhe comentado no subitem 3.2.3.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como prosseguimento é interessante pesquisar os seguintes temas correlatos:

- Estudo de avaliação do ZPC para distúrbios quase periódicos [5]
- O “self sensing” ou auto sensor, que é a técnica utilizada para dispensar a utilização do sensor de posição. A determinação da posição é feita utilizando-se a própria bobina do atuador como sensor [34][35].
- O acionamento dos atuadores funcionando em PWM proporcionando economia ainda maior de energia na suspensão [31][32][33].
- A aplicação do ZPC em isolações de vibrações, aonde os resultados vêm se apresentando promissores. Já existem diversos trabalhos desse tema e o pesquisador Mizuno [30] é uma referência.
- Estudo de avaliação do ZPC para distúrbios quase periódicos [5]
- Estudos da controlabilidade com uso de PWM e “self-sensing” [36][37][38].

6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] SILVA, I. AND HORIKAWA, O.. **“An 1-DOF Controlled Attraction Type Magnetic Bearing”**, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol.36 (4), 1138, 2000.
- [2] SILVA, ISAIAS.**Mancais magnéticos híbridos do tipo atração com controle iniaxial.**- ed. rev.- 2005. 162 p. Tese (doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo,2005.
- [3] IDPC. **Instituto Dante Pazzanetze de Cardiologia**. Fundação Adib Jatene. Disponível em <<http://www.dantepazzanese.org.br/index.html>>. Acesso em 10 de março de 2010.
- [4] MARINHO, A.. **Um estudo sobre as filas para transplantes no Sistema Único de Saúde brasileiro**. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Ciências Econômicas, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 13p, 2006. Disponível em <<http://www.scielo.br/pdf/csp/v22n10/22.pdf>>. Acesso em 9 de março de 2010.
- [5] GENTILI, L.; MARCONI, L.; PADEN, B. Disturbance Rejection in the Control of a Maglev Artificial heart. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, v. 130, p. 1-10, 2008.
- [6] HORIKAWA, O.; ANDRADE, A.J.P; SILVA, I.; AND BOCK, E.G.P.. **Magnetic Suspension of the Rotor of a Ventricular Assist Device of Mixed Flow Type**. Artificial Organs, Vol.32(4), 334-341p, 2008.
- [7] CARDOSO, J.. **Sistemas propulsores eletromagnéticos implantáveis para dispositivos de assistência circulatória sanguínea uni e biventricular ou coração artificial**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2º Relatório Anual (Dez./2009) - Fapesp - Projeto Temático nº 2006/58773-1, 1-143p, 2009.
- [8] Earnshaw, Samuel. **"On the Nature of the Molecular Forces which Regulate the Constitution of the Luminiferous Ether"**. Trans. Camb. Phil. Soc. 7: 97–112, 1842.
- [9] WIKEPEDIA. **Superconductivity**. Fundação Adib Jatene. Disponível em <<http://en.wikipedia.org/wiki/Superconductivity>>. Acesso em 14 de setembro de 2010.
- [10] Youn H. Kim, Kwang M. Kim, Ju. Lee, “Zero Power Control with Load Observer in Controlled-PM Levitation”, Trans. IEEE Korea, Vol. 37, No.4, 2001
- [11] Campbell, P., “Permanent Magnet Materials and Their Application”, Vol.I, Cambridge University Press, 191, 1994.

