PEDRO IVO TEIXEIRA DE CARVALHO ANTUNES

**MEDIÇÃO DE POSIÇÃO DE ROTOR EM MANCAL MAGNÉTICO
ATRAVÉS DE SENSOR HALL**

São Paulo

2012

PEDRO IVO TEIXEIRA DE CARVALHO ANTUNES

**MEDIÇÃO DE POSIÇÃO DE ROTOR EM MANCAL MAGNÉTICO
ATRAVÉS DE SENSOR HALL**

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

São Paulo

2012

PEDRO IVO TEIXEIRA DE CARVALHO ANTUNES

**MEDIÇÃO DE POSIÇÃO DE ROTOR EM MANCAL MAGNÉTICO
ATRAVÉS DE SENSOR HALL**

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

Área de concentração: Engenharia
Mecatrônica

Orientador: Prof. Dr. Oswaldo
Horikawa

São Paulo

2012

FICHA CATALOGRÁFICA

Antunes, Pedro Ivo Teixeira de Carvalho

**Medição de posição de rotor em mancal magnético através
de sensor hall / P.I.T.C. Antunes. -- São Paulo, 2012.
65 p.**

**Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de
Sistemas Mecânicos.**

**1. Mancais 2. Sensores eletrônicos 3. Medição mecânica
I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento
de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II. t.**

À família que tenho, que não é
regulada por um DNA, mas sim
por sentimentos.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Oswaldo Horikawa, meu orientador, pelo apoio inefável, que só poderá ser expresso pela minha eterna gratidão.

Aos professores André Riyuti Hirakawa e Tiago de Castro Martins, pelas valiosas contribuições.

Aos companheiros do Instituto Dante Pazzanesi de Cardiologia, Prof. Dr. Aron Andrade, pessoa muito importante em minha vida e, igualmente aos demais amigos e colegas que colhi nessa instituição, dentro os quais, Jeison, Bea, Ju, Cy, Bruno, Isaias, Eduardinho. Assim como os companheiros da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Vitor (vitão) Finotto, Rogério (poneis) Yamamoto, Victor (vetor) Sverzuti, Fernando Camargo e Orlando de Mello.

Ao meu "irmão", Prof. Dr. Eduardo Bock, por toda a motivação, apesar de minha teimosia

A toda minha família, pelo carinho e estímulo.

“A melhor definição que posso
dar de um homem é a de um ser
que se habitua a tudo.”

(Fiodor Dostoievsk)

RESUMO

A Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP, Brasil) e o Instituto Dante Pazzanese de Cardiologia (IDPC, Brasil) estão desenvolvendo conjuntamente um Dispositivo de Assistência Ventricular (DAV) baseado numa bomba de vazão mista e utilizando mancais magnéticos que objetivem substituir os mancais convencionais, pois o uso de mancal magnético neste dispositivo minimiza a hemólise e melhora o tempo de vida do DAV, isso em razão da ausência e contato de um mancal com a crase sanguínea o que, por fim, aumenta a vida útil do dispositivo. O mancal magnético utilizado para o DAV será o mancal do tipo híbrido. Este tipo de mancal combina ímãs permanentes com eletroímãs para realizar a levitação do rotor com controle apenas na direção axial do rotor. Na configuração original desse mancal magnético, um sensor indutivo detecta a posição axial do rotor. Esta posição é enviada a um controlador do tipo PID e processada, amplificada e enviada aos atuadores eletromagnéticos. A corrente enviada aos eletroímãs é controlada de maneira a manter o rotor sempre em uma posição axial fixa. No entanto, essa configuração exige o uso de um atuador eletromagnético contendo um furo para a instalação do sensor indutivo, impondo limitações no desempenho do atuador. Além disso, o sensor indutivo limita a miniaturização do mancal. Assim, para minimizar as limitações impostas pelo uso do sensor indutivo, este trabalho faz, primeiramente, um levantamento das diversas técnicas conhecidas para a medição da posição do rotor em mancais magnéticos. Como resultado, este trabalho identifica o uso do sensor Hall como a alternativa mais promissora. Este sensor responde à magnitude de um campo magnético que nele é aplicado. Fixando-se um ímã permanente ao rotor, obtém-se uma saída no sensor Hall proporcional ao deslocamento do rotor. Contudo, a leitura do sensor Hall é afetada ainda pelo campo magnético gerado pelos atuadores eletromagnéticos, o que é indesejável. Buscando minimizar essa influência, este trabalho apresenta algumas estratégias para eliminar, da saída do sensor Hall, a influência do campo gerado pelo atuador eletromagnético. Os métodos são testados através de experimentos de levitação em mancal magnético e a eficácia dos mesmos comprovada.

Palavras-chave: mancal magnético; sensor Hall; medidas de posição

ABSTRACT

The Escola Politécnica of the University of São Paulo (EPUSP, Brazil) and the Institute Dante Pazzanese of Cardiology (IDPC, Brazil) are jointly developing a Ventricular Assist Device (VAD) based on a mixed flow pump with magnetic bearings. The VAD rotor has a conical shape with spiral impellers that impels and pressurizes the blood. The magnetic bearing eliminates mechanical contact between the pump rotor and the VAD body, minimizing hemolysis and improving the lifetime of the VAD. The magnetic bearing studied is the hybrid type that combines permanent magnets with electromagnets to execute active control in the axial direction of the rotor. In the original configuration, the bearing uses inductive sensor to detect the axial position of the rotor. The sensor readings are sent to a PID type controller, processed, amplified and sent to the electromagnets. The current supplied to the electromagnets are controlled in a manner to keep the rotor in a fixed axial position. However, this configuration requires the use of a hollowed core in the electromagnetic actuator, imposing limitations in its efficiency. Moreover, the use of an inductive sensor imposes limitations to pump downsizing. In order to minimize the limitations, this work conducts firstly a study about alternative techniques for measuring the rotor position in a magnetic bearing. As result, the Hall sensor is identified as the most promising alternative. The Hall sensor is a small semiconductor element available in the market that gives an electric signal with amplitude corresponding to the magnet field intensity applied to it. By fixing a permanent magnet to the rotor, the Hall sensor gives a signal according to the rotor displacement. However, the Hall sensor output is also affected by the magnetic field generated by the electromagnetic actuator of the bearing. This is not desirable for controlling the bearing. In order to minimize the mentioned influence, this work presents some methods to eliminate the influence of the actuator from the Hall sensor readings. The methods are tests in a magnetic bearing and the efficiency of these methods is demonstrated.

Keywords: magnetic bearing; hall sensor; position measurement

Índice

Capítulo 1. Introdução.....	1
1-1. Introdução.....	1
1-2. Mancais magnéticos.....	5
1-3. Utilização de mancais magnéticos em DAVs.....	7
1-4. Objetivo	10
1-5. Metodologia.....	11
Capítulo 2. Revisão Bibliográfica.....	12
2-1. Mancal magnético com controle uniaxial do tipo atração	12
2-2. Medição de posição do rotor.....	15
2-3. Técnicas de medição de posição em mancais magnéticos.....	16
2-3.1. Sensorless.....	16
2-3.2. Ópticos	17
2-3.3. Ultrassom	17
2-3.4. Sensor Hall.....	17
2-4. Utilização do sensor Hall para medidas de posição em mancais magnéticos .	18
2-4.1. Funcionamento do sensor Hall.....	18
2-4.2. Sensor Hall em mancais magnéticos.....	20
2-4.3. Dificuldades no uso do sensor Hall para medição de posição	21
2-4.4. Necessidade de compensação da saída do sensor Hall	23
2-5. Conclusões	24
Capítulo 3. Compensação por meio de dois sensores	25
3-1. Caracterização do sensor Hall	25
3-2. Proposta da primeira estratégia de compensação da saída do sensor Hall	28
3-3. Caracterização do sensor de posição	29
3-4. Experimentos de levitação com o sensor.....	33

3-5. Discussão dos resultados	36
3-6. Solução	37
Capítulo 4. Compensação por meio de modelos	38
4-1. Métodos propostos.....	38
4-2. Modelagem matemática do conjunto bobina-sensor	39
4-3. Implementação na malha de controle	41
4-4. Compensação por meio de modelo numérico.....	44
4-4.1. Utilização de filtros digitais para compensação.....	44
4-4.2. Cálculo dos ganhos do filtro digital	44
4-4.3. Implementação no algoritmo de controle.....	45
4-4.4. Dificuldades encontradas	47
4-5. Compensação por meio de modelo físico	48
4-5.1. Utilização de filtros analógicos para compensação	48
4-5.2. Projeto do filtro RC.....	48
4-5.3. Caracterização do novo sensor de posição.....	49
4-5.4. Experimentos de levitação com o novo sensor	52
4-5.5. Resultados	53
Capítulo 5. Conclusão	55
5-1. Conclusões	55
5-2. Trabalhos futuros	56
Capítulo 6. Referências	57

Índice de Figuras

Figura 1 - Esquema do interior do coração, mostrando as quatro cavidades cardíacas, os vasos que desembocam e emergem nas câmaras atriais e ventriculares, as válvulas e o sentido do fluxo sanguíneo (SOUZA, 2006).....	3
Figura 2 - Classificação dos mancais magnéticos (SILVA, 2005).....	5
Figura 3 - Uma possível aplicação do mancal magnético no DAV	8
Figura 4 - DAV-IDPC com o mancal magnético	13
Figura 5 - Malha de controle do mancal proposto por Silva e Horikawa (2000).....	13
Figura 6 – Teoria de funcionamento de um sensor Hall (Honeywell)	19
Figura 7 - Diagrama básico de um sensor Hall (Honeywell).	19
Figura 8 - Malha de controle proposta por Silva e Horikawa (2000).....	23
Figura 9 - Planta de controle modificada para utilização do sensor Hall.....	23
Figura 10 - Esquema da realização do ensaio à resposta da movimentação axial	26
Figura 11 - Tensão de saída do sensor x posição axial	26
Figura 12 - Esquema da realização do ensaio à resposta da movimentação radial	27
Figura 13 - Tensão de saída do sensor x posição radial	27
Figura 15 - Posicionamento dos sensores Hall.....	29
Figura 16 - Amplificação diferencial com a saída dos dois sensores.....	29
Figura 17 - Sensor Hall fixado no fenolite	30
Figura 18 - Atuador sensoriado	30
Figura 19 - Dispositivo para medida de posição	31
Figura 20 - Curva de calibração	31
Figura 21 - Ruído do sensor de posição	32
Figura 22 - Campo magnético do atuador sem a presença do ímã do rotor	33
Figura 23 - Campo magnético do atuador com a presença do ímã do rotor.....	34
Figura 24 - Sensor compensado	34

Figura 25 - Eletrônica para compensação dos ganhos	34
Figura 26 - Rotor levitado	35
Figura 27 - Resposta do sensor com o rotor levitado	35
Figura 28 - Resposta do sensor Hall a um degrau na bobina	37
Figura 29 - Gráfico de bode experimental.....	39
Figura 30 - Gráfico de bode experimental e teórico.....	40
Figura 31 - Planta de controle alterada para a utilização de sensor Hall como sensor de posição.....	41
Figura 32 - Redução da planta de controle às suas constantes	41
Figura 33 – Separação da entrada do sinal de posição	42
Figura 34 - Reorganização da planta de controle	42
Figura 35 - Funcionamento do sensor Hall como sensor indutivo.....	43
Figura 36 - Função degrau da função de transferência e de sua transformada Z.....	44
Figura 37 - Saída do sensor e do filtro digital	45
Figura 38 - Algoritmo proposto por este trabalho	46
Figura 39 - Esquema do circuito utilizando-se o filtro RC	49
Figura 40 - Sinais do filtro RC, sensor Hall e soma.....	50
Figura 41 - Curva de calibração	51
Figura 42 - Ruído do sensor de posição	52

Lista de equações

Equação 1 18

Equação 2 45

Equação 3 48

Capítulo 1. Introdução

1-1. Introdução

Nos dias atuais, em decorrência do avanço tecnológico houve um aumento expressivo da expectativa de vida com diminuição dos óbitos por doenças infecto-contagiosas. Entretanto, junto com a expectativa de vida, também aumentou o aparecimento de doenças crônicas, como as que acometem o sistema circulatório (LEGENDRE, 2003).

