

07

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA E DE
SISTEMAS MECÂNICOS**

**ANA EUN MI LEE
CARLOS AUGUSTO FERREIRA FERNANDES**

**Aplicação de mancal magnético no dispositivo de auxílio
ventricular do Instituto Dante Pazzanese de Cardiologia**

**São Paulo
2006**

ANA EUN MI LEE
CARLOS AUGUSTO FERREIRA FERNANDES

nota final 9.7

(nove e sete)



**Aplicação de mancal magnético no dispositivo de auxílio
ventricular do Instituto Dante Pazzanese de Cardiologia**

Trabalho de formatura apresentado ao departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a conclusão do curso de graduação de Engenharia Mecatrônica.

Área de Concentração: Engenharia Mecatrônica

Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Horikawa

São Paulo
2006

ANA EUN MI LEE
CARLOS AUGUSTO FERREIRA FERNANDES

A. A. (unintelligible)
(unintelligible)
(unintelligible)

Aplicação de mancal magnético no dispositivo de auxílio
ventricular do Instituto Dante Pazzanese de Cardiologia

TE06
L51a

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600012478

FICHA CATALOGRÁFICA

1574795

Lee, Ana Eun Mi
Aplicação de mancal magnético no dispositivo de auxílio
ventricular do Instituto Dante Pazzanese de Cardiologia / A.E.M.
Lee, C.A.F. Fernandes. -- São Paulo, 2006.
p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de
Sistemas Mecânicos.

1.Coração artificial 2.Mancals I.Fernandes, Carlos Augusto
Ferreira II.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Depar-tamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas
Mecânicos III.t.

DEDICATÓRIA

Dedicamos este trabalho a nossos pais (Hong e Yeong; Jair e Ivani).

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Oswaldo Horikawa, pela orientação e pelo estímulo transmitido durante todo o trabalho.

Aos nossos amigos Alexandre, Bruno, César, Pai e Rafael pela companhia e pelo apoio.

Aos companheiros de orientador e de fins de semana e feriados na Poli: Akira, Arthur, Fábio e Ronaldo.

Ao engenheiro biomédico Aron Andrade do Instituto Dante Pazzanese de Cardiologia, pela introdução ao dispositivo de auxílio ventricular.

Ao técnico Maxwell do Instituto Dante Pazzanese de Cardiologia, pela fabricação do protótipo do rotor e do suporte da bancada de testes.

Ao técnico Adilson da Escola Politécnica da USP, pela fabricação das peças necessárias para a realização dos experimentos.

RESUMO

O trabalho tem como objetivo desenvolver o protótipo de um mancal magnético a ser empregado na sustentação do rotor de uma bomba de sangue, um coração artificial, em desenvolvimento no Instituto Dante Pazzanese de Cardiologia - IDPC. No IDPC, foi desenvolvido um dispositivo de auxílio ventricular (DAV) que ajuda na circulação sanguínea de pessoas que possuem o músculo cardíaco enfraquecido, isto é, ele funciona junto com o coração natural da pessoa. Atualmente este dispositivo utiliza um mancal de rolamento, porém ele possibilita apenas um pequeno tempo de vida. Está em desenvolvimento um mancal magnético para um aumento na durabilidade do coração artificial. Esse tipo de mancal foi escolhido, pois não há atrito, não há necessidade de manutenção, permite elevadas rotações e o controle de posicionamento é preciso. O coração artificial é feito de acrílico, pois o corpo humano não tem reações alérgicas a esse tipo de material. Os esforços axiais atuantes são provocados pelo peso do rotor enquanto que as variações da pressão na entrada e na saída do DAV são responsáveis pelos esforços radiais. Aqui é feito um estudo tanto qualitativo, como quantitativo desses esforços, para que o mancal projetado atenda as necessidades de sua aplicação. Além disso, é levada em consideração a temperatura máxima em que o protótipo irá operar, pois uma temperatura muito elevada pode prejudicar o usuário do coração artificial, destruindo suas células sanguíneas. O protótipo desse mancal está sendo baseado em um tipo de mancal já proposto e testado pela EPUSP. Aqui são feitas adaptações necessárias para a sua aplicação no coração artificial. O protótipo é implementado e testado.

ABSTRACT

This work presents the application of magnetic bearing in a Ventricular Assistance Device (VAD) being developed by “Dante Pazzanese” Institute of Cardiology – IDPC (São Paulo, Brazil). The VAD is a type of artificial heart that helps the blood circulation in people who has weakened cardiac muscle. It means that VAD works together with the natural heart. Nowadays, the support system of the rotor of this VAD uses ball bearings, limiting his work life. Suspending the rotor by magnetic forces, the contact of the rotor with any part of the VAD body is eliminated. Therefore, the problem of bearing’s lifetime is optimized. The maximum work temperature is being considered, because high temperature may affect the VAD’s user destroying his blood cells. The bearing’s prototype is based on the magnetic bearing that was developed and tested by EPUSP. Alterations have been made to the VAD’s application. The prototype is implemented and tested.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Coração humano	12
Figura 2. DAV – Dispositivo de Auxilio Ventricular do IDPC.....	13
Figura 3. Configuração do mancal magnético EPUSP	17
Figura 4. Diagrama de blocos do mancal magnético EPUSP.....	18
Figura 5. Mancal magnético desenvolvido pela EPUSP.....	19
Figura 6. Placa de comunicação	20
Figura 7. Amplificador de tensão	20
Figura 8. Esboço do protótipo.....	21
Figura 9. Acoplamento tipo 2.....	22
Figura 10. Vista Inferior do Rotor.....	23
Figura 11. DAV – IDPC com o mancal magnético.....	24
Figura 12. Força magnética entre ímãs de NeFeBo.....	25
Figura 13. Força eletromagnética com um eletroímã de 4000 espiras e com um núcleo de ímã de NeFeBo.....	25
Figura 14. Dimensões do eletroímã da parte superior do DAV	26
Figura 15. Gráfico da linearidade do sensor.....	27
Figura 16. Configuração final do protótipo.....	28
Figura 17. Suporte da bancada de testes.....	29
Figura 18. Diagrama de blocos do projeto eletrônico do mancal magnético	30
Figura 19. Circuito de comparação de sinal	31
Figura 20. Gráfico da tensão de alimentação do circuito comparador.....	32
Figura 21. Gráfico da tensão de saída do circuito comparador	32
Figura 22. Sistema de controle em malha fechada	33
Figura 23. Tela do programa que realiza o controle	34
Figura 24. Rotor.....	35
Figura 25. Ímã permanente na parte superior do rotor	36
Figura 26. Eletroímã na parte superior do suporte da bancada de testes	36
Figura 27. Vista Inferior do rotor	37
Figura 28. Vista lateral do suporte da bancada de testes.....	37
Figura 29. Eletroímã queimado	38