- [12] “1º Encontro sobre sistemas propulsores eletromagnéticos implantáveis para Dispositivos de Assistência circulatória sanguínea uni e biventricular ou Coração Artificial- Projeto Temático FAPESP”, 2010, São Paulo, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica da USP.
- [13] HORIKAWA, O.; ANDRADE, A.J.P; SILVA, I.; AND BOCK, E.G.P.. **Magnetic Suspension of the Rotor of a Ventricular Assist Device of Mixed Flow Type**. Artificial Organs, Vol.32(4), 334-341p, 2008.
- [14] Bock, E.; Ribeiro, A.; Silva, M.; Antunes, P.; Fonseca, J.; Legendre, D.; Leme, J.; Arruda, C.; Biscegli, J.; Nicolosi, D.; e Andrade, A.. **New Centrifugal Blood Pump With Dual Impeller and Double Pivot Bearing System: Wear Evaluation in Bearing System, Performance Tests, and Preliminary Hemolysis Tests**. Artificial Organs, Vol.32 (4), 329-333p, 2008.
- [15] TSOTRAS, P.; WILSON, B.C. **Zero- and Low-Bias Control Designs for Active Magnetic Bearings**. IEEE Transactions on Control Systems Technology, v. 11, n. 6, p. 889-904, nov. 2003.
- [16] YIN, L.; ZHAO, L. **Nonlinear control for a large air-gap magnetic bearing system**. Transactions, SMiRT 19, Toronto, August 2007.
- [17] MORISHITA, et al. **Transportation System of a Floated-Carrier Type**. US Patent 4,811,667. 14 mar 1989
- [18] MOTEE, N. et al. **Active Magnetic Bearing Control with Zero Steady-State Power Loss**. Proceedings of the American Control Conference, Anchorage AK, p. 827-832, 2002
- [19] QUEIROZ, M.S.; PRADHANANGA, S. **Control of Magnetic Levitation Systems with Reduced Steady-State Power Losses**. IEEE Transactions On Control Systems Technology, v. 15 ,n. 6, p 1096-1102, november 2007.
- [20] LYMAN, J. **Virtually Zero Powered Magnetic Suspension**. US Patent 3,860,300. Jan 1975.
- [21] PADEN, BRAD. **The Streamliner Artificial Heart**. XIV Brazilian Automatic Control Conference, Natal, Brazil, sept 2002.
- [22] SIMPSON P. A. **Virtually Zero Power Linear Magnétic Bearing**. US Patent 3,937,148. Fev 1976.
- [23] Morishita M, Azukizawa T. **Zero power control method for electromagnetic levitation system**. Trans IEE Japan 1988;108-D:447–454.
- [24] Morishita M, et al. “A new maglev system for magnetically levitated carrier system”. IEEE Trans Veh Technol; 1989;38:230–236.

- [25] MIZUNO, T.; TAKEMORI, Y. **A Transfer-Function Approach to the Analysis and Design of Zero-Power Controllers for Magnetic Suspension Systems**. Electrical Engineering in Japan, v. 141,n. 2, pp. 933–940, 2002.
- [26] Henrikson CH, Lyman J, Studer PA. **“Magnetically suspended momentum wheels for spacecraft stabilization”**. AIAA paper 74-128, 1974.
- [27] POUBEAU P, Baudry JP, Robinson A. “Satellite momentum and reaction wheels with magnetic bearings”. Proc AOCS, p 375–379, 1977.
- [28] SABNIS, AV, Dendy JB, Schmitt FM. **“A magnetically suspended large momentum wheel”**. J Spacecraft 1975;12:420–427.
- [29] YAKUSHI, K. Koseki T, Sone S. 3 degree-of-freedom zero power magnetic levitation control by a 4-pole type electromagnet. Proc Int Power Electronics Conference IPEC-Tokyo 2000, p 2136–2141.
- [30] MIZUNO, T. Vibration isolation system using zero-power magnetic suspension (1st report: Proposal of new concepts). Proc 39th SICE Annual Conference, 304C-5, 2000.
- [31] HIROTAKA Tomono, Hisakatsu Kiwaki. “Controllability Improvement of Zero-Power Magnetically Levitated System by Dither” IEEE 1998-pg 588.
- [32] HIROTAKA, Tomono. Koji Kawano, and Hisakatsu Kiwaki: **“Application of Dither to Zero Power Control for Electromagnetic Levitation System”**, National Convention Record I.E.E. Japan, 1216, 5, pp. 208-209, 1997
- [33] ISAO, Takahashi. **“Dither Application to Power Electronics”**, National Convention Record I.E.E. Japan, 790, 4, pp. 176-177. 1995.
- [34] MIZUNO, T. Bleuler H. **“Self-sensing magnetic bearing control system design using the geometric approach”**. Control Eng Pract 1995;3:925–932.
- [35] SIVADASAN, KK. **Analysis of self-sensing active magnetic bearings working on inductance measurement principle**. IEEE Trans Magn 1996;32:329–334.
- [36] YUKI, Kato. Toshiya Yoshida, and Katsumi Ohniwa. **“Self-Sensing Active Magnetic Bearings with Zero-Bias-Current Control”** Electrical Engineering in Japan, Vol. 165, No. 2, 2008.
- [37] VISCHER, D. Bleuler H. **“Self-sensing active magnetic levitation”**. IEEE Trans Magn 1993;29:1276–1281