No mundo todo, 7,2 milhões de pessoas morrem todos os anos por causa das doenças do sistema circulatório. Em razão dos problemas decorrentes do modo de vida ocidental, esses números cresceram expressivamente (NATIONAL GEOGRAPHIC, 2007).

No Brasil, a situação de mortalidade não difere do resto dos países em desenvolvimento. Somente no ano de 2006, as doenças do aparelho circulatório foram responsáveis por 31,8% dos óbitos no país. Dentre tais óbitos, pacientes que possuíam idade acima de 60 anos eram os mais vitimados por doenças do sistema circulatório, num percentual de 42,1%.

Nos dias atuais, as doenças cardiovasculares constituem um grave problema de saúde pública e representam a maior causa de óbitos no país. Em consequência da grande quantidade de óbitos por doenças cardiovasculares, o Ministério da Saúde, desde 2006, acompanha os fatores de risco e de proteção para as doenças crônicas não transmissíveis por meio do inquérito telefônico realizado nas 26 capitais e do DF. São mais de 54 mil entrevistas que ajudam a monitorar variáveis como o hábito de fumar, o consumo de bebidas alcoólicas, o excesso de peso, a obesidade, os hábitos alimentares, o sedentarismo e a morbidade referida, com diagnóstico prévio para diabetes e hipertensão arterial (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2006 *apud* ANTUNES, 2007).

Porém, em alguns casos de doenças cardiovasculares, mesmo com os tratamentos preventivos, podem surgir quadros mais complexos de doenças do sistema cardiovascular. Em alguns desses casos, quando os tratamentos não podem ser aplicados e/ou perderam a eficiência, o paciente é encaminhado para a fila de transplantes cardíacos.

A fila para todos os tipos de transplantes é regulamentada pela Portaria N.º 3.407, de 05 de agosto de 1998, onde o Ministério da Saúde criou um regulamento técnico para as atividades de transplantes e coordenação nacional do sistema de transplantes. Nessa portaria é estabelecido um sistema de fila única para coordenar a distribuição de órgãos e tecidos. Tal portaria apresenta alguns critérios específicos de distribuição para cada tipo de órgão ou tecido. Todos os órgãos ou tecidos obtidos de doador cadáver, para que sejam destinados aos receptores em regime de espera, deverão ser distribuídos segundo o sistema de lista única.

Dessa fila, estima-se que entre 10% e 40% dos pacientes selecionados falecem em todo o mundo e uma parcela significativa desses pacientes morre por falência circulatória progressiva (MOREIRA, 2005).

Em razão dessa dificuldade em se manter o paciente vivo em fila de transplante foram desenvolvidas tecnologias de assistência ventricular visando prolongar o tempo de sobrevida além de dar mais qualidade de vida ao paciente.

Para melhor ser entendido o assunto de assistência circulatória, acima citado, existe a necessidade de demonstrar alguns aspectos do coração humano. O coração humano é um órgão que se contrai aproximadamente 100 mil vezes por dia, bombeando aproximadamente 4 a 5 litros de sangue por 96 mil quilômetros de vasos. Este órgão, que pesa por volta de 280 gramas, trabalha durante toda a nossa vida sem descanso (NATIONAL GEOGRAPHIC, 2007). O coração é uma bomba muscular oca, pulsátil, dividida em quatro câmaras. As câmaras superiores são os átrios e as inferiores são os ventrículos.

Os átrios são câmaras de paredes finas que recebem o sangue que chegam através das veias e o bombeiam fracamente para auxiliar o enchimento dos ventrículos. O átrio direito recebe as veias cava superior e inferior que trazem o sangue venoso ao coração. O átrio esquerdo recebe as veias pulmonares, que trazem o sangue oxigenado nos pulmões, para ser distribuído por todo o organismo (Figura 1) (SOUZA, 2006).

Figura 1 - Esquema do interior do coração, mostrando as quatro cavidades cardíacas, os vasos que desembocam e emergem nas câmaras atriais e ventriculares, as válvulas e o sentido do fluxo sanguíneo (SOUZA, 2006).

Assim, os dispositivos de assistência, destinado aos pacientes em fila de espera para se submeter a um transplante cardíaco, podem ser utilizados em duas situações, seja como ponte para transplantes, seja como ponte para o tratamento. São chamados de pontes porque não fazem as funções de um coração natural, mas permitem que o paciente mantenha certa qualidade de vida até encontrar um doador compatível ou que tenha seu músculo cardíaco restaurado.

Procurando maneiras de desenvolver esse tipo de dispositivo, crítico para a vida do paciente, diversas instituições no mundo todo desenvolvem estudos relacionados a Dispositivos de Assistência Ventricular (DAV), uni e biventriculares que possam assistir ou substituir o coração do paciente.

Um DAV vem sendo desenvolvido através de um projeto conjunto com a Escola Politécnica da USP e o Instituto Dante Pazzanese de Cardiologia (IDPC, S. Paulo, SP). Almeja-se o desenvolvimento de um DAV implantável tendo como base uma bomba rotativa de circulação extracorpórea (CEC) (ANDRADE, 1996, BOCK, 2008).

Uma vez que o DAV será implantado no interior do paciente, é imprescindível que o DAV apresente uma elevada vida útil. Como os mancais que sustentam o rotor do DAV são as partes mais susceptíveis a desgastes e falhas, o projeto acima referido prevê o desenvolvimento de duas versões de DAV: um, que emprega mancais de escorregamento e outro, que emprega mancais magnéticos. O uso de mancais magnéticos é uma tendência mundial, pois, além de minimizar o problema de desgaste dos mancais, o rotor é levitado magneticamente sem nenhum contato com as demais partes do DAV, minimizando assim os danos à crase sanguínea.

Neste projeto, está sendo desenvolvido um mancal magnético baseado no mancal proposto por Silva e Horikawa (2000), o qual tem a peculiaridade de requerer controle ativo num único grau de liberdade do rotor: na direção do eixo de rotação do rotor do DAV. Nas demais direções, o rotor é retido numa posição central somente pela ação da atração entre pares de ímãs permanentes. Essas características conferem a esse mancal uma elevada simplicidade construtiva comparada a outros mancais magnéticos conhecidos, simplicidade esta que resulta numa elevada confiabilidade

A seguir, um breve comentário sobre mancais magnéticos.

1-2. Mancais magnéticos

A principal propriedade dos Mancais Magnéticos Ativos (MMA) é a ausência de contato e, consecutivamente, atrito entre o rotor e o estator. Esta condição propicia inúmeras vantagens sobre os mancais que utilizam algum tipo de contato, dentre essas, estão: dispensar manutenções como lubrificação e minimização da troca de peças sujeitas a desgaste. Outra vantagem é a possibilidade de rejeitar perturbações de forma ativa propiciando assim diversas aplicações industriais como: centrífugas de alta velocidade, turbo máquinas, bombas de vácuo, sistemas de transporte dentre outras inúmeras aplicações (LICHUAN, 2004).

Os sistemas de MMA podem ser classificados: pela característica magnética da suspensão e pelo número de graus de liberdade controlada.

As características do sistema magnético do mancal classificam-se em relação ao emprego ou não de ímãs, e quanto à atuação dos ímãs permanentes trabalhando por atração ou repulsão. A divisão dessas características está exposta no diagrama exposto pela Figura 2 abaixo.

Figura 2 - Classificação dos mancais magnéticos (SILVA, 2005)

Estudando os tipos de mancais conhecidos, é possível descartar a utilização de mancais que utilizem: controle em muitos graus de liberdade, em razão da complexidade construtiva para o objetivo proposto e os mancais que utilizem supercondutores sem controle ativo, pois sua temperatura de trabalho não possibilita a utilização em um DAV. Assim, a melhor opção de utilização, para este trabalho, são os mancais híbridos que empregam ímãs permanentes juntamente com eletroímãs e com controle num único grau de liberdade.

Buscando um mancal híbridos, em razão de um menor consumo de energia e possibilidade de desmagnetização, foi indicado um MMA de atração desenvolvido por

Silva e Horikawa (2000), doravante referido como Mancal EPUSP. Assim, o Mancal EPUSP é uma solução interessante para o caso estudado em razão de sua simplicidade construtiva e de controle, além de um baixo consumo de energia.

1-3. Utilização de mancais magnéticos em DAVs

Diversos DAVs foram propostos usando mancais magnéticos. Dentre estes, pode-se identificar um grupo de DAVs em que o mancal magnético suspende parcialmente o rotor, pois este é também suspenso por um mancal de contato de rolamento ou de deslizamento. São exemplos dessa classe, os DAVs apresentados por Akamatsu (1995), Ohji (1996), Onuma (2002), Nojiri (2000), Takatani (1994). De modo a eliminar completamente mancais de contato, foram desenvolvidos DAVs que empregam: a) mancais com controle nos 6 graus de liberdade do rotor (Allaire, 1996); b) que combinam mancal magnético com mancal hidrostático, empregando o próprio sangue como fluido de trabalho (HART, 1996; YAMANE, 1997); c) uma combinação de mancal magnético com um motor com autossuspensão (MASUZAWA, 2003) ou então; d) um mancal magnético de arquitetura simplificada (ASAMA, 2004).