Figura 30. Montagem realizada para a determinação da curva do sensor.....	41
Figura 31. Curva do Sensor.....	41
Figura 32. Gráfico da sensibilidade do sensor.....	42
Figura 33. Linearidade: linha ideal X linha real.....	43
Figura 34. Bancada utilizada para os testes.....	45
Figura 35. Gráfico do sinal de entrada do sensor e do sinal de saída do controle ...	46
Figura 36. Rotor flutuando	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Especificações Técnicas do sensor.....	27
Tabela 2. Parâmetros do controlador PD	33
Tabela 3. Resultados dos experimentos.....	44

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 Dispositivo de auxílio ventricular - DAV.....	12
1.2 O DAV do Instituto Dante Pazzanese de Cardiologia	13
1.2.1 O mancal hoje utilizado e seus problemas	14
1.2.2 Esforços no mancal atual	14
1.3 Mancal magnético: vantagens e desvantagens	14
2. OBJETIVO	16
3. O MANCAL DESENVOLVIDO PELA EPUSP	17
4. LEVANTAMENTO DAS ADAPTAÇÕES DO MANCAL	21
4.1 Controle da posição radial e axial	22
4.2 Sensor do controle do posicionamento	27
4.3 Definição da arquitetura	28
5. PROJETO MECÂNICO DA BANCADA DE TESTES	29
6. PROJETO ELETRÔNICO	30
7. PROJETO DO CONTROLE	33
8. IMPLEMENTAÇÃO	35
8.1 Projeto Mecânico	35
8.2 Protótipo.....	37
9. METODOLOGIA.....	38
9.1 Eletroímã.....	38
9.2 Sensor.....	40
9.3 Rotor	43
10. RESULTADOS	46
11. PRÓXIMOS PROJETOS	48
12. CONCLUSÃO.....	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
ANEXO A – CÓDIGO FONTE DO CONTROLE	54
ANEXO B – DESENHOS DE FABRICAÇÃO	65
ANEXO B.1 – ALVO PARA MEDIDA DE DISTÂNCIA.....	66
ANEXO B.2 – CAMISA INTERNA DO ELETROÍMÃ.....	67

ANEXO B.3 – CAMISA EXTERNA DO ELETROÍMÃ.....	68
ANEXO B.4 – CARRETEL PARA ENROLAMENTO DO ELETROÍMÃ	69
ANEXO B.5 – PROTÓTIPO	70
ANEXO B.6 – TAMPA PARA ELETROÍMÃ	71
ANEXO B.7 – ANEL DE AÇO.....	72
ANEXO B.8 – ROTOR	73
ANEXO B.9 – BASE PARA ENCAIXE DO SENSOR.....	74

1. INTRODUÇÃO

1.1 Dispositivo de auxílio ventricular - DAV

O dispositivo de auxílio ventricular é uma bomba de sangue que ajuda na circulação sanguínea de pessoas que possuem o músculo cardíaco enfraquecido, isto é, ele funciona junto com o coração natural da pessoa.

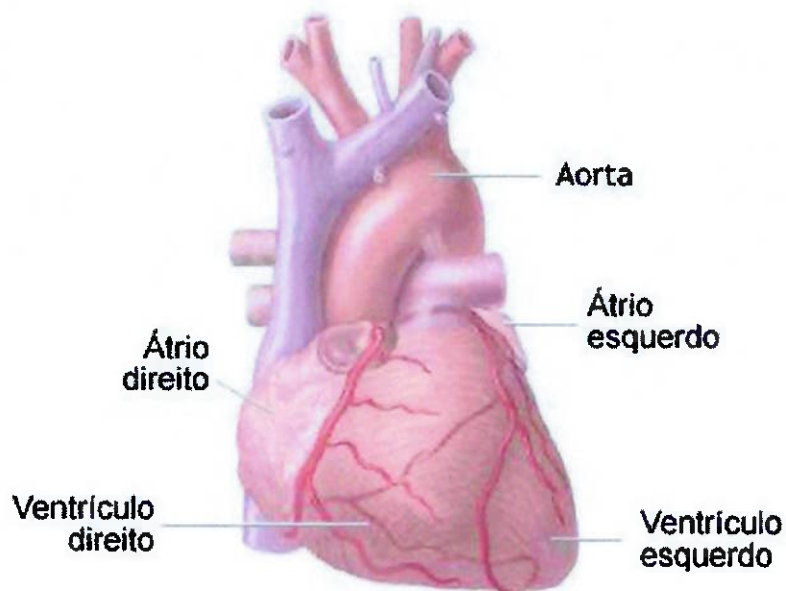


Figura 1. Coração humano

Há dispositivos de auxílio ventricular intracorpóreo e extracorpóreo. O primeiro é implementado dentro do corpo da pessoa enquanto que o segundo é implementado fora do corpo da pessoa. Ambos são interligados através de dutos para a circulação do sangue. Os DAVs podem ser feitos de diversos materiais, entre eles, acrílico, titânio e resina epóxi. Algumas opções para o acionamento do rotor são: motor de corrente contínua Brushless (“sem escovas”), acoplamento magnético e até mesmo acionamento pneumático.

1.2 O DAV do Instituto Dante Pazzanese de Cardiologia

O coração artificial pesa cerca de 500 gramas, tem o corpo produzido em alumínio, diafragma em poliuretano, capa em resina acrílica e conexões de silicone ou plástico. Um motor alimentado por bateria possibilita o fluxo do sangue reproduzindo as funções do coração. Hoje essa bateria e o controlador ficam do lado externo (extracorpóreo), mas a idéia é que no futuro eles sejam internos (intracorpóreo) com recarga feita por um sistema magnético. O motor do coração artificial é movido por duas baterias: uma interna, que fica no abdome e é ligada à peça por fios, e outra externa, localizada em uma bolsa junto à pele, que produz um campo magnético que carrega a bateria interna e fornece energia para o coração auxiliar. A bateria interna só é utilizada quando o paciente precisa se afastar da externa, para tomar banho ou trocar de roupa, por exemplo, mas sua autonomia é de apenas 45 minutos.



Figura 2. DAV – Dispositivo de Auxílio Ventricular do IDPC

1.2.1 O mancal hoje utilizado e seus problemas

O mancal utilizado atualmente é o de rolamento. Com esse mancal, há atrito e, conseqüentemente, desgaste do material, diminuindo assim a sua durabilidade. Dessa forma, um dos problemas existentes no DAV-IDPC é sua vida útil.