- [38] YOSHIDA, T. et al . **Self-sensing active magnetic bearings using a new PWM amplifier equipped with a bias voltage source.** EPEJ2005;15:19–24.
- [39] ANDRADE, A.; BISCEGLI, J.; DINKHUYSEN, J.; SOUSA, J.E.; OHASHI, Y.; HEMMINGS, S.; GLUECK, J., KAWAHITO, K.; AND NOSE, Y.. **Characteristics of a Blood Pump Combining the Centrifugal and Axial Pumping Principles: The Spiral Pump.** Artificial Organs, Vol.20 (6), 605-612p, 1996.

7 GLOSSÁRIO

Anti-windup: é uma função de transferência que limita os valores da saída a fim de evitar a saturação do controle quando a planta atingir regiões não lineares.

Diamagnetismo: é um fenômeno quântico presente na supercondutividade, que proporciona uma levitação estável por repulsão magnética, que é gerada pela aproximação do ímã a um supercondutor onde aparecem correntes superficiais induzidas, as quais, segundo a lei de Lenz, produzem um campo magnético de sentido contrário ao do ímã repelindo-o, e assim mantendo o equilíbrio na levitação.

Hemólise: (hemo = sangue; lise = quebra) é o rompimento de uma hemácia que libera a hemoglobina no plasma, causando a anemia hemolítica que pode ameaçar a vida do paciente.

Shunt: é um método de medição de corrente num circuito através da inserção de um resistor de valor conhecido ligado em série com a carga.

Startup: é inicialização de um processo

Trombose: é a formação de um trombo (coágulo de sangue) no interior de um vaso sanguíneo, reduzindo ou obstruindo o fluxo sanguíneo.

VAD: o “Ventricular Assist Device”, ou DAV, é um dispositivo mecânico que é utilizado para substituir total ou parcialmente uma função de um coração doente. Alguns dispositivos são utilizados por curtos períodos de tempo, enquanto o paciente se recupera de um ataque cardíaco, cirurgia; enquanto outros são utilizados por longos períodos (de meses a anos).

ANEXO A- O código fonte do controle com ZPC

```

{*****}

{*Programa para a levitacao do prototipo*}
{*do DAV-IDPC com mancal magnetico*}
{*****}

{*****}
{*Autores: Ana Eun Mi Lee e Carlos Augusto Ferreira Fernandes*}
{*Orientador: Prof.Dr.Oswaldo Horikawa*}
{*Sao Paulo 2006 EPUSP*}
{*****}

{*****}
{*Utilizando a placa A-826PG*}
{*****}

{$N+}
{*Cabecalho do programa*}
program mancal_rot_novo_1;

{*Bibliotecas utilizadas pelo programa*}

Uses crt, dos, graph, grdrivers, grfonts;

{*Variaveis globais*}

var
leitura_digital: array [0..256*5]of real;
canal: array [0..256*5]of real;
tensao_de_referencia, saida_filtro, ZR: real;
erro_ant1, erro_ant2: real;
erro, tensao_equilibrio_1, ka: real;
i, n_c: longint;
h, m, u, f: longint;

```

```

real;
    cn0_ant1, cn0_ant2, cn0_ant3, e_ant1, e_ant2, e_ant3, saida_controlador:
    proporcional, derivada, integral, saida_1, saida_ant: double;
    p, p_c, K, A, R, IZ, ILM, MD, KV, FZ, dn, dnant: real;
    conversao_1, lsb, msb: longint;
    sinal_sensor, sinal_out: array[1..(256)*10] of real;
    arq_sensor, arq_saida: text;
    Kd, Kp, Ki: real;
    saida_tela: double;
    cont_espera: longint;
    tecla_preSSIONada: char;
    sair, fim: longint;
    liga_z: boolean;

const
    base = $220;          {endereço base da placa 220h}
    clock_placa = 2e6;

{*****}

{Arquivos de rotinas}

{$I janela_1}
{$I ini_gr_1}

{*****}

procedure janela_principal_dav;
var
    cor:shortint;

begin
    clearviewport;
    setfillstyle(solidfill,white);
    Bar(0, 0,GetMaxX,GetMaxY);
    cor:=blue;