Em todos esses DAVs, embora se tenha atingido a meta de manter o rotor totalmente levitado sem contato sólido do rotor com a carcaça, ainda persiste uma crítica. Todos eles realizam controle ativo em pelo menos duas direções de movimento do rotor. Assim, neste projeto, será utilizada uma adaptação do mancal magnético desenvolvido por Silva e Horikawa (2000), Mancal EPUSP, o qual requer controle num único grau de liberdade do rotor, simplificando a construção e o controle e aumentando assim a confiabilidade do projeto.

Apesar de esse mancal ser indicado para ser utilizado neste trabalho, ainda existem desafios a serem vencidos para a utilização desse mancal em um DAV. Um dos problemas a serem solucionados está relacionado à utilização do sensor do tipo indutivo no mancal magnético. Esse sensor é necessário para se medir a posição axial do rotor e assim realizar o controle, promovendo a levitação do rotor. Assim, o referido sensor indutivo vem impondo limitações no projeto do mancal magnético, conforme explicado mais adiante.

A Figura 3 apresenta uma das possíveis configurações do DAV empregando o mancal EPUSP. Em cada extremidade do DAV é instalado um par de ímãs: um fixo ao rotor e o outro, à carcaça. A polaridade dos ímãs é ajustada de modo que se tenha força de atração em cada um desses pares. Essa atração irá assegurar a retenção estável do rotor em todas as direções de movimento, exceto na direção axial. Na direção axial o rotor é instável, deslocando-se totalmente para cima ou para baixo, até que o rotor se

encoste à carcaça. Assim, a posição do rotor deve ser controlada na direção axial através de um sistema de controle composto por um sensor indutivo, um controlador e um par de atuadores eletromagnéticos (eletroímãs). Com base no sinal do sensor que mede constantemente a posição axial do rotor, o controlador aciona o eletroímã de modo a manter o rotor sempre numa posição central fixa.

Figura 3 - Uma possível aplicação do mancal magnético no DAV

Diversos são os desafios presentes neste projeto, mesmo considerando somente o aspecto referente à engenharia. Um desses consiste em identificar alternativas para o sensor indutivo que é utilizado no mancal proposto por Silva e Horikawa (2000). Esse sensor indutivo impõe algumas limitações no projeto do mancal:

- Esse sensor possui dimensões consideráveis comparado às dimensões do rotor que se pretende utilizar no novo DAV, impondo limites às dimensões do DAV.
- Além disso, a utilização do sensor indutivo impõe limitação na arquitetura dos ímãs permanentes ou do atuador. Por exemplo, na Figura 3, foi preciso utilizar um ímã permanente em forma de anel de modo a permitir a instalação do sensor indutivo.

A título de referência, o sensor empregado até o momento no desenvolvimento do Mancal EPUSP tem 6mm de diâmetro e comprimento total de 35mm (fabricante

AEC, modelo PU-05). Existem outros modelos menores mas as limitações acima mencionadas persistem.

Conforme será descrito em detalhes ao longo deste trabalho, buscou-se alternativas ao sensor indutivo para a medição da posição do rotor e, como resultado, identificou-se o sensor Hall.

1-4. Objetivo

O objetivo deste trabalho é avaliar a possibilidade de uso do sensor Hall na medição da posição do rotor no mancal magnético e com base nessa medição realizar o controle da posição do rotor e a sua levitação sem contato. Esta avaliação inclui identificar os problemas que são intrínsecos ao uso do sensor Hall e apresentar soluções para tais problemas.

1-5. Metodologia

A metodologia deste trabalho para realizar o estudo sobre a utilização do sensor Hall para medir a posição do rotor do mancal magnético desenvolvido por Silva e Horikawa (2000) pode ser dividida em três partes expostas no objetivo.

- Comparação de sensor Hall das alternativas de medição de posição do rotor

Inicialmente, serão realizados estudos sobre as alternativas presentes para a medição de posição em um mancal magnético e seu funcionamento. Ou seja, buscar casos de mancais magnéticos onde a posição do objeto é medido por um método diverso daquele empregado em Silva e Horikawa (2000). Este estudo visa a confirmação de que o sensor Hall é a melhor alternativa para aplicação num DAV.

- Utilizar o sensor Hall para medir posições no MMA do DAV desenvolvido

A partir dos resultados encontrados nas análises anteriores será realizado o estudo mais específico do sensor Hall, levantando-se, inicialmente, o funcionamento do sensor com movimentação de ímãs de forma radial e axial, além de ruídos existentes.

Com essas análises já executadas e com os problemas encontrados já solucionados, esse sensor de posição será usado no controle do mancal.

- Expor os resultados da utilização do sensor Hall para o DAV em desenvolvimento

Por final, com o método de medida do sensor Hall, junto com estudos e análises do controle, realizado de maneira prática, serão apresentados os resultados dos ensaios de controle do mancal proposto por Silva e Horikawa (2000) utilizado no DAV estudado neste trabalho com a utilização do sensor Hall como sensor de posição.

Capítulo 2. Revisão Bibliográfica

Este capítulo tem como objetivo realizar levantamento bibliográfico referente:

- Ao mancal magnético, Mancal EPUSP, que é o mancal onde se pretende aplicar o sensor Hall na medição da posição do rotor. O objetivo é entender o princípio de funcionamento e o conhecimento de suas peculiaridades que o distingue de outros tipos de mancais magnéticos.
- Às técnicas conhecidas de medição de posição do rotor em mancais magnéticos. Este estudo será realizado levando em conta a aplicação do mancal magnético em um DAV. Este estudo conduz a utilização do sensor Hall.
- Aos problemas conhecidos e que são intrínsecos ao uso do sensor Hall

2-1. Mancal magnético com controle uniaxial do tipo atração

Comparando aos demais mancais magnéticos estudados, o mancal EPUSP apresenta uma maior simplicidade construtiva. Este mancal, já adaptado à utilização no DAV desenvolvido em conjunto com o IDPC, é mostrado na Figura 4.

O mancal EPUSP é um mancal do tipo híbrido, combinando eletroímãs e ímãs permanentes para levantar o rotor. Neste mancal, um ímã permanente é fixado em cada extremidade do rotor. Cada ímã permanente faz par com o núcleo ferromagnético do eletroímã, em razão de rigidez magnética radial ser positiva, entre o referido par, o rotor é mantido radialmente estável.

No entanto, na direção axial o rotor não é estável. Para estabilizar o rotor nessa direção é realizado um controle ativo. Nesse controle ativo, utiliza-se um sensor indutivo é empregado para medir a posição do rotor.

O sinal de posição medido por este sensor é enviado a um controlador PID e é então, processado, amplificado e enviado aos eletroímãs em forma de corrente, buscando manter o rotor em uma posição axial fixa. Esse sistema de controle pode ser exemplificado pela malha de controle exposta na Figura 5.

Figura 4 - DAV-IDPC com o mancal magnético

M : massa do rotor k_t : constante eletromagnética L : indutância do eletroímã
 k_s : ganho do sensor k_h : constante magnética R : resistência do eletroímã
 k_a : ganho do amplificador

Figura 5 - Malha de controle do mancal proposto por Silva e Horikawa (2000)

Como mostrado na Figura 4, o núcleo do eletroímã inferior do rotor é vazado para possibilitar a instalação do sensor. Isto impõe prejuízo ao desempenho deste eletroímã. Quando se aplica a mesma corrente em ambos os eletroímãs, a força exercida pelo eletroímã inferior é menor do que aquela exercida pelo atuador superior.

Já em uma segunda abordagem, como já foi mencionado, a força de atração entre os ímãs fixos ao rotor e o núcleo ferromagnético assegura a retenção do rotor em uma posição radial fixa. Essa força de retenção, e consecutivamente a rigidez, também é menor no atuador inferior.

Essas duas características citadas, mais as dimensões do sensor de posição, significativas em relação às dimensões requeridas em um DAV, acabam por impor uma limitação na miniaturização desse mancal e consecutivamente uma dificuldade na sua utilização.

Assim, para resolver os problemas supracitados, este trabalho estuda algumas alternativas para realizar a medida de posição em mancais magnéticos buscando encontrar uma técnica que possibilite a miniaturização desse mancal para ele ser utilizado em um DAV.

2-2. Medição de posição do rotor

O sensor a ser empregado no mancal magnético, na aplicação considerada neste trabalho deve atender a alguns requisitos como: permitir a medição da posição axial de um rotor, não ser sensível a movimentos radiais do rotor, permitir a medição sem contato, permitir a medição na presença de sangue e possuir dimensões menores do que o sensor indutivo que já vem sendo utilizado.

Buscando suprir essas condições, foram estudadas diversas técnicas de medição através de revisão bibliográfica.

2-3. Técnicas de medição de posição em mancais magnéticos

De acordo com Boehm (1993) e Popovic (1996), existem inúmeras técnicas para medir posição em mancais magnéticos. Dentre as técnicas apresentadas por esses autores, temos: sensores indutivos, técnicas baseadas em luz, técnicas baseadas em ultrassom e técnicas baseadas em sensores Hall.

Além dessas técnicas, existem ainda técnicas que não utilizam sensores de posição, que também são utilizadas para o controle de um mancal magnético chamadas de *sensorless*.

Visando determinar qual a melhor técnica a ser utilizada, para substituir o sensor indutivo, neste trabalho será realizado nos tópicos abaixo um estudo das técnicas supracitadas.

2-3.1. Sensorless

Em contraste com a maioria das técnicas de controle, esta técnica dispensa a utilização de sensores físicos. Esse tipo de técnica já foram apresentadas por vários autores, como Mukhopadhyay (2005), Vischer (1993), Mizuno (1996), Fleming (2005), e outros.

Essa técnica é baseada em estimativas de posição fundamentadas em modelos matemáticos dinâmicos do mancal magnético ou de parâmetros do sistema de controle. Como exemplo, pode-se utilizar a corrente enviada aos atuadores eletromagnéticos para estimar a posição do rotor.

Além da complexidade, a estimativa de posição calculada através dos modelos do mancal está sujeita a erros. Como exemplo, existe a possibilidade de erros no cálculo da posição quando se integra a corrente enviada aos atuadores no tempo. Essa estimativa acaba por acumular erros. Assim a posição estimada, acaba por se desviar da posição real do rotor cada vez mais, com o decorrer do tempo, fazendo com que, por fim, o mancal perca sua estabilidade. Característica esta incompatível com a utilização a que se propõe esse mancal.

Com isso, deu-se a continuidade do estudo das diversas técnicas de medida de posição buscando qual técnica melhor se encaixa nas condições de contorno anteriormente apresentadas.

2-3.2. Ópticos

Neste projeto podemos descartar quase imediatamente a utilização de técnicas ópticas. Em razão do sangue ser um líquido que possui inúmeras partículas que podem desviar o feixe de luz, necessário para a medida de posição, a interferência na passagem de luz desse fluido impede a utilização desta técnica.