1.2.2 Esforços no mancal atual

Atualmente os esforços no mancal não são conhecidos quantitativamente, apenas qualitativamente. Sabe-se que há um esforço devido ao peso do rotor e esforços radiais devido à variação de pressão na entrada e saída do dispositivo de auxílio ventricular.

Na entrada a pressão varia de 0 a 120 mmHg e na saída a pressão varia de 80 a 120 mmHg. Esses valores foram obtidos pelo estudo do funcionamento do coração humano.

O peso do rotor será responsável pelos esforços axiais enquanto que as variações de pressão na entrada e saída do sangue são responsáveis pelos esforços radiais.

A distancia necessária para que o sangue possa passar deve variar entre 1 e 3 mm.

1.3 Mancal magnético: vantagens e desvantagens

As vantagens dos mancais magnéticos são muitas. Entre elas, podemos citar a ausência de atrito, que foi um dos principais motivos pela escolha desse tipo de mancal. Como não há atrito, não há desgaste. Logo, a vida útil do mancal magnético é maior em relação aos outros. Além disso, o mancal não necessita de lubrificação, não necessita de manutenção, não tem ruído e permite elevadas rotações. Sem

contar com a sua alta precisão, já que o controle de posicionamento ocorre na casa de nanômetros.

Já as desvantagens são alimentação e aquecimento. Como o mancal magnético opera em uma ampla faixa de temperatura, ele pode alcançar altas temperaturas e ainda continuar funcionando. Porém, dependendo da sua aplicação a temperatura de operação não pode ser muito elevada.

2. OBJETIVO

O projeto tem como objetivo desenvolver um protótipo de um mancal magnético a ser empregado na sustentação do rotor de uma bomba de sangue (um coração artificial) em desenvolvimento no Instituto Dante Pazzanese de Cardiologia - IDPC. No IDPC, foi desenvolvido um dispositivo de auxílio ventricular (DAV) que ajuda na circulação sanguínea de pessoas que possuem o músculo cardíaco enfraquecido, isto é, ele funciona junto com o coração natural da pessoa.

Atualmente este dispositivo utiliza um mancal de rolamento, porém ele possibilita apenas um pequeno tempo de vida. Está em desenvolvimento um mancal magnético para um aumento na durabilidade do coração artificial. Esse tipo de mancal foi escolhido, pois não há atrito, não há necessidade de manutenção, permite elevadas rotações e o controle de posicionamento é preciso. Os esforços axiais atuantes são provocados pelo peso do rotor enquanto que as variações da pressão na entrada e na saída do DAV são responsáveis pelos esforços radiais.

Está sendo feito um estudo tanto qualitativo, como quantitativo desses esforços, para que o mancal projetado atenda as necessidades de sua aplicação.

O protótipo desse mancal está sendo baseado em um tipo de mancal já proposto e testado pela EPUSP. Estão sendo feitas adaptações necessárias para a sua aplicação no coração artificial. O protótipo será implementado e testado.

Para os testes a serem realizados no protótipo do mancal magnético será fabricada uma bancada de testes. Essa bancada será projetada visando os seguintes pontos: boa visibilidade do experimento, facilidade de usinagem e fácil acesso ao DAV e seus componentes tais como sensor e eletroímãs.

3. O MANCAL DESENVOLVIDO PELA EPUSP

São muitos os estudos já realizados sobre mancais magnéticos, mas a grande maioria dos estudos trata de mancais com controle nos 5 graus de liberdade de um objeto. Uma vez que o controle de cada grau de liberdade requer um sensor, um atuador e um controlador, o sistema como um todo se torna muito complexo em termos de projeto mecânico, elétrico e de controle. Para diminuir essa complexidade, propôs-se uma nova arquitetura de mancal magnético que requer controle ativo em somente 1 grau de liberdade de um rotor, o movimento na direção axial. Este mancal foi desenvolvido na EPUSP. Os movimentos do eixo nas demais direções são restringidos somente pela ação de ímãs permanentes que operam no modo de atração, evitando problemas de desmagnetização.

A Figura 3 mostra o esquema do mancal EPUSP. Um ímã permanente é fixado a cada extremidade de eixo rotativo que passa através de dois atuadores estacionários. Cada atuador é uma combinação de um eletroímã com um ímã permanente. As polaridades de cada ímã proporcionam a presença de uma força de atração agindo entre cada par de ímãs. Assumindo uma distância mínima entre os dois pares de ímãs, assegura-se uma restrição nos movimentos radiais de forma estável. A estabilidade na direção axial é assegurada por uma malha de controle ativo composto por um sensor não contactante, um controlador e um par de atuadores eletromagnéticos. Este controle é necessário uma vez que é impossível obter uma sustentação estável do rotor somente pela ação de ímãs permanentes.

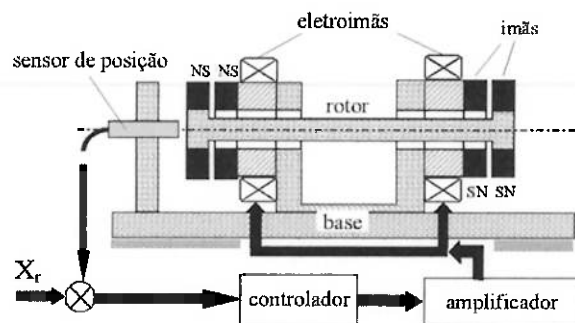


Figura 3. Configuração do mancal magnético EPUSP

A Figura 4 mostra o diagrama de blocos do mancal magnético EPUSP. O controle de todo o sistema é assegurado por um controlador do tipo Proporcional-Integral-Derivativo (PID).