```

```

setfillstyle(solidfill,cor);
Bar(0, 0,GetMaxX,GetMaxY div 6);
setcolor(12);
settextstyle(defaultfont,horizdir,2);
settextjustify(Lefttext,lefttext);
outtextxy(5,45,'** PROJETO MANCAL MAGNETICO DAV-IDPC **');
cor:=cyan;
setfillstyle(solidfill,cor);
Bar(25,(GetMaxY div 6)+10,400,(GetMaxY div 4)+80);
setcolor(14);
settextstyle(defaultfont,horizdir,0);
settextjustify(Lefttext,lefttext);
outtextxy(35,110,'Programa para a levitacao do prototipo');
outtextxy(35,130,'do DAV-IDPC com mancal magnetico');
outtextxy(35,150,'Autores: Ana Eun Mi Lee');
outtextxy(35,170,'      Carlos Augusto Ferreira Fernandes');
outtextxy(35,190,'Orientador: Prof.Dr.Oswaldo Horikawa');
{-----}
setfillstyle(solidfill,cor);
Bar(0, GetMaxY - GetMaxY div 6,GetMaxX,GetMaxY);
setcolor(12);
settextstyle(defaultfont,horizdir,2);
settextjustify(Lefttext,lefttext);
outtextxy(5,(GetMaxY - ((GetMaxY - GetMaxY div 6) div 12)),
'***** EPUSP *****');
{-----}
cor:=white;
setfillstyle(XHatchFill,cor);
Bar(0,0,20,GetMaxY);
setcolor(14);
settextstyle(defaultfont,horizdir,0);
settextjustify(Lefttext,lefttext);
{-----}
cor:=white;
setfillstyle(XHatchFill,cor);
Bar(getmaxX-20,0,getmaxX,GetMaxY);

```



```

setcolor(14);
settextstyle(defaultfont,horizdir,0);
settextjustify(Lefttext,lefttext);
readln;
end;

```

```

{*****}

```

```

procedure dados_entrada;
begin
  Textbackground(lightcyan);
  clrscr;
  window(1, 1, 80, 43);
  textcolor(yellow);
  gotoxy(5,5);write('Entre com a frequencia de amostragem em Hz');
  gotoxy(5,6);write('Valores recomendados entre 200 e 300 Hz ');
  gotoxy(5,7);write('f = ');
  read(f);

```

```

  p := 1/f;      {periodo de amostragem em seg}
  textcolor(magenta);
  n_c := 1;      {numero de canais lidos}
  textcolor(red);
  gotoxy(5,11);write('Entre com os ganhos do controlador Kp Kd');
  gotoxy(5,12);write('Valores recomendados Kp = 10 e Kd = 1.6');
  gotoxy(5,13);write('Kp = ');
  read(Kp);
  gotoxy(5,15);write('Ki = ');
  read(Ki);
  {Ki := 0;}
  gotoxy(5,17);write('Kd = ');
  read(Kd);
  textcolor(white);
end;

```

```

{*****}

```

```

procedure seta_placa;
begin
    Port[base+11] := 6; {Selecionando o tipo de disparo - trigger interno - polling}
    Port[base+9] := 0; {Selecionando o ganho 1 (faixa de leitura de 0 a 10V)}
    Port[base+3] := $76; {programando o pacer trigger, ou seja, o contador
1 e 2 cascadeados}
    K := (clock_placa)/(n_c*f); {Onde f , a frequencia de amostragem de cada
canal}

    A := 12; {inteiro qualquer importante e que A<R}
    R := K/A;
    Port[base+1] := round(R); {le byte menos significativo}
    Port[base+1] := 0; {le byte mais significativo}

    Port[base+3] := $B6; {selecionando modo de controle do temporizador}

    {escrevendo o valor no contador 0 que dividir a frequencia do clock por ele}

    Port[base+2] := round(A); {byte menos significativo}
    Port[base+2] := 0; {byte mais significativo}

end;

{*****}

procedure inicializa_variaveis;
begin
    tensao_de_referencia := 0;
    ZR := 0;
    i := 1;
    h := 1;
    erro_ant1 := 0;
    erro_ant2 := 0;
    e_ant1 := 0;
    e_ant2 := 0;