2-3.3. Ultrassom

Já nas técnicas que utilizam ultra-som para medida de posição a coloração e o fato do fluido de trabalho ser particulado não é um fator crítico. Já o tamanho da ponta de prova desse tipo de sensor tem dimensões de mesmo tamanho ou até maiores do que o sensor indutivo utilizado na primeira versão do mancal magnético, fato esse que inviabiliza a utilização deste sensor para a aplicação estudada.

2-3.4. Sensor Hall

O sensor Hall apresenta-se como um semicondutor pequeno e disponível no mercado e que proporciona um sinal elétrico com amplitude proporcional à intensidade do campo magnético aplicado. Como o campo magnético do ímã fixo ao rotor não sofre alterações em razão do meio e permite a medição da posição sem contato com o rotor, o sensor Hall é uma solução promissora sendo assim estudada neste trabalho.

2-4. Utilização do sensor Hall para medidas de posição em mancais magnéticos

Uma vez confirmado que o sensor Hall é a solução mais promissora, foi realizado um estudo mais profundo a respeito da utilização desse sensor em mancais magnéticos através de uma revisão bibliográfica e um estudo aprofundado do funcionamento desse sensor.

Esses estudos estão dispostos nos tópicos subseqüentes desta seção.

2-4.1. Funcionamento do sensor Hall

O sensor de efeito Hall é um dispositivo, hoje, largamente empregado nos mais diversos dispositivos modernos. Controle de brinquedos com mancais magnéticos até ventoinhas de computador usam sensores baseados no princípio descoberto e publicado por E. H. Hall, em 1879.

Hall notou que, ao aplicar-se uma corrente em uma placa de material condutor e submeter-se essa placa a um fluxo magnético perpendicular à direção da corrente, surgia uma diferença de potencial nas extremidades opostas da placa, sendo a intensidade desta última era diretamente proporcional à intensidade do campo magnético ao qual se submetia a placa (HALL, 1879). Este princípio está representado na Figura 6.

Assim, a equação que transforma o fluxo magnético em relação ao sentido do campo magnético à tensão de Hall é dada pela Equação (1).

$$V_h \propto I \times B$$

Equação 1

Figura 6 – Teoria de funcionamento de um sensor Hall (Honeywell)

Para se utilizar o princípio descoberto por Hall como um sensor de posição, são requeridas algumas peculiaridades em sua construção eletrônica. O sensor de campo magnético de efeito Hall requer o tratamento de seu sinal de saída para a maioria das suas aplicações. Para o sensor Hall gerar um sinal eletrônico de saída (tensão de Hall), ele necessita de amplificação da diferença de potencial que surge em seus terminais quando tal sensor é exposto a um campo magnético estático ou magnetostático. A Figura 7 ilustra um sensor básico de efeito Hall.

Figura 7 - Diagrama básico de um sensor Hall (Honeywell).

Caso não exista campo magnético passando pelo sensor, a tensão de saída é zero, no entanto, se a tensão em cada terminal for medida em seu respectivo terra, aparecerá

uma tensão não zero. Portanto o amplificador mostrado no diagrama acima (Figura 7) deve ser diferencial, pois deve amplificar somente a diferença de potencial, ou seja, a tensão de Hall. A tensão de Hall é um sinal de nível baixo da ordem de dezenas de μV . Essa saída de baixo nível precisa ser amplificada com baixo ruído, alta impedância e ganho moderado. O amplificador diferencial, com essas características, pode ser integrado com o elemento Hall usando um transistor bipolar. E o regulador pode ser facilmente desenvolvido, pois tem por função manter a corrente do campo contínua e com isso detectar com mais exatidão a intensidade do campo magnético (HONEYWELL).

Toda a eletrônica desse sensor, nos dias atuais, é embarcada em um único elemento. Assim, a saída do sensor Hall já é amplificada, tornando-se de mais fácil aplicação e a construção do protótipo para o condicionamento do sinal.

2-4.2. Sensor Hall em mancais magnéticos

No que tange à utilização do sensor Hall em mancais magnéticos, já é possível verificar que esse sensor consegue medir a posição do rotor na presença de sangue, possui dimensões pequenas e facilita a construção eletrônica do sensor. Além de ser citado e utilizado como em: Yang (2007a, 2007b), Lilienkamp, (2004), Komori (2005), Popovic (1996), Schott (2002) e Boehm, (1993) sendo utilizando inclusive aplicações comerciais como em Magnetic Moments LLC (2004).

Apesar dessa técnica se mostrar funcional, ainda reside uma crítica em relação à utilização dos sensores Hall para a finalidade de medir a posição do mancal. Além do campo gerado pelo ímã permanente, o sensor Hall ainda mede o campo magnético gerado pelo atuador eletromagnético. Esse campo gerado pelo atuador pode impedir o funcionamento estável do mancal magnético.

Assim, outros autores como Lilienkamp, (2004) e Komori (2005) utilizaram-se de artifícios para eliminar essa grande influência em seus sistemas. No trabalho de Lilienkamp (2004), a autora utilizou-se das perdas magnéticas ocasionadas por correntes parasitas pela levitação de um corpo de material ferroso, perdas estas que diminuem as oscilações do corpo levitado, aumentando-se a rigidez radial e tornando assim possível a levitação com um grande intervalo entre o rotor e o atuador.

Já em Komori (2005), a levitação é realizada adotando-se um entreferro elevado entre o atuador e o objeto levitado, reduzindo assim a influência do campo magnético gerado pelo atuador. Nesse mesmo trabalho, são realizadas correções nas medidas de posição, utilizando-se a corrente enviada para os atuadores pelo algoritmo de controle. A estratégia de correção dos sinais provenientes do sensor Hall mais se assemelham a esse trabalho.

Nos artigos de Yang (2007a e 2007b), são utilizados arranjos de sensores Hall para medir a posição axial de um eixo. Porém, nesses casos, a interferência do campo magnético é praticamente nula em razão do posicionamento distante do sensor quanto ao atuador. Os recursos propostos por este autor não se aplicam ao caso estudado, pois a arquitetura do MMA utilizado não permite o mesmo tipo de aplicação para os sensores Hall.

Pela análise desses trabalhos, é possível propor-se a utilização do sensor Hall como sensor de posição desde que a influência do campo magnético originado do atuador seja minimizada.

2-4.3. Dificuldades no uso do sensor Hall para medição de posição

Em uma primeira aproximação, o sensor Hall pode ser aplicado ao mancal magnético, fixando-se o mesmo sobre o atuador eletromagnético. Dessa maneira, o sensor Hall mediria a variação do fluxo magnético produzida pela variação da posição axial do rotor. No entanto, alguns problemas devem ser considerados:

- A resposta do sensor, no que diz respeito à intensidade do fluxo magnético entre a posição axial do rotor e a posição do rotor não é linear.
- O sensor é sensível não somente aos movimentos axiais do rotor, mas também a movimentos radiais no rotor
- A sensibilidade do sensor ao campo gerado pelo atuador eletromagnético pode tornar o mancal instável ao ser ligado.

O primeiro problema citado não consiste em um problema sério, já que existem apenas pequenos deslocamentos durante a operação do mancal. Como os deslocamentos são pequenos, a linearidade desse sensor pode ser analisada utilizando-se a curva de calibração no intervalo de trabalho. Além dos pequenos deslocamentos, a linearidade

também possui outra razão para ser considerada de pouca influência, uma vez que a mesma pode ser facilmente corrigida através de um algoritmo que incorpore um mapa de erros.

O fato de o sensor ser sensível a movimentações radiais também não representa um problema grave para essa aplicação, pois, como os movimentos na direção axial são pequenos quando comparados às dimensões do núcleo do eletroímã e os ímãs permanentes, não é esperado que as movimentações radiais sejam maiores do que as axiais. Outra razão relevante é o fato de que o rotor permanece no centro do mancal em razão das forças de atração entre o núcleo do atuador e o ímã preso ao rotor, o que faz com que as movimentações radiais sejam reduzidas o suficiente para não afetarem a leitura realizada pelo sensor.

Já a influência do campo magnético gerado pelo atuador eletromagnético, é o mais grave dos três problemas citados anteriormente e deve ser minimizada para evitar que o referido, comprometa a estabilidade do mancal.

Se empregado diretamente, o sensor Hall irá medir a posição do rotor mais a densidade de fluxo proveniente do eletroímã, e assim, o sinal de posição medido pelo sensor será diferente da posição real. Essa diferença fará com que o controlador envie cada vez mais corrente aos atuadores até que por fim o mancal perca sua estabilidade. Como a ocorrência dessa perda da estabilidade do mancal no caso estudado é crítica, faz-se necessária a minimização dessa influência bem como, se possível, a retirada completa do sinal captado pelo sensor Hall. Com isso este trabalho deverá estudar as possibilidades de utilização do sensor Hall e das tentativas de fazer com que essa influência do campo magnético não se torne crítica para a utilização do dito sensor.

2-4.4. Necessidade de compensação da saída do sensor Hall

Partindo-se do sistema de controle proposto por Silva e Horikawa (2000), foram realizadas algumas alterações na malha de controle do mancal. Na Figura 8, mostrada abaixo, observa-se que o sensor indutivo mede diretamente a posição do rotor. Considerando o uso do sensor Hall na medição da posição axial, o sistema de controle é redesenhado.

Figura 8 - Malha de controle proposta por Silva e Horikawa (2000)

Na malha de controle, redesenhada na Figura 9, foi incluída uma constante do campo magnético já que a saída do sensor é em função da densidade de fluxo e não diretamente da posição do rotor. Porém, nesse caso, haveria influência da intensidade do fluxo magnético da bobina. Para isso este trabalho buscará minimizar essa influência.

Figura 9 - Planta de controle modificada para utilização do sensor Hall

2-5. Conclusões

Levando-se em consideração as condições de contorno impostas pela utilização de um mancal magnético em um dispositivo de assistência ventricular (DAV), foram realizadas considerações importantes durante todo capítulo. Primeiramente, ao estudarem-se os mancais magnéticos, foi possível perceber que o melhor tipo selecionado foi um mancal magnético híbrido com controle uni-axial, buscando minimizar o consumo de energia e por sua vez selecionou-se o mancal desenvolvido por Silva e Horikawa (2000). Porém, a utilização do sensor indutivo para medida de posição utilizada no referido mancal dificulta a miniaturização do mancal, além de impor limitações no desempenho do atuador eletromagnético do mancal magnético.

Com isso, iniciou-se o estudo de novas técnicas de sensoriamento de posição, realizando-se um levantamento das condições de contorno necessárias e os tipos de sensores disponíveis. Chegou-se à conclusão de que a utilização de sensores Hall era a mais indicada e, tendo-se em mente as condições que o sensor Hall apresenta para realizar medidas de posição em mancais magnéticos, ou seja, os problemas que devem ser superados, este trabalho estudou técnicas para eliminar o maior problema identificado para a utilização do sensor Hall como sensor de posição: retirar-se a influência do fluxo magnético produzido pela bobina do sinal de posição medido pelo sensor Hall.