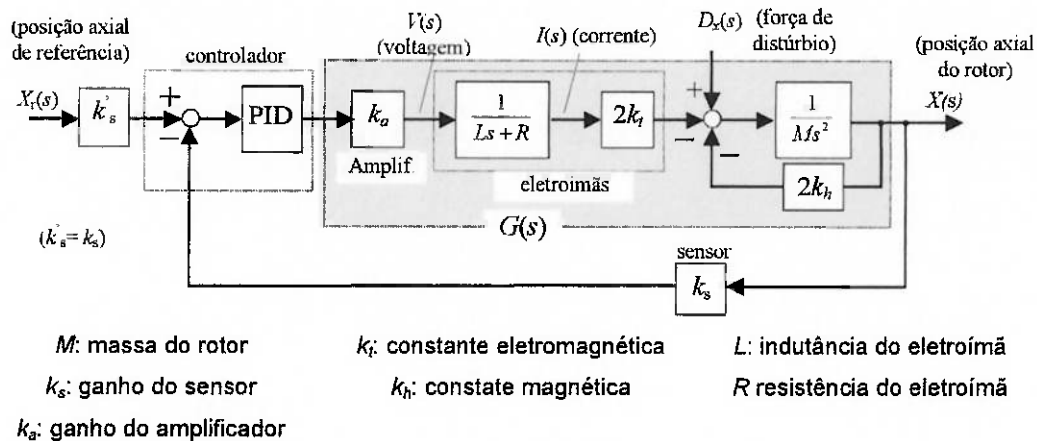


Figura 4. Diagrama de blocos do mancal magnético EPUSP

A Figura 5 mostra a foto do protótipo do mancal magnético EPUSP. O protótipo utilizou ímãs de ferrite. Uma capacidade de carga e uma rigidez elevada podem ser atingidas pela utilização de ímãs capazes de gerar campos mais intensos, como por exemplo, os ímãs de terras raras.

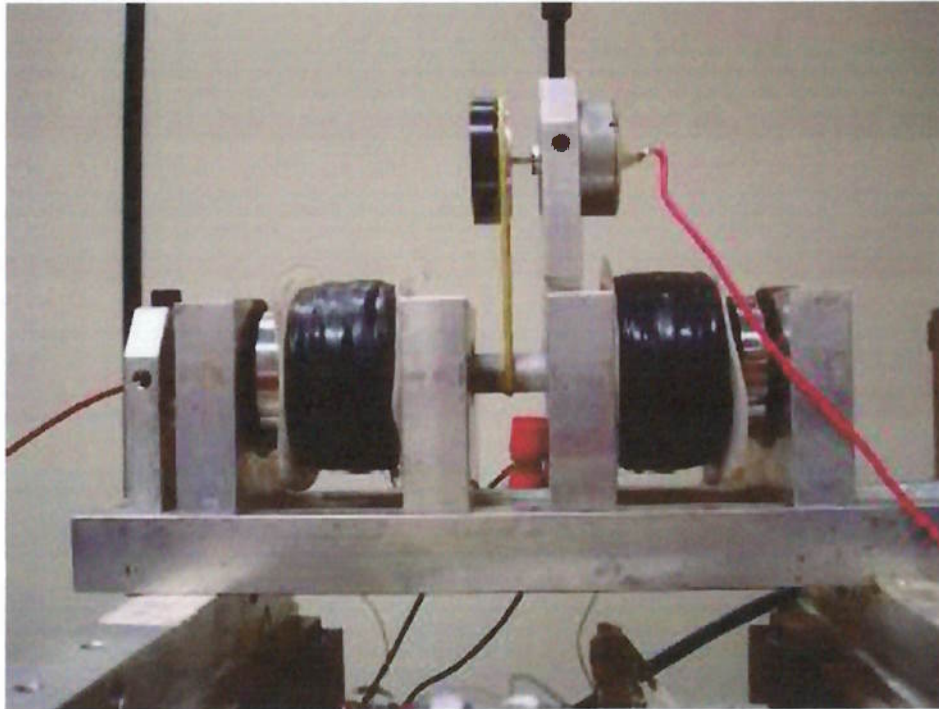


Figura 5. Mancal magnético desenvolvido pela EPUSP

Foi fabricado um eixo para levitar através de um mancal magnético, um sensor de distância é acoplado para o controle da posição axial do rotor (distância entre o mancal e o eixo). O sinal é transformado em tensão elétrica pelo sensor e é enviado para uma placa de comunicação que digitaliza o sinal e envia para o computador. No micro um programa escrito em pascal, interpreta o sinal e aplica o controle dele, gerando um sinal de saída que é enviado para a placa de comunicação, que pode ser vista na Figura 6.

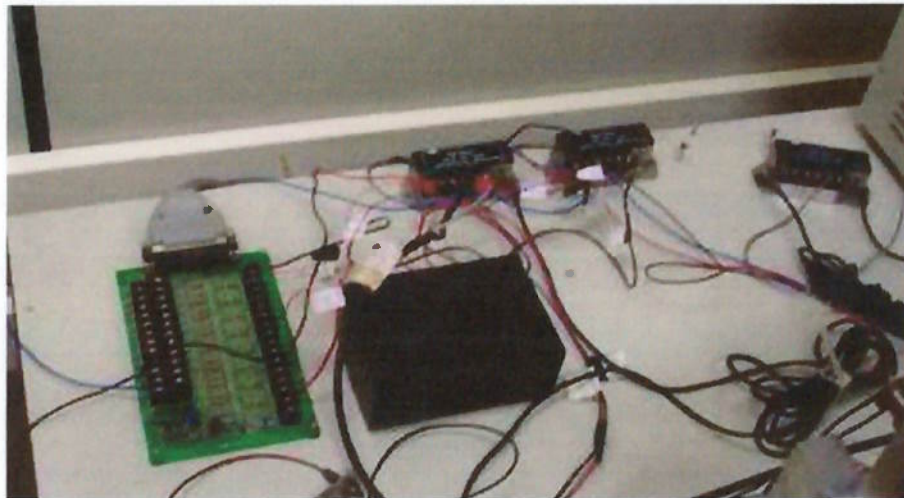


Figura 6. Placa de comunicação

Este sinal é transmitido pela placa para o amplificador de tensão, cuja foto pode ser vista na Figura 7, então o sinal amplificado é enviado ao eletroímã que transforma o sinal elétrico em força magnética para atuação na correção da distância do eixo para o mancal magnético. É necessária a utilização do amplificador de tensão devido à baixa potência do sinal enviado pela placa.



Figura 7. Amplificador de tensão

O mancal desenvolvido é um mancal híbrido. Mancais híbridos consomem menos energia que os mancais duplamente controlados com eletroímãs, pois só necessitam da passagem de corrente quando houver alguma força dinâmica atuando, pois a carga estática pode ser suportada pela força magnética dos ímãs permanentes. Com isso o aquecimento é menor, visto que ele pode ser crítico em algumas aplicações. O consumo de energia também se torna menor.