```

```

e_ant3:=0;
cn0_ant1:=0;
cn0_ant2:=0;
cn0_ant3:=0;
saida_ant:=0;
MD:= 0;
ILM:= 0;
IZ:=0;
FZ:= 0;
dn:= 0;
dnant:=0;
KV:= 0.003;
liga_z:=false;
end;

```

```

{*****}

```

```

procedure le_canais;
begin
    Port[base+10] := 0;           {leitura dos canais}
    repeat until (Port[base+8] and $10) <> 0; {espera completar o periodo de
amostragem}
    repeat until (Port[base+8] and $10) = 0;   {espera terminar a conversao do
sinal lido}
    leitura_digital[0] := Port[base+5]*256 + Port[base+4]; {converte o sinal digital
para um valor decimal}
    {if ((leitura_digital[0] >= $8000) and (leitura_digital[0] <= $ffff))}
    {then leitura_digital[0] := 65535 - leitura_digital[0];}
    leitura_digital[0] :=leitura_digital[0];
    canal[0] := (leitura_digital[0] * 10)/32768;
    canal[0] := canal[0]-2.5;
    {canal[0] := 2.0 + (leitura_digital[0] * 10)/32768;}
end;

```

```

{*****}

```

```

procedure Filtro_digital;
begin
    saida_filtro := 0.6*canal[0] + 0.4*cn0_ant1 + 0*cn0_ant2 + 0*cn0_ant3;
    {cn0_ant3 := cn0_ant2;}
    {cn0_ant2 := cn0_ant1;}
    cn0_ant1 := saida_filtro; {canal[0];}
end;

```

```

{*****}

```

```

procedure entrada_zero;
begin
    {Utilizando referencia interna}
    {tensao_de_referencia := 0;}
    erro := (tensao_de_referencia - saida_filtro);
    erro := erro + ZR;{define a nova posicao }
end;

```

```

{*****}

```

```

procedure periodo_controle;
begin
    p_c := p/n_c;
end;

```

```

{*****}

```

```

procedure pid;
begin
    derivada := (Kd*(erro + 3*e_ant1 - 3*e_ant2 - e_ant3))/p_c/6;
    integral := (Ki/2)*(erro + erro_ant1)*p_c + erro_ant2;
    proporcional := Kp*erro;

    {atualizacao de variaveis}
    e_ant3 := e_ant2;
    e_ant2 := e_ant1;

```

```

e_ant1 := erro;

erro_ant1 := erro;
erro_ant2 := integral;

saida_controlador := derivada + proporcional + integral;
end;

{*****}

procedure saida;
begin
equilibrio }   tensao_equilibrio_1 := 10; {volts Resistencia da bobina*corrente de
                ka := 10;           {Volts ganho do amplificador}

                {saida_1 := ((tensao_equilibrio_1/ka)+saida_controlador);}
                saida_1 := saida_controlador;
                saida_1:= saida_1 + 0.05;{ correcao do conversor}
                {Limitacao da placa do conversor D/A}

                if saida_1 > 5 then
                    saida_1 := 5;
                if saida_1 < -5 then
                    saida_1 := -5;

                saida_tela := saida_1;

                conversao_1 := round((saida_1+5)*409.5);
                lsb := conversao_1 mod 256;
                port[base+4] := lsb;
                msb := (conversao_1 div 256);
                port[base+5] := msb;
end;

{*****}