Capítulo 3. Compensação por meio de dois sensores

Este capítulo apresenta, primeiramente, uma série de estudos experimentais visando caracterizar o comportamento do sensor Hall na medição de deslocamento. Em seguida, é proposta uma primeira estratégia para eliminar da leitura do sensor Hall, os sinais induzidos pelo atuador eletromagnético.

Apresenta-se uma possível montagem do sensor Hall sobre o atuador eletromagnético. Com o sensor montado, o conjunto – sensor hall e atuador eletromagnético – são calibrados com relação ao deslocamento e então é realizado o ensaio de levitação com o mancal magnético.

Alguns problemas são observados, analisados e soluções apresentadas.

3-1. Caracterização do sensor Hall

Com o objetivo de confirmar a possibilidade da utilização do sensor Hall, foram realizados alguns ensaios para determinar: a) resposta do sensor a deslocamentos radiais de um ímã; b) resposta à movimentação axial de um ímã; c) tensão máxima da saída do sensor; d) sinal de saída do sensor em relação ao polo de um ímã permanente, além da verificação da resposta do sensor quando fixados em lados opostos do atuador.

a) Resposta à movimentação axial de um ímã

Com este ensaio levanta-se o ganho do sensor em mV/mm, dado importante para confecção do circuito de condicionamento de sinal, e para verificação da linearidade do sensor utilizado para as condições de trabalho do mancal magnético.

Para ser verificada a resposta do sensor à movimentação axial do ímã (Neodímio-Ferro-Boro com dimensões de 6 mm de diâmetro e 6 mm), o ensaio realizado consistiu em afastá-lo do sensor em intervalos de 2 mm, conforme mostrado na Figura 10, e medir-se a tensão de saída do sensor. O gráfico obtido por este experimento está mostrado abaixo na Figura 11.

Num intervalo de 0 a 5mm, que é o intervalo dentro do qual espera-se operar o mancal magnético, o sensor apresenta um ganho significativo de aproximadamente 120mV/mm, com boa linearidade.

Figura 10 - Esquema da realização do ensaio à resposta da movimentação axial

Figura 11 - Tensão de saída do sensor x posição axial

b) Resposta do sensor à movimentação radial de um ímã

Para verificar a resposta do sensor Hall à movimentação radial do ímã, realizou-se um ensaio para verificar o quanto o sensor responde à movimentação radial do ímã.

Esse ensaio foi realizado mantendo-se uma separação constante entre o ímã e o sensor, onde o ímã é deslocado radialmente com relação ao sensor em intervalos de 1mm, conforme Figura 12, e a tensão de saída do sensor, medida. Essas medidas resultam na curva de resposta da Figura 13. No mesmo intervalo de 0 a 5mm, o ganho foi de aproximadamente 34mV/mm, sendo 3,5 vezes menor do que o ganho na direção axial, acima citado. O ganho é considerável e pode vir a causar problemas de acoplamento da posição radial sobre o controle da posição axial. Mas para fins desse trabalho é considerado aceitável. Uma sensibilidade menor nesta direção poderá ser obtida pelo emprego de ímãs maiores comparado à dimensão do sensor Hall.

Figura 12 - Esquema da realização do ensaio à resposta da movimentação radial

Figura 13 - Tensão de saída do sensor x posição radial

c) Tensão máxima de saída do sensor

Este ensaio foi realizado para se definir os ganhos de amplificação necessários ao circuito condicionador de sinal.

O ensaio foi feito posicionando um ímã permanente diretamente sobre o sensor, e, em seguida, medindo-se a resposta do sensor ao ímã. Ímã este, idêntico ao utilizado no rotor do mancal, ou seja, um ímã de terra rara. Tal tensão foi de aproximadamente: 1,83V, e, sendo esta satisfatória em razão de pouca necessidade de amplificação, foi desenvolvida a eletrônica necessária para o circuito de medição.

d) Sinal de saída do sensor em relação ao polo de um ímã

Neste ensaio verificou-se a resposta do sensor à polaridade do ímã.

Um ímã, (Neodímio-Ferro-Boro cilíndrico com 6mm de diâmetro e 6mm de altura) foi posicionado sobre o sensor, inicialmente com polo norte do ímã sobre o sensor. Em

seguida, colocando-se polo sul sobre o sensor. As tensões obtidas foram de 1,83V e de -1,83V. Este resultado mostra que independente da polaridade do ímã, ocorre apenas a inversão no sinal de saída do sensor hall.

e) Curva característica de resposta de dois sensores em lados opostos de um eletroímã

Neste experimento, dois sensores foram colados aos pólos de um eletroímã, sendo um em cada polo. Nessas condições, o eletroímã é subitamente ligado. A Figura 14 mostra a saída dos dois sensores. Verifica-se que as saídas de ambos os sensores são praticamente simétricas. A soma desses sinais resulta num resíduo cuja amplitude é inferior a 1,2mV.

Figura 14 - Curva característica de resposta de dois sensores em lados opostos de um eletroímã

3-2. Proposta da primeira estratégia de compensação da saída do sensor Hall

Realizados os experimentos acima, confirmou-se a viabilidade de emprego do sensor na medição de posição do rotor e a utilização deste sinal para o controle do mancal magnético. Constatou-se ainda que o sensor Hall apresenta saídas simétricas quando aproximados a polos opostos de um mesmo ímã. A mesma resposta é observada quando o sensor é fixado a lados opostos de um eletroímã e recebe um degrau de corrente. Essas duas últimas constatações sugeriram uma primeira estratégia para remover da leitura do sensor Hall a influência do campo gerado pelo atuador eletromagnético. A estratégia é ilustrada na Figura 15. Dois sensores são fixados, um

em cada extremidade do núcleo de um atuador eletromagnético. Assim, quando o ímã preso ao rotor é aproximado do atuador com os sensores, o fluxo magnético aumenta em ambos os sensores, segundo uma mesma polarização. Já quando uma corrente é aplicada ao atuador eletromagnético, os dois sensores geram saídas simétricas.

Assim, somando-se a saída dos dois sensores (Figura 16), a influência do campo gerado pelo atuador é removida da leitura dos sensores, ao mesmo tempo em que a influência devido à presença do ímã do rotor é reforçada.

Figura 15 - Posicionamento dos sensores Hall

Figura 16 - Amplificação diferencial com a saída dos dois sensores

3-3. Caracterização do sensor de posição

Estabelecida a estratégia de compensação, passou-se ao desenvolvimento de uma montagem buscando a viabilidade da estratégia proposta. Os sensores foram fixados em placas de fenolite (Figura 17) e presos consecutivamente ao atuador (Figura 18). Em seguida, algumas características desse sensor foram medidas, sendo elas: (a) curva de calibração (deslocamento vs saída do sensor); (b) nível de ruído; (c) fundo de escala e por fim (d) a linearidade da resposta.

Figura 17 - Sensor Hall fixado no fenolite

Figura 18 - Atuador sensoriado

a) Calibração

No ensaio de calibração foi desenvolvido um dispositivo com grande rigidez e com boa precisão. Assim, para garantir a precisão utilizou-se de um posicionador micrométrico preso em uma base de aço. O ímã foi deslocado a intervalos de 0,5mm dos ímãs utilizados no rotor do mancal magnético em estudo; este arranjo pode ser observado na Figura 19.

Figura 19 - Dispositivo para medida de posição

Neste ensaio foram realizadas medidas da saída do sensor a cada volta do posicionador, ou seja, a cada 0,5mm foi realizada uma medida da tensão de saída, podendo-se, assim, verificar o comportamento do sensor de posição quanto à posição do ímã permanente. Esta curva é mostrada na Figura 20.

Figura 20 - Curva de calibração

b) Nível de ruído do sensor de posição

Caso o ruído do sensor de posição se aproxime muito das grandezas, este pode prejudicar, e muito, as medidas realizadas pelo sensor.

Para mensurar o nível de ruído da saída do sensor de posição, o sensor foi ligado sem nenhum campo magnético aplicado, sendo possível assim verificar a influência dos componentes eletrônicos do circuito de amplificação completo nos ruídos medidos na

saída do sensor. Ao se medir a saída do sensor, como mostrado na Figura 21, o ruído foi de aproximadamente 50 mV em amplitude. Considerando que o ganho do sensor de posição, obtido do ensaio de calibração, é de 700mV/mm, tal ruído pode ser considerado aceitável.

Figura 21 - Ruído do sensor de posição

c) Fundo de escala

Este ensaio deve mostrar ganho suficiente para utilização desse sensor, bem como não estar muito próximo da saturação dos amplificadores na região de trabalho. Para se saber qual o fundo de escala desse sensor, será analisado o resultado da curva de calibração, tendo-se, assim, o máximo e o mínimo e a necessidade de ajuste no ganho da amplificação dos sensores. Esse sensor, como pode ser observado na Figura 20, responde satisfatoriamente entre 0 e 50 mm e tem saída de 0 a 8,5V. Como as medidas que se deseja realizar neste trabalho são de aproximadamente 0 a 6mm, esse fundo de escala é suficiente.

d) Linearidade

A curva de calibração levantada anteriormente neste trabalho foi analisada também para verificar-se a linearidade da resposta e ganho do sensor de posição para os intervalos de trabalho entre o rotor e o motor. O intervalo de trabalho do sensor de posição é de aproximadamente 0 a 6mm. Assim, esse sensor apresenta linearidade e ganho suficiente para a região de trabalho especificada neste estudo.

3-4. Experimentos de levitação com o sensor

Mesmo os ensaios com o sensor de posição mostrando-se satisfatórios, ao partir-se para a utilização do mancal propriamente dito, foi encontrado um problema.

Devido à característica comum dos sensores Hall, o sensor mais próximo do rotor e o sensor mais distante operam em diferentes ganhos, uma vez que são submetidos a campos magnéticos de diferentes intensidades. A saída de cada sensor foi amplificada independentemente e, assim, o ganho de cada amplificador foi ajustado de tal modo que, ao se aplicar um degrau de corrente no atuador, a saída após o somador se torne nula. Contudo, na presença do ímã do rotor, o ganho de cada sensor se altera pelo motivo descrito anteriormente e a compensação deixa de ocorrer.

Para melhor visualizar essa alteração do sensor foram realizadas simulações em elementos finitos dos campos magnéticos envolvidos assumindo-se uma corrente de 1A no atuador. Assim as Figura 22 e Figura 23 mostram, respectivamente, o campo magnético em volta do atuador com e sem a presença do ímã permanente do rotor. Nos gráficos, as cores mais claras indicam maior, de modo a demonstrar claramente que na ausência do ímã do rotor ocorre a simetria do campo magnético, já quando existe a presença do ímã do rotor é clara a ausência de simetria do campo.