4. LEVANTAMENTO DAS ADAPTAÇÕES DO MANCAL

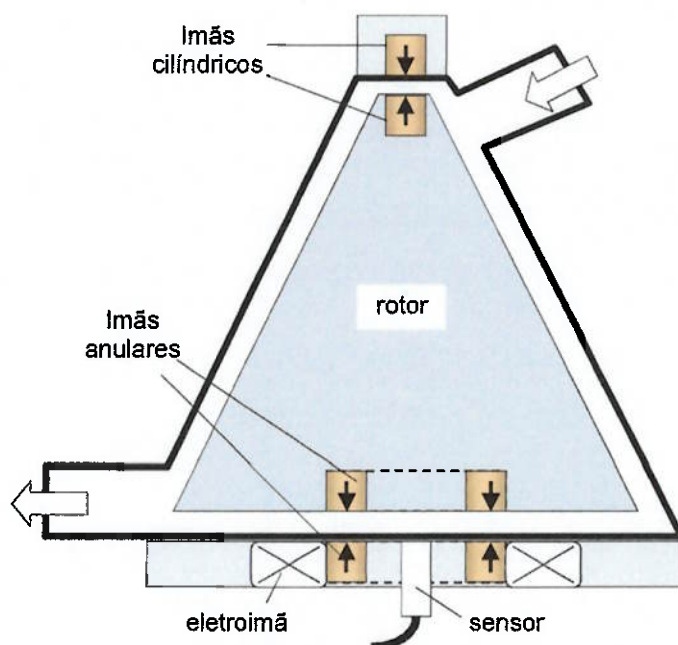


Figura 8. Esboço do protótipo

Uma aplicação direta do mancal EPUSP no DAV-IDPC seria o apresentado na Figura 8. O rotor conterá ímãs permanentes nas extremidades. Confrontando cada ímã do rotor, outro ímã é fixo à carcaça do DAV, mantendo uma folga (entreferro) que é de aproximadamente 2 mm. Os ímãs da parte inferior do rotor são em forma de anel de modo a permitir a instalação do sensor não contactante que mede a posição do rotor. Embora seja usado um atuador somente num dos lados do mancal e o par de ímãs num dos lados do rotor sejam cilíndricos, o princípio de funcionamento do mancal EPUSP é basicamente seguido, tendo-se assim uma sustentação estável do rotor do DAV.

Contudo, tal configuração não é suficiente e, por isso, foi necessário realizar alterações tanto no DAV-IDPC como no mancal magnético EPUSP. A seguir, há um maior detalhamento sobre essas alterações.

4.1 Controle da posição radial e axial

Foi implementado um mancal não contactante (magnético) para se suspender o rotor. O funcionamento desse tipo de mancal é baseado na suspensão do rotor através da força magnética.

Dessa forma, optou-se a utilização de vários ímãs permanentes com polaridades alternadas fixados à base do rotor. Esta configuração foi adotada, pois posteriormente esses ímãs serão utilizados para o acionamento rotativo por meio de eletroímãs. Em oposição aos ímãs permanentes, ao invés de eletroímã há um núcleo de aço fixado à carcaça do DAV (Figura 9). Para um maior detalhamento, ver ANEXO B.7 – ANEL DE AÇO. Neste trabalho, a força magnética do ímã está sendo induzida em uma base de aço. Neste último acoplamento, a força de atração entre cada um dos ímãs e o núcleo de aço em forma de anel assegura uma rigidez radial positiva.

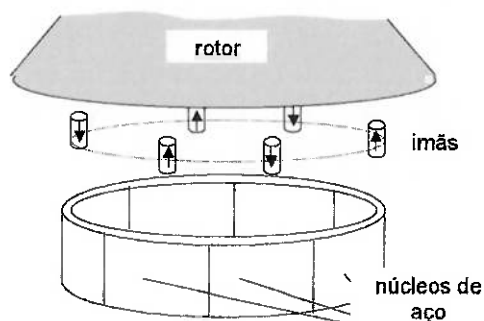


Figura 9. Acoplamento tipo 2

Foi definido que serão utilizados seis ímãs cilíndricos permanentes na base do rotor, cada um com 6 mm de diâmetro e 6 mm de altura, conforme ilustrado na Figura 10. Por gerarem campos mais intensos, os ímãs permanentes utilizados foram os de terras raras.

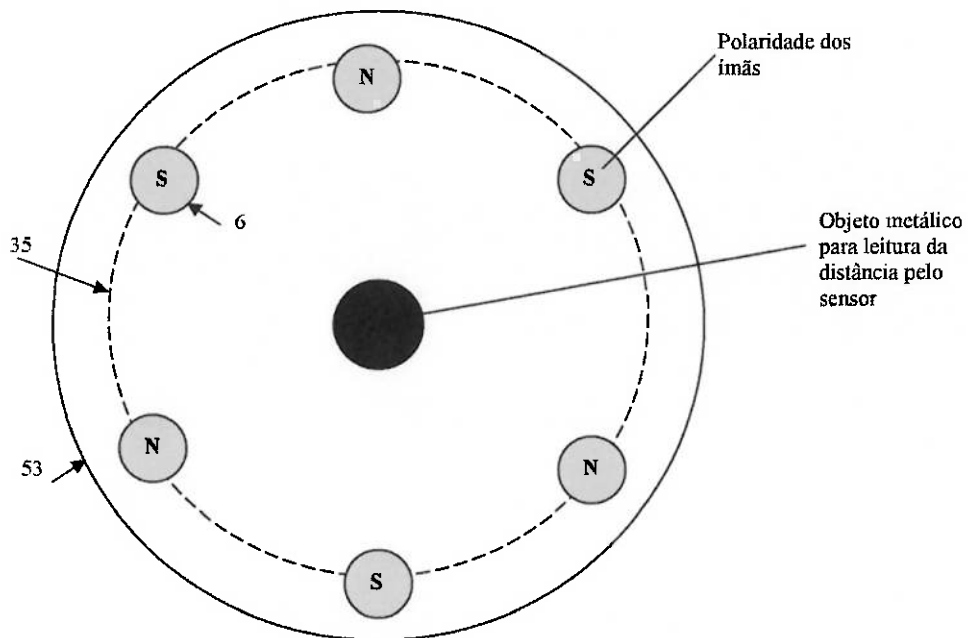


Figura 10. Vista Inferior do Rotor

Para assegurar o controle da posição axial do rotor, optou-se por adotar um eletroímã na parte superior do DAV e um sensor de distância na parte inferior (Figura 11). Dessa forma, quando o rotor sair da sua posição ideal, o sensor faz a leitura dessa posição acionando o eletroímã que realiza a correção.