```

```

procedure gera_vetores;
begin
  if (h >= f*30) and (h <= (f*30 + 256*10)) then {inicia a amostragem apos 30
segundos}
  begin
    gotoxy(10,5);write('Inicio de leitura');
    if m <= (256)*10 then
    begin
      sinal_sensor[m] := (canal[0]);
      sinal_out[m] := (saida_tela);
      m := 1 + m;
    end;
  end;
  h := h + 1;
  if h > (256*10+f*30) then
    h := f*30;
end;

```

```

{*****}

```

```

procedure gera_arquivos;
begin
  assign(arq_sensor, 'c:\sinais\sensor.out');
  rewrite(arq_sensor);
  for u := 1 to (256)*10 do
    writeln(arq_sensor, sinal_sensor[u]:5:3);

  assign(arq_saida, 'c:\sinais\saida.out');
  rewrite(arq_saida);
  for u := 1 to (256)*10 do
    writeln(arq_saida, sinal_out[u]:5:3);

  close(arq_sensor);
  close(arq_saida);
end;

```

```
{*****}
```

```
procedure ZPC;
```

```
begin
```

```
    ILM:= (saida_controlador + saida_ant)/2;
```

```
    IZ:= ILM*Kv; { converte diretamente (Kv = 0.003)}
```

```
    ZR:= ZR + IZ; {acao integrativa do ZPC}
```

```
    {anti-windup}
```

```
    if abs(ZR) > 0.7 then {valor limite 0,7 V}
```

```
        ZR:= ZR - IZ; {posicao corrigida ZPC}
```

```
    saida_ant:= saida_controlador;
```

```
end;
```

```
{*****}
```

```
{Programa principal}
```

```
begin
```

```
    inicia_modos_graf;
```

```
    {inicio;}
```

```
    {janela_principal_dav;}
```

```
    fecha_grafico;
```

```
    modo_texto;
```

```
    repeat
```

```
        liga_z:= false;
```

```
        dados_entrada;
```

```
        seta_placa;
```

```
        inicializa_variaveis;
```

```
        periodo_controle;
```

```
        clrscr;
```

```
        gotoxy(10, 7);write('frequencia de amostragem: ', f, ' Hz');
```

```
        gotoxy(10, 9);write('Kp = ', Kp:8:3);
```

```
        gotoxy(10, 11);write('Kd = ', Kd:8:3);
```

```
        gotoxy(10, 19);write('Pressione N para novos parametros');
```

```
        gotoxy(10, 20);write('Pressione E para finalizar');
```

Desligado'); gotoxy(10, 21);write('Pressione Z para ativar/Desativar o ZPC :

```
{tensao_de_referencia:= 4.100; {valor inicial de referencia}
repeat      {para 300Hz este loop gasta 18 us e 260us de periodo}
  sair := 0; {para 200Hz o periodo de 390us = 2546Hz(real)}
  fim := 0;
  le_canais;
  filtro_digital;
  entrada_zero;
  pid;
  saida;
  if (liga_z=true) then
    begin
      ZPC;
    end;
  {gera_vetores;}
  gotoxy(10, 13);write('entrada: ', canal[0]:8:3, ' V');
  gotoxy(10, 14);write('saida: ', Abs(saida_tela):8:3, ' V');
```

Teclas (+) e (-)); gotoxy(10, 15);write('referencia: ', tensao_de_referencia:8:3, ' V - Use

```
if (keypressed) then
  begin
    tecla_pressionada := Readkey;
    if (tecla_pressionada = 'n') then
      begin
        break;
      end;
    if (tecla_pressionada = 'e') then
      begin
        sair := 1;
        fim := 1;
      end;
    if (tecla_pressionada = '+') then
      begin
        tensao_de_referencia:= tensao_de_referencia+0.001;
```



```
        end;
    if (tecla_preSSIONada = '-') then
        begin
            tensao_de_referencia:= tensao_de_referencia-0.001;
        end;
    if (tecla_preSSIONada = 'z') then
        begin
            if (liga_z=false) then
                begin
                    liga_Z:=true;
                    gotoxy(52, 21);Write('ATIVO  ');
                end
            else begin
                liga_z:=false;
                gotoxy(52, 21);write('Desligado');
            end;
        end;
    end;
    until sair = 1;
    until fim = 1;
    gera_arquivos;
end. {fim do programa}
```