Figura 22 - Campo magnético do atuador sem a presença do ímã do rotor

Figura 23 - Campo magnético do atuador com a presença do ímã do rotor

Visando resolver este problema, duas soluções foram implementadas. Sendo uma, o posicionamento de um ímã do lado inferior do atuador para fazer com que este opere em condições similares ao sensor superior (Figura 24) ou implementando-se um ganho adicional no circuito eletrônico, Figura 25. Assim, esses ganhos eletrônicos seriam ajustados para eliminar a interferência do atuador. Entretanto, a primeira solução configura um ajuste grosseiro e a segunda, um ajuste fino dos sensores

Figura 24 - Sensor compensado

Figura 25 - Eletrônica para compensação dos ganhos

Após concluir uma série de medidas e estudos no que tange ao sensor Hall, o atuador como sensor de posição, baseado em sensores Hall, foi montado no mancal magnético e os ensaios de levitação foram iniciados. Ao ativar-se o sistema de controle, o rotor foi levantado em uma posição fixa e estável. Um entreferro de aproximadamente

4mm foi mantido entre o atuador superior (com o sensor de posição) e o ímã do rotor, enquanto o entreferro entre o atuador inferior e rotor ficou com aproximadamente 6mm. A Figura 26 mostra a o rotor durante levitação.

Figura 26 - Rotor levantado

Figura 27 - Resposta do sensor com o rotor levantado

3-5. Discussão dos resultados

Através do experimento de levitação do rotor no mancal magnético, fica validada a estratégia proposta para a compensação da influência do campo gerado pelo atuador eletromagnético na leitura do sensor Hall.

No experimento de levitação citado, a sua funcionalidade só foi possível mediante adoção de entreferros relativamente grandes. Para efeitos práticos, menores valores de entreferro são desejáveis para garantir os maiores valores possíveis de rigidez radial. No entanto, os valores de entreferro obtidos durante os testes mencionados acima são o limite, pois, quando esse entreferro é diminuído ainda mais, o ganho do sensor de posição é reduzido drasticamente. Esse problema é decorrente da saturação do sensor. Assim, quando o entreferro entre o atuador e o ímã do rotor é diminuído, a densidade de fluxo magnético no atuador superior ultrapassa os valores de saturação do sensor, fazendo com que o sensor do lado inferior do atuador tenha seu ganho mantido, enquanto o sensor mais próximo do rotor fica com seu ganho diminuído. Nessa condição a compensação deixa de ter efeito. O sensor passa a medir o fluxo magnético gerado pelo atuador tornando o sistema instável. A solução desse problema é simples. Uma vez que todo o problema decorre da saturação de um dos sensores Hall, basta empregar-se um sensor que sature a valores maiores de densidade de fluxo magnético. Neste trabalho, optou-se por não se dispensar mais tempo na confirmação dessa solução.

Visando minimizar o problema acima citado e obter valores menores de entreferro, uma segunda solução foi estudada para a compensação do sinal do sensor Hall. A segunda estratégia consiste na simulação do efeito sobre o sensor Hall, do campo gerado pelo atuador.

3-6. Solução

A Figura 28 mostra a leitura do sensor Hall quando um degrau de corrente é aplicado no atuador eletromagnético. Conforme previsto na Figura 9, a resposta do atuador - sistema que compreende o amplificador de corrente e o eletroímã - é um sistema simples de atraso de primeira ordem. Portanto, a criação de um modelo desse tipo é simples e pode ser implementado de maneira analógica ou digital. Assim, tendo-se o sinal de entrada no atuador (saída do controlador) e o modelo, é possível prever a influência do atuador sobre a saída do sensor Hall.

Figura 28 - Resposta do sensor Hall a um degrau na bobina

Capítulo 4. Compensação por meio de modelos

4-1. Métodos propostos

Em razão de algumas limitações verificadas no primeiro método de compensação apresentado no capítulo anterior, outros dois métodos foram estudados. Estes dois métodos consistem na compensação do sinal do sensor Hall através de modelo do atuador eletromagnético.

No primeiro método, a compensação foi realizada através da remoção da influência do campo magnético gerado pelo atuador do sinal do sensor através de um algoritmo de controle. Nessa estratégia, linhas adicionais de comando são inseridas no programa de controle. O programa deve conter a função de transferência do sensor em relação ao atuador que será realmente utilizado para que seja possível calcular numericamente a influência exercida pela bobina. Assim, utilizando-se dessa função de transferência, é possível separar o sinal de posição gerado pelo rotor do sinal gerado pelo campo magnético do atuador, já que a corrente enviada ao atuador é fornecida por esse mesmo programa, podendo, assim, utilizar somente um sensor Hall para o controle de posição.

Já, num segundo método, propõe-se o emprego de um filtro RC para mimetizar a resposta do conjunto bobina-sensor. O filtro recebe a mesma corrente que é enviada ao atuador. Em seguida, a saída do filtro é subtraída da saída do sensor Hall. Com isso se obtém posição do rotor sem a influência do atuador.

Para ambas as técnicas de compensação, o primeiro passo foi o levantamento da função de transferência do conjunto atuador-sensor. O levantamento desta função de transferência está descrita no tópico seguinte.

4-2. Modelagem matemática do conjunto bobina-sensor

Primeiramente, obteve-se a transferência do conjunto bobina-sensor. Visando encontrar essa função, um experimento foi realizado. Analisando-se a resposta do sistema para uma entrada em degrau e a resposta do sistema eletroímã e sensor Hall (Figura 28) levantou-se o diagrama de bode e de fase do sistema, Figura 29.

Figura 29 - Gráfico de bode experimental

O diagrama mostra que o sistema estudado apresenta comportamento muito próximo a um atraso de 1ª ordem, portanto o sistema pode ser modelado pela equação de um circuito RC.

Assim, realizou-se essa modelagem onde foram feitos o ajustes dos valores da função de transferência do modelo matemático com os resultados experimentais, tendo sido descrito na Figura 30, onde se apresenta a função de transferência obtida através do diagrama de bode comparando-se o resultado experimental com o modelo matemático.

Figura 30 - Gráfico de bode experimental e teórico

Com o modelo matemático do conjunto bobina-sensor conhecido, foi possível continuar os experimentos para implementar as novas metodologias para compensar a influência do atuador na medida de posição.

4-3. Implementação na malha de controle

Com o modelo matemático encontrado, foram realizadas as modificações na planta de controle proposta por Silva e Horikawa (2000), mostrada anteriormente na Figura 5, para se utilizar o sensor Hall como sensor de posição.

Para utilizar o sensor Hall como sensor de posição, utilizando a compensação da influência do atuador mediante apenas um sensor, foram necessárias algumas alterações na malha de controle. Nesta nova malha de controle, a função de transferência do conjunto atuador-sensor foi inserida, Figura 31.

M: massa do rotor	kt: constante eletromagnética	L: indutância do eletroímã
ks: ganho do sensor	kh: constate magnética	R resistência do eletroímã
ka: ganho do amplificador	kb: constante de fluxo	

Figura 31 - Planta de controle alterada para a utilização de sensor Hall como sensor de posição

A seguir, mostra-se, passo a passo, a redução deste diagrama de blocos.

Figura 32 - Redução da planta de controle às suas constantes

Primeiramente, o diagrama de blocos foi reduzido e as suas constantes foram analisadas, como mostrado na Figura 32. Em seguida, o sinal de posição teve sua entrada separada, Figura 33.

Figura 33 – Separação da entrada do sinal de posição

Assim, para uma melhor visualização e entendimento o sistema foi redesenhado, conforme Figura 34.

Figura 34 - Reorganização da planta de controle

Reduzindo-se novamente chegamos ao diagrama de blocos da Figura 35, que é o diagrama de blocos de um mancal EPUSP originalmente proposto que emprega um sensor indutivo.

Figura 35 - Funcionamento do sensor Hall como sensor indutivo

Através dessas reduções, sugere-se que é possível realizar a medida de posição com apenas um sensor Hall, desde que se utilizem métodos alternativos para a eliminação da influência do campo do atuador, utilizando-se um modelo matemático do conjunto bobina-sensor. Com esta ultima verificação, pode-se finalmente dar-se início aos estudos de compensação da influência do atuador propriamente dito.

4-4. Compensação por meio de modelo numérico

4-4.1. Utilização de filtros digitais para compensação

Com o modelo matemático pronto, partiu-se para o projeto do filtro digital a ser utilizado, calculando-se os ganhos, refazendo-se a malha de controle e reprojetoando-se o algoritmo de controle.

4-4.2. Cálculo dos ganhos do filtro digital

Para utilizar-se de um algoritmo de controle para fazer a compensação da influência do atuador, faz-se necessária a transferência da função do domínio de s para o domínio de z . Ou seja, a equação deve passar do contínuo para o discreto.

Primeiramente se encontrou a frequência de amostragem do controlador utilizado, sendo esta de $320\mu s$, conforme calculado por Mello (2011). Com isso, realizou-se uma comparação dos métodos de transformação utilizando uma função degrau. O método para obtenção da transformada foi o de correspondência de polos e zeros. A curva obtida está mostrada na Figura 36.

Figura 36 - Função degrau da função de transferência e de sua transformada Z

Com $G(z)$ obtida, levantou-se a equação de diferenças para que se encontrassem os ganhos do filtro analógico a ser utilizado. Assim, a equação de diferenças implementada

no algoritmo de controle apresentou-se com os seguintes ganhos, sendo $U(z)$ a saída e $G(z)$ a entrada:

$$U_{(K)} \cong 0,3 G_{(K)} + 0,7 U_{(K-1)} \quad 1$$

Com os ganhos aproximados calculados, deem-se início aos experimentos para verificar a implementação do filtro digital no algoritmo de controle. Assim, com o resultado do experimento, Figura 37, satisfatório, partiu-se para a implementação da equação de diferenças no algoritmo de controle.

Figura 37 - Saída do sensor e do filtro digital

4-4.3. Implementação no algoritmo de controle

A Figura 38 mostra, na forma de fluxograma, o trecho de programa adicionado ao programa principal de controle do mancal EPUSP.

V_c : tensão enviada pelo Hall

$V_{c_{ant}}$: tensão enviada pelo Hall anteriormente

Xk_s : posição do rotor

FT: função de transferência

Figura 38 - Algoritmo proposto por este trabalho

A cada ciclo de amostragem, a tensão enviada aos atuadores naquele ciclo de amostragem (V_c) e a tensão enviada no ciclo anterior ($V_{c,ant}$) são enviados ao bloco que corresponde ao filtro digital, obtendo-se a saída FT . Subtrai-se então da leitura amostrada do sensor (Xk_s , saída do sensor Hall) o valor de FT . Com base no resultado dessa subtração e o valor da posição de referência, o valor do erro é calculado e o resultado enviado ao algoritmo PID.