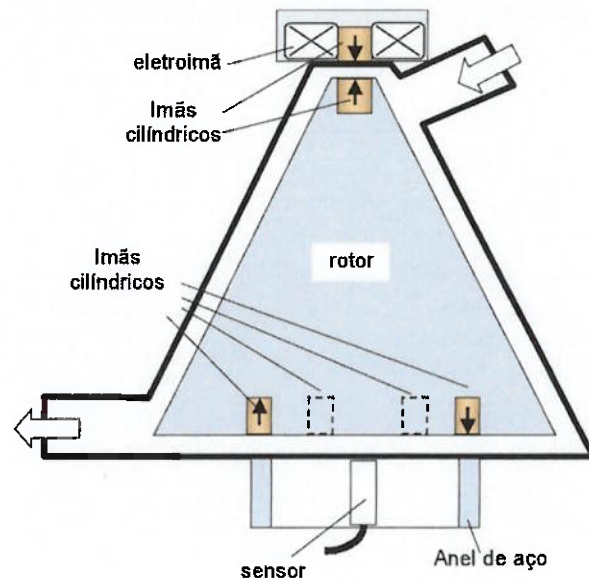


Figura 11. DAV – IDPC com o mancal magnético

Para definir as dimensões do eletroímã da parte superior do DAV foram feitas simulações no MAXWELL 2D. O resultado das simulações pode ser visto nas Figura 12 e Figura 13.

Na Figura 12, a curva superior mostra a força de atracção entre dois ímãs de dimensões iguais, isto é, $\phi 13 \times 13$ mm de altura, já a curva inferior mostra a força entre um ímã de $\phi 13 \times 13$ mm de altura e um outro ímã de $\phi 6 \times 6$ mm de altura. Logo, nota-se que os ímãs de 13 mm de diâmetro possuem uma força de atracção maior que a dos ímãs de 6 mm.

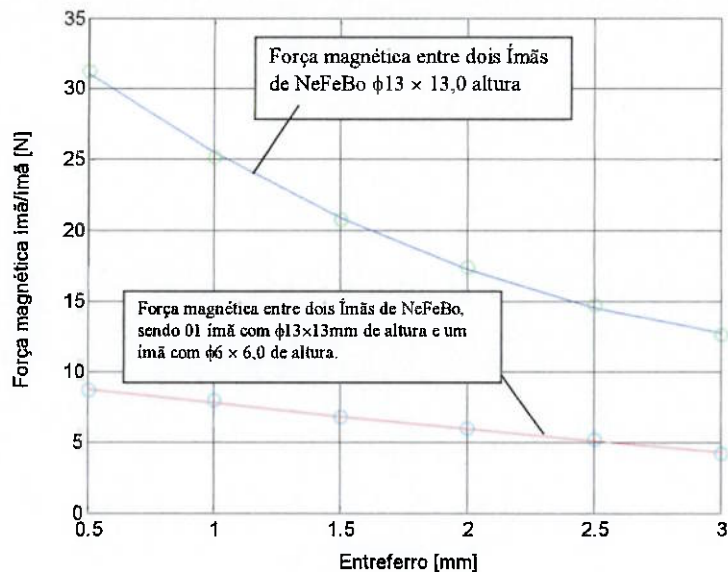


Figura 12. Força magnética entre ímãs de NeFeBo

Na Figura 13, a curva superior mostra a força eletromagnética de atração entre dois ímãs de dimensões iguais, isto é, $\phi 13 \times 13$ mm de altura. Já a curva inferior mostra a força eletromagnética de atração entre um ímã de $\phi 13 \times 13$ mm de altura e um outro ímã de $\phi 6 \times 6$ mm de altura. Pelo gráfico, conclui-se que a força eletromagnética do ímã de 13 mm é maior que a do ímã de 6 mm.

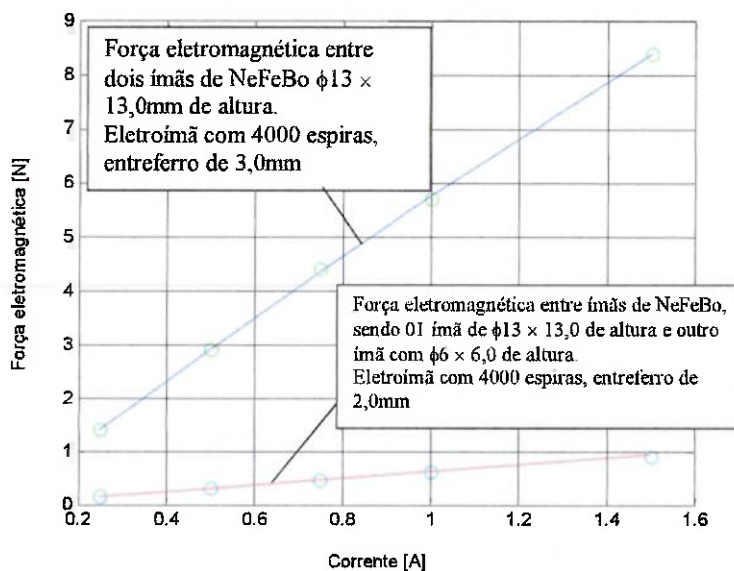


Figura 13. Força eletromagnética com um eletroímã de 4000 espiras e com um núcleo de ímã de NeFeBo

Tendo como base as conclusões tiradas dos gráficos, o ímã escolhido para o eletroímã foi o de 13 mm, e as dimensões do eletroímã da parte superior do DAV podem ser vistas na Figura 14.