4-4.4. Dificuldades encontradas

Implementado esse algoritmo, procedeu-se ao teste de levitação. Contudo, não foi possível obter a levitação. Assim que o programa de controle era ativado, o sistema se tornava instável, e o mancal magnético entrava em ressonância a uma frequência elevada. O programa de controle foi revisado exaustivamente, mas não foi possível identificar a causa do problema. A investigação da possível causa do problema era dificultado ainda mais porque a instabilidade do mancal chegou a danificar o amplificador de corrente que aciona os atuadores.

De modo a facilitar os experimentos, optou-se por implementar o filtro, não na forma digital, mas na forma analógica, através de um circuito baseado em amplificadores operacionais.

4-5. Compensação por meio de modelo físico

4-5.1. Utilização de filtros analógicos para compensação

Buscando-se alternativas para simular a influência da bobina no sensor Hall, estudou-se a possibilidade de se utilizar um circuito eletrônico que possibilitasse simular o conjunto bobina-sensor.

Levando-se em conta a resposta do sensor a um degrau, chegou-se à conclusão de que um filtro RC mimetizava de maneira satisfatória a resposta do conjunto bobina-sensor.

Com isso, partiu-se para o projeto do referido filtro e seus ajustes para que este funcione para a compensação da influência do atuador na resposta do sensor.

4-5.2. Projeto do filtro RC

Para projetar o filtro RC a ser utilizado neste trabalho utilizou-se do artifício de mimetizar a função de transferência entre a bobina e o sensor. Com isso, realizaram-se os cálculos para determinar os parâmetros de resistências e capacitância.

Para o cálculo do filtro RC, foi utilizada a função de transferência obtida com o diagrama de bode anteriormente citado (Figuras 29 e 30). Foi constatado que o sistema bobina sensor Hall pode ser aproximado por um atraso de primeira ordem com constante de tempo 0,001612. Assim, era preciso que o produto entre a capacitância C e a resistência R do filtro RC resulte neste valor.

A partir do momento em que os parâmetros do filtro RC foram calculados, construiu-se um circuito. Neste, projetou-se um amplificador de ganho variável para que o filtro RC trabalhe na mesma faixa de operação do sensor Hall, bem como um circuito somador que tem por função fazer a compensação analógica do sinal do sensor, Figura 39.

Figura 39 - Esquema do circuito utilizando-se o filtro RC

Nesta configuração, o algoritmo de controle não sofreu alterações usando a mesma planta de controle utilizada para o primeiro método construtivo citado nesse trabalho, uma vez que, utilizando-se este tipo de configuração, o sensor trabalha da mesma maneira que o sensor de posição anteriormente estudado.

4-5.3. Caracterização do novo sensor de posição

Visando verificar a funcionalidade da nova configuração utilizando um filtro RC para retirar a interferência do atuador no sensor Hall, foram realizados ensaios visando caracterizar o novo sensor de posição desenvolvido.

Nesse novo sensor, por se utilizar um filtro RC para simular o conjunto sensor-bobina, foram necessárias adaptações aos procedimentos e circuitos eletrônicos para realizar-se essa caracterização.

Primeiramente, o circuito eletrônico foi redesenhado para subtrair os sinais gerados pelo filtro RC, que recebe o mesmo sinal enviado a bobina, do sinal recebido pelo sensor Hall.

Com o circuito eletrônico já redesenhado, foi desenvolvido um novo procedimento para serem realizados os ensaios de caracterização do sensor de posição. Para esse ensaio, foi simulada uma condição na qual a bobina recebia uma onda quadrada para simular o ação do controle. Assim, foi possível balancear o ganho do filtro RC com o ganho do sensor Hall. Com esses ganhos ajustados, Figura 40, pode-se perceber que o sinal medido, com o sensor inserido no mancal, será a posição.

Figura 40 - Sinais do filtro RC, sensor Hall e soma

Observa-se que a despeito de um pequeno desvio durante a subida do degrau, o novo circuito desenvolvido que inclui o filtro RC, compensa com boa precisão o sinal do sensor Hall.

O sensor assim obtido foi caracterizado. Foram realizados ensaios de: (a) levantamento da curva de calibração (deslocamento VS saída do sensor); (b) medição do fundo de escala; (c) medição nível de ruído e (d) medição da linearidade da resposta.

a) Calibração

O procedimento para a realização do ensaio de calibração utilizou-se do atuador sensoriado. Primeiramente, injetou-se um sinal neste atuador e realizou-se a verificação dos ganhos, igualando-os na medida do possível. Assim, com esses ganhos balanceados, posicionou-se um ímã permanente idêntico ao utilizado no rotor do DAV proposto (Neodímio-Ferro-Boro cilíndrico com 5mm de diâmetro e 5mm de altura).

Assim esse ímã foi deslocado em intervalos de aproximadamente 0,5mm e a cada intervalo era realizada a medida da tensão de saída do sensor, portanto sendo possível verificar o comportamento desse sensor de posição quanto à movimentação radial do rotor. A curva obtida por este ensaio está mostrada na Figura 41.

Figura 41 - Curva de calibração

b) Fundo de escala

Este ensaio mostrou que o ganho do sensor é suficiente, bem como está distante da saturação dos amplificadores. Para maximizar a rigidez radial, o mancal deve trabalhar com os intervalos entre o rotor e o atuador menores possíveis, assim as medidas neste estudo foram feitas até cerca de 5 mm de intervalo. Neste, pode ser observado na Figura 41 que o sensor responde de maneira satisfatória em todo o intervalo de trabalho desejado. Ou seja, para o intervalo de 0 a 5mm o sensor tem saída de aproximadamente 10 a 4 V. Dessa forma, para o intervalo de trabalho de interesse entre 0 e 4mm, esse fundo de escala é suficiente.

c) Nível de ruído do sensor de posição com o filtro RC

Para se medir o ruído do sensor de posição, o circuito foi ligado sem nenhum campo magnético aplicado no mesmo, verificando-se assim que o sensor possui um ruído muito pequeno quando comparado ao ganho do sensor. A amplitude máxima desse ruído foi de 300 mV, enquanto o ganho do sensor de posição, obtido através da curva de calibração, é de aproximadamente 1,22V/mm. Assim o ruído, mostrado da Figura 42, pode ser considerado aceitável.

Figura 42 - Ruído do sensor de posição

d) Linearidade

Analisando-se a curva de calibração mostrada na Figura 41, verifica-se que o sensor possui uma linearidade razoável para o intervalo de trabalho proposto.

Com os resultados da caracterização do sensor de posição se mostrando positivos, iniciaram-se os experimentos de levitação. Os resultados desses experimentos iniciais estão expostos no tópico a seguir.

4-5.4. Experimentos de levitação com o novo sensor

Antes dos experimentos foram realizados os ajustes dos ganhos do sensor utilizando uma função degrau buscando uma soma mais exata possível.

Nestes primeiros ensaios foram utilizados dois atuadores: inferior e superior, porém não foi possível estabilizar o rotor. Assim que o controle era ativado, o sistema apresentava uma ressonância em alta frequência. Com isso o controle era desativado imediatamente evitando-se assim danos ao sistema de controle, especialmente ao amplificador dos atuadores.

Estudando as possíveis causas da dificuldade em estabilizar o mancal, foram cogitadas diversas possibilidades como: o resto da subtração do sinal do sensor Hall e do filtro RC e potência do amplificador utilizado ser inferior à necessária. Tais

possibilidades foram exaustivamente exploradas e corrigidas na medida do possível, mas nenhuma possibilitou uma levitação estável do rotor.

Portanto, com o intuito de operar o mancal na forma mais simples possível, o atuador inferior foi removido, além do atuador com o sensor Hall ser instalado na parte superior do rotor. Com essa configuração, finalmente se obteve uma levitação estável do rotor. A Figura 43 mostra a foto do rotor sendo levitado de forma estável.

Figura 43 - Rotor levitado utilizando sensor com filtro RC

4-5.5. Resultados

O ultimo resultado apresentado acima demonstra de forma suficiente a eficácia da segunda estratégia apresentada para o uso do sensor Hall. Em lugar de dois sensores Hall (a primeira estratégia proposta), aqui se emprega somente um sensor Hall. A influência do fluxo magnético gerado pelo atuador eletromagnético é removida através do uso de um modelo que reproduz o comportamento do atuador eletromagnético.

O uso de somente um atuador eletromagnético implicou exigir menos esforço de controle do atuador eletromagnético. Ao invés de estabilizar dois pares magnéticos em

modo de atração, o atuador passou a ser solicitado para estabilizar somente um par magnético na parte superior do mancal. E essa redução no esforço desenvolvido pelo atuador permitiu o funcionamento do mancal. Isto sugere a ocorrência de algum problema relacionado à saturação – provavelmente do sensor Hall, ou um problema relacionado a não linearidade da resposta do sensor. De qualquer forma, os trabalhos foram interrompidos nesse momento, uma vez que o objetivo deste trabalho era demonstrar a viabilidade de emprego de sensor Hall para a medição da posição do rotor e o controle do mancal magnético. Portanto, ao final, o objetivo deste trabalho foi atingido.

Em item anterior se descreveu uma forma de se implementar o modelo do atuador eletromagnético através de um modelo digital. Porém, não foi possível realizar a levitação do rotor por meio desse modelo. Foi cogitada a possibilidade de o problema ter sido decorrente da saturação de variáveis dentro do programa computacional mas cabe observar que além deste problema, o mesmo problema visto na levitação do rotor utilizando sensor com filtro RC pode ter ocorrido.

Capítulo 5. Conclusão

5-1. Conclusões

Este trabalho teve como objetivo estudar a possibilidade de uso do sensor Hall na medição de posição do rotor apoiado por mancal magnético. A motivação para este estudo originou-se do desenvolvimento de uma bomba centrífuga para sangue, no qual o rotor da bomba é levitado por meio de um mancal magnético. No projeto convencional, o mancal magnético empregava um sensor do tipo indutivo que vinha impondo dificuldades na miniaturização do mancal magnético e no desempenho dos atuadores eletromagnéticos empregados no mancal. Diversas estratégias alternativas foram estudadas neste trabalho para a medição da posição do rotor, e o sensor Hall se mostrou a alternativa mais promissora. Contudo, o uso do sensor Hall apresenta um problema: a saída do sensor Hall não altera somente em função do deslocamento do rotor mas também em função do campo magnético gerado pelos atuadores eletromagnéticos. Para a solução desse problema, este trabalho apresentou duas estratégias. Uma, baseada no uso de dois sensores Hall, cada uma fixada a cada extremidade do atuador eletromagnético. Assim, ambos os sensores apresentam uma saída de mesma polaridade mediante deslocamento do rotor. Contudo, apresentam saídas simétricas mediante o campo gerado pelo atuador eletromagnético. Somando-se a saída dos dois sensores, elimina-se a influência do atuador eletromagnético restando somente a saída decorrente do deslocamento do rotor. Já a segunda alternativa é baseada na simulação da influência induzida pelo atuador eletromagnético sobre o sensor Hall. Conhecido o modelo dinâmico do atuador e conhecida a tensão de entrada aplicada ao atuador, calcula-se a saída do sensor Hall em decorrência do fluxo magnético gerado pelo atuador. Essa saída é subtraída do sinal proveniente do sensor Hall. O resultado é a posição do rotor. O trabalho apresenta duas maneiras de implementar o modelo do atuador: digital e analógico.

As duas estratégias acima citadas foram testadas no mancal magnético e se obteve uma levitação estável do mancal. Esses resultados comprovaram a eficácia das estratégias apresentadas.

Diversos problemas foram identificados com relação à aplicação das estratégias. Com relação à primeira estratégia, foram identificados problemas decorrentes da saturação do sensor Hall associada à não linearidade da resposta dos mesmos. Mas

apresentaram-se soluções para minimizar tais problemas. Já quanto à segunda estratégia, a levitação estável foi obtida somente através do modelo implementado na forma de um filtro analógico implementado por meio de amplificadores operacionais e mediante alteração da configuração do mancal. A pesquisa foi encerrada sem que tivesse sido identificada a causa das dificuldades na levitação pelo segundo método. Contudo, o sucesso da levitação deixa claro que a estratégia de compensação dos sinais do sensor Hall é válida.

Embora se tenha tomado como base o mancal proposto por Silva e Horikawa (2000), acredita-se que as técnicas de medir a posição apresentadas neste trabalho sejam eficazes com relação a outras variedades de mancais magnéticos.

5-2. Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros, ficam as tarefas de:

- Implementar a compensação com o uso de dois sensores, usando-se sensores capazes de operar mediante valores maiores de fluxo magnético, possibilitando assim a obtenção de entreferros menores e, por conseguinte, de rigidez mais elevada nas direções radiais do rotor.
- Estudar e identificar as causas da instabilidade do mancal quando se emprega somente um sensor Hall e se faz a compensação por meio de modelo do atuador eletromagnético. Identificada a causa, realizar o controle do mancal na sua configuração usual (dois atuadores, um em cada extremidade do rotor), obtendo-se valores usuais de entreferro e rigidez nas direções radiais do rotor.

Capítulo 6. Referências

1. AKAMATSU, T. et al. Recent studies of the centrifugal blood pumps with a magnetically suspended impeller. *Artificial Organs*, 19:631-634, 1995.
2. ALLAIRE, P.E. et al. Prototype of continuous flow ventricular assist device supported on magnetic bearings. *Artificial Organs*, 20:582-590, 1996.
3. ANDRADE, A. et al. Characteristics of a Blood Pump Combining the Centrifugal and Axial Pumping Principles: The Spiral Pump. *Artificial Organs*, 20(6):605-12, 1996.
4. ANTUNES, P. (2007). Estudo e Escolha de Polímeros, Construção de Protótipos e Testes em Câmaras de Bombeamento Pulsátil de Sangue para Dispositivo de Assistência. Sorocaba, 2007. Dissertação Monográfica – Departamento de Saúde, Faculdade de Tecnologia de Sorocaba.
5. ASAMA, J., et al. A new design for a compact centrifugal blood pump with a magnetically levitated rotor, *ASAIO Journal*, 550-556, 2004.
6. BOCK, E., Ribeiro, A., Silva, M., Antunes, P., Fonseca, J., Legendre, D., Leme, J., Arruda, C., Biscegli, J., Nicolosi, D. and Andrade, A. (2008), 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*, 32: 329–333.
7. BOEHM, J. et al. Sensor for magnetic bearings, *IEEE Trans. on Mag.*, 29, 6, 2962-2964, 1993.
8. DELAMARE, J., Suspensions magnétiques partiellement passives, Thèse de doctorat, INPG, Grenoble, France, 1994.
9. FLEMING, A. J.; MOHEIMANI, S. O. R.; BEHRENS, S.; Synthesis and Implementation of Sensor-Less Active Shunt Controllers for Electromagnetically Actuated Systems *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, VOL. 13, NO. 2, March 2005
10. HALL, Edwin; (1879). "On a New Action of the Magnet on Electric Currents". *American Journal of Mathematics* (American Journal of

Mathematics, Vol. 2, No. 3) 2 (3): 287–92. doi:10.2307/2369245.
Retrieved 2008-02-28.

11. HART, M.R., FILIPENCO, G.V. e KUNG, T.V.R, A magnetically suspended and hydrostatically stabilized centrifugal blood pump, *Artificial Organs*, 20:591-596, 1996.
12. Honeywell MICRO SWITCH Sensing and Control, Hall Effect Sensing and Application disponível no dia 12 de setembro de 2008 às 12h38min em: <<http://content.honeywell.com/sensing/pr>
13. HORIKAWA O, Andrade A., Silva I., Bock E., Magnetic Suspension of the Rotor of a Ventricular Assist Device of Mixed Flow Type, *Artificial Organs*, 32(4):334–341
14. SILVA, I Mancais magnéticos híbridos do tipo atração com controle uniaxial.- ed. Ver.-2005. 162 p. Tese (doutorado) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005
15. KOMORI, M.; KAMOGAWA, G. Basic Study of a Magnetically Levitated Conveyer Using Superconducting Magnetic Levitation
16. LEGENDRE, D. F. Estudos de Técnicas de Texturização e Biolização, e Desempenho Biológico In Vitro e In Vivo em Membrana para um Dispositivo de assistência Ventricular e Coração Artificial Totalmente Implantáveis. São Carlos, 2003. 103p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
17. LICHUAN Li, Tadahiko, Shinshi; Shimokohbe, Akira; State Feedback Control for Active Magnetic Bearings Based on Current Change Rate Alone, *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, VOL. 40, NO. 6, NOVEMBER 2004
18. LILIENKAMP K. A., Lundberg K. H., Low-cost magnetic levitation project kits for teaching feedback system design Proceeding of the 2004 American Control Conference, Boston, Massachusetts June 30 . July 2, 2004
19. Magnetic Moments LLC, MBC 500 Magnetic Bearing System Operating Instructions, October 1, 2004

20. MASUZAWA, T., et al. Magnetically suspended centrifugal blood pump with an axially levitated motor. *Artificial Organs*, 27(7): 631, 2003.
21. MIZUNO T., Araki K., Bleuler H., Stability Analysis of Self-sensing Magnetic Bearing Controllers, *IEEE Trans. on control* VOL. 4, NO. 5, September 1996
22. MELLO, O. H., Estudo do controle uni-axial do mancal de levitação magnética do tipo atração para potencia nula (ZPC, zero power control)- ed. ver. Ver. Ver.-2011. 96 p. Dissertação (mestrado) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011
23. MOREIRA LFP, Galantier J, Benício A, Leirner AA, Fiorelli AI, Stolf NAG, et al. Perspectivas da evolução clínica de pacientes com cardiomiopatia chagásica listados em prioridade para o transplante cardíaco. *Rev Bras Cir Cardiovasc*. 2005; 20 (3): 261-9.
24. MUKHOPADHYAY, S. C.; Do we really need sensors? A Sensorless Magnetic Bearing Perspective. 1st International Conference on Sensing Technology November 21-23, 2005 Palmerston North, New Zealand
25. NATIONAL GEOGRAPHIC, O ritmo da vida. São Paulo, ano 7, n. 83, 2007 p 38-63 ISSN: 1517-7211
26. NOJIRI, C. et al. Terumo implantable left ventricular assist system: Results of long-term animal study. *ASAIO Journal*, 46: 117-122, 2000. odinfo/solidstate/technical/Hallbook.pdf >
27. OHJI, T. et al. Investigation of Configuration of Permanent Magnets on Repulsive Type Magnetic Bearing. Fifth Int. Simp. on Magnetic Bearings, 485-490, Kanazawa, Japan, 1996.
28. ONUMA, H. et al. Magnetically levitated centrifugal blood pump with radially suspended self-bearing motor, *Proceedings of the 8th International Symposium on Magnetic Bearings*, 3-8, 2002.
29. POPOVIC, R.S.; FLANAGAN, J.A.; BESSE P.A.; The future of magnetic sensors *Sensors and Actuators A* 56 (1996) 39—55

30. SCHOTT, C.; Racz, R.; Betschart, F.; Popovic, R.S.; , "A new two-axis magnetic position sensor," *Sensors*, 2002. *Proceedings of IEEE* , vol.2, no., pp. 911-915 vol.2, 2002
31. SCHWEITZER, G. A Concept with examples in Active Magnetic Bearings, *Mechatronics*, 2(1): 65-74, 1992.
32. SILVA, I. e HORIKAWA, O. An 1-dof Controlled Attraction Type Magnetic Bearing, *IEEE Transaction on Industry Applications*, 36(4): 1138, 2000.
33. SOUZA, Maria H. L.; Elias, Décio O. *Fundamentos da Circulação Extracorpórea* Centro Editorial Alfa Rio, Rio de Janeiro, Brasil 2006, disponível em: <<http://perfline.com/livro/index.html>>
34. TAKATANI, S. et al. Totally Implantable Total Artificial Heart and Ventricular Assist Device with Multipurpose Miniature Electromechanical Energy System. *Artificial Organs*, 18(1): 80-92, 1994.
35. VISCHER D., Bleuler H., Self-sensing Active Magnetic Levitation, *IEEE Trans. on Mag* Vol. 29, NO. 2, MARCH 1993
36. YAMANE, T. et al. New mechanism to reduce the size of monopivot magnetic suspension blood pump: Direct drive mechanism, *Artificial Organs*, 21(6): 620-624, 1997.
37. YANG (a), S.; Chang, Y.; "Axial and Radial Position Sensing for a Magnetically Levitated Rotor Using Hall Sensors," *Industrial Electronics Society*, 2007. *IECON 2007. 33rd Annual Conference of the IEEE* , vol., no., pp.2225-2229, 5-8 Nov. 2007
38. YANG (b), S.; Lin, C.; "Performance of a Single-Axis Controlled Magnetic Bearing for Axial Blood Pump," *Industry Applications Conference*, 2007. *42nd IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2007 IEEE* , vol., no., pp.963-968, 23-27 Sept. 2007
39. YONNET, J.P. Permanent Magnet Bearing and Coupling, *IEEE Trans. on Mag.*, 17:1169-1172, 1981. Mukhopadhyay S. C., Do we really need sensors? A Sensorless Magnetic Bearing Perspective, *1st International Conference on Sensing Technology*, November 21-23, 2005 Palmerston North, New Zealand