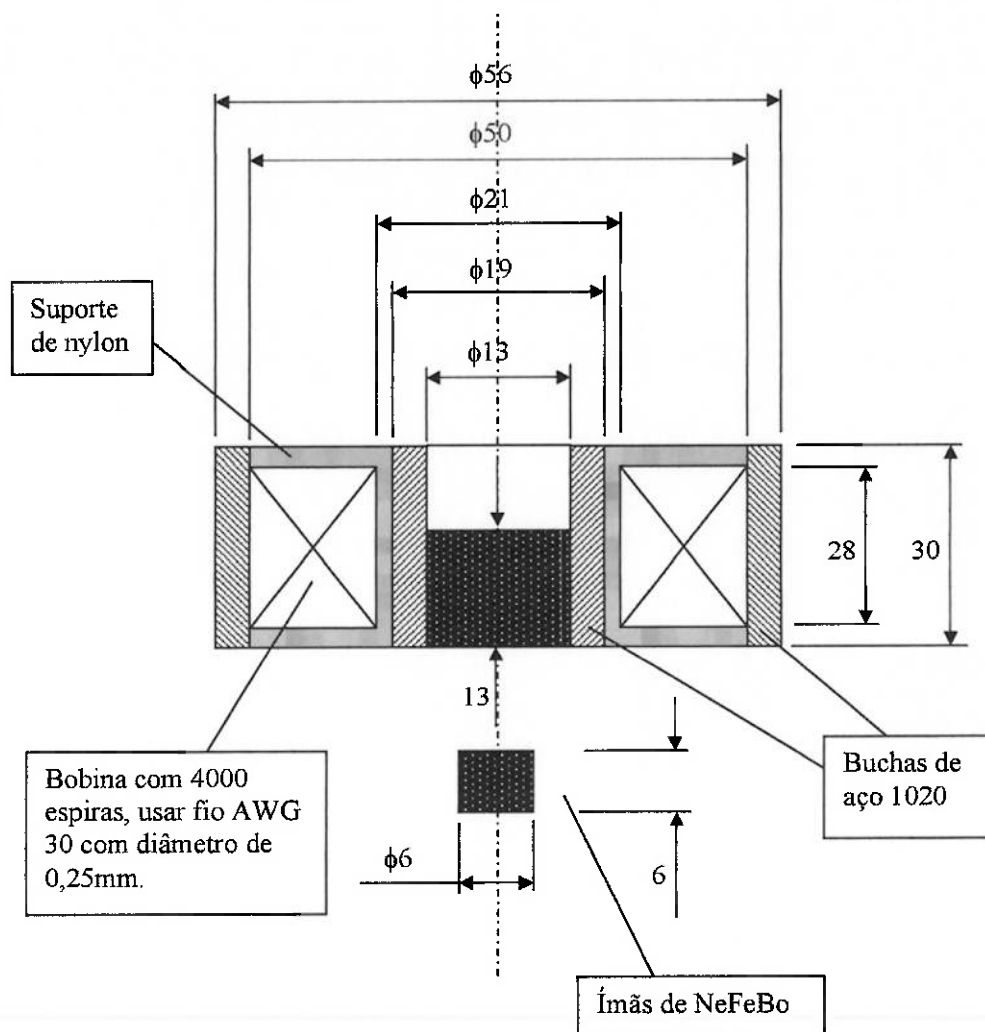


Figura 14. Dimensões do eletroímã da parte superior do DAV

O desenho de fabricação do eletroímã pode ser visto no ANEXO B.4 – CARRETEL PARA ENROLAMENTO DO ELETROÍMÃ.

4.2 Sensor do controle do posicionamento

O sensor do controle do posicionamento se encontra alinhado com o centro da base inferior. Para manter esse alinhamento, foi fabricado um suporte para o sensor que se encontra acoplado ao núcleo de aço. Seu desenho de fabricação pode ser visto no ANEXO B.9 – BASE PARA ENCAIXE DO SENSOR. Como a parte externa do rotor é feita de acrílico, para que o sensor possa fazer o controle do posicionamento, um alvo feito de aço (ANEXO B.1 – ALVO) foi colocado no centro da base.

Como haverá sangue entre o sensor e o alvo, o uso de um sensor ótico foi inviabilizado. Dessa forma, o sensor escolhido foi o do tipo indutivo. Suas especificações técnicas podem ser vistas na Tabela 1.

Modelo do sensor	PU-05
Tensão de saída	± 10 Volts
Resolução	0,5 μ m
Temperatura de operação	-20°C to 180°C
Tensão de alimentação	± 12 Volts

Tabela 1. Especificações Técnicas do sensor

Este sensor foi escolhido por possuir uma resposta linear para materiais como ferro (Iron), alumínio (Aluminum) e aço (Steel), conforme mostra a Figura 15. Dessa forma, a tensão de saída do sensor será proporcional à leitura de distância.

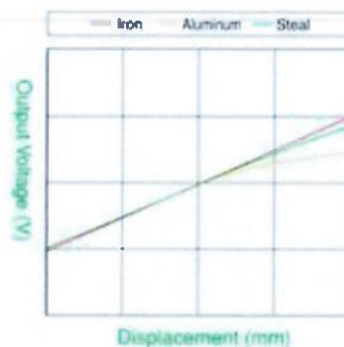


Figura 15. Gráfico da linearidade do sensor

4.3 Definição da arquitetura

A partir das considerações feitas acima, tem-se a configuração do protótipo que está ilustrada na Figura 16.

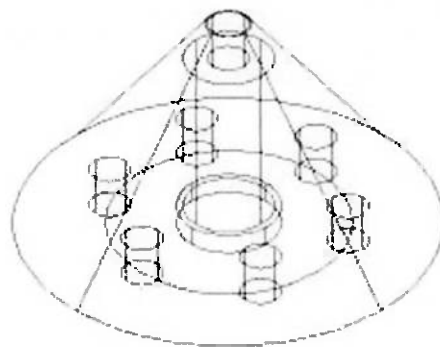


Figura 16. Configuração final do protótipo

5. PROJETO MECÂNICO DA BANCADA DE TESTES

Para testar o DAV com o mancal magnético, foi projetado um suporte que atendesse às nossas necessidades. O suporte projetado está ilustrado na Figura 17.



Figura 17. Suporte da bancada de testes

O suporte possui um eletroímã na parte superior. Na parte intermediária está colocado o anel de aço. Com essa configuração, o rotor flutuará entre a parte superior e a parte intermediária. A lateral possui um pino para regulagem de altura para controlar a distância entre o rotor e as partes superior e intermediária. O espaço existente abaixo do protótipo tem como finalidade facilitar a montagem e a manutenção do sensor de posição. O desenho de fabricação do suporte da bancada de testes pode ser visto no ANEXO B.5 – PROTÓTIPO.

6. PROJETO ELETRÔNICO

Como já foi dito anteriormente, o mancal desenvolvido é um mancal híbrido, ou seja, um mancal composto por ímãs permanentes e por um eletroímã. Há forças magnéticas no mancal devido a ímãs permanentes e estas forças devem equilibrar o posicionamento do rotor no centro sem nenhum contato. Enquanto o eletroímã deve ser acionado apenas quando alguma força externa tentar deslocar o rotor, tirando ele da sua posição de equilíbrio.

Um projeto eletrônico foi desenvolvido para aplicação do mancal magnético. Na Figura 18, podemos ver o diagrama de blocos do seu funcionamento.

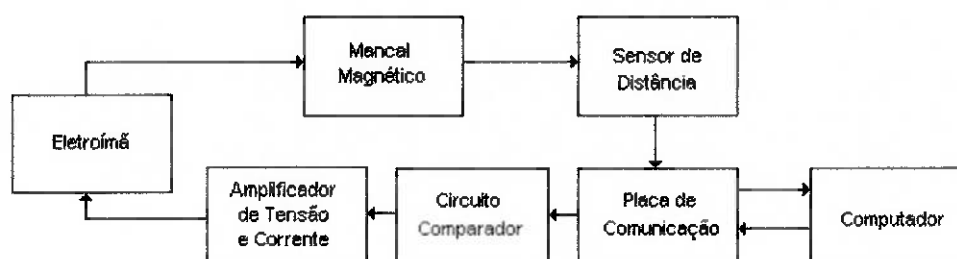


Figura 18. Diagrama de blocos do projeto eletrônico do mancal magnético

A distância é mensurada pelo sensor. O sinal medido varia de acordo com a distância entre a base do rotor e a base que está acoplada o sensor, que neste caso esta dentro de um intervalo de -4 Volts até $+9$ Volts. Quanto mais perto o rotor fica dessa base, mais negativo será o sinal. O sinal passa primeiro pelo driver do sensor de distância e depois é enviado à placa de comunicação, que digitaliza o sinal e o envia ao computador. No computador o sinal é tratado por um controlador PD.

O sinal já tratado é convertido de digital para analógico pela placa de comunicação e segue para um circuito comparador, que pode ser visto na Figura 19.

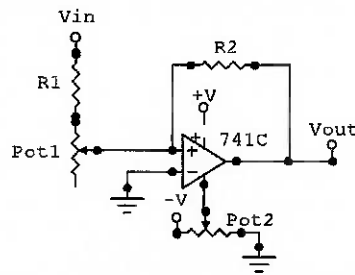


Figura 19. Circuito de comparação de sinal

O circuito recebe o sinal já tratado do computador. Enquanto este sinal, V_{in} , varia de 0 Volts a 10 Volts, o sinal de saída, V_{out} , varia entre -1 Volts e 1 Volts. O componente Pot2 (potenciômetro) é variado para fornecer uma tensão de offset. Os resistores R1, R2 e o potenciômetro Pot1 são ajustados para se obter o ganho do circuito, abaixo podem ser vistas as equações de cálculo do circuito.

$$V_+ = V_- = 0 \text{ Volts}$$

$$I_1 = \frac{V_m - V_+}{R_1 + Pot_1}$$

$$I_2 = \frac{V_{out} - V_+}{R_2}$$

$$I_1 = I_2$$

$$\frac{V_m}{R_1 + Pot_1} = \frac{V_{out}}{R_2}$$

$$V_{out} = GV_m$$

$$G = \frac{R_2}{R_1 + Pot_1}$$

Para $V_{in} = 0$ Volts, tem-se $V_{out} = 0$ Volts, mas como a tensão de offset é -1 Volts, V_{out} será igual a -1 Volts. Para $V_{in} = 10$ Volts, $G = 0,2$ e tensão de offset de -1 Volts, V_{out} será igual a 1 Volts. Os gráficos da tensão de entrada, Figura 20, e de saída, Figura 21, do circuito comparador foram simulados em um software e estão ilustrados para os valores de entrada acima.

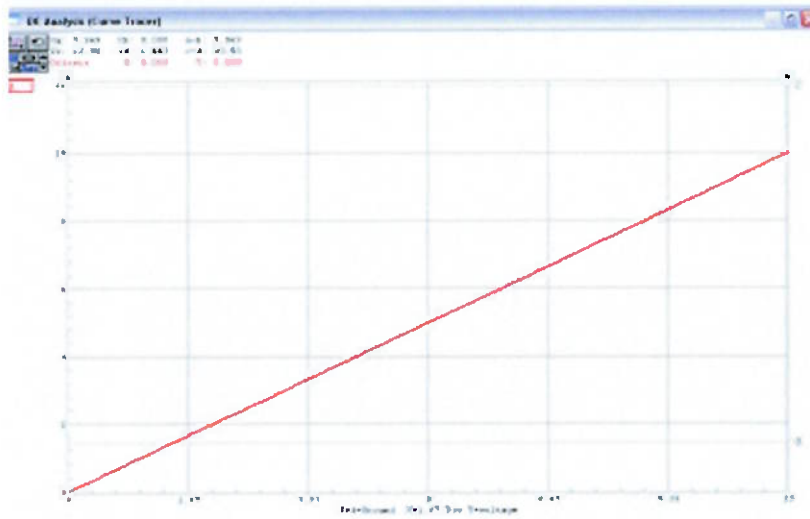


Figura 20. Gráfico da tensão de alimentação do circuito comparador



Figura 21. Gráfico da tensão de saída do circuito comparador

A tensão de saída do circuito comparador é amplificada com um ganho de 7,5 no circuito do amplificador de tensão. Esta tensão alimenta o eletroímã, que é responsável pela correção do posicionamento do rotor.

7. PROJETO DO CONTROLE

Para tratar o sinal enviado pelo sensor de distância foi projetado um controlador PD em malha fechada. Em um sistema de controle em malha fechada há a realimentação do sinal de saída para a entrada (Figura 22).

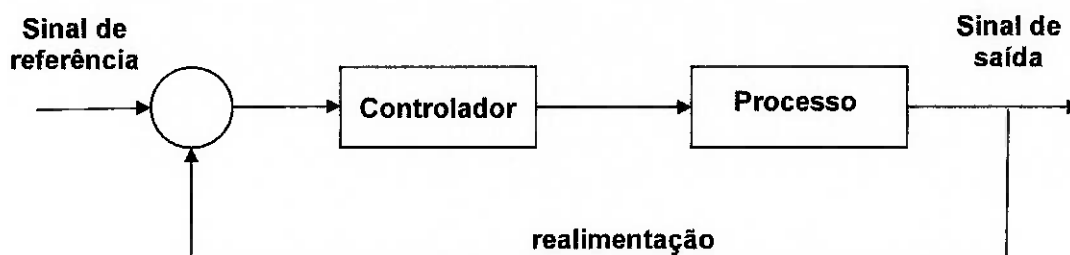


Figura 22. Sistema de controle em malha fechada

Um programa em Pascal foi desenvolvido para realizar a implementação desse controlador. O código fonte do programa pode ser visto no ANEXO A – CÓDIGO FONTE DO CONTROLE.

No início do programa, é necessário entrar com os valores da frequência de amostragem, do ganho proporcional K_p e do ganho derivativo K_d . O programa foi testado para que fosse possível definir os valores que garantem a levitação do protótipo conforme mostra a Tabela 2.

constantes		valores
Frequência de amostragem (Hz)	f	300
Ganho proporcional	K_p	10
Ganho derivativo	K_d	1,6

Tabela 2. Parâmetros do controlador PD

Após a entrada dos parâmetros, o programa recebe o sinal de entrada proveniente do sensor, calcula o valor da saída necessária para a correção da posição do rotor e envia o sinal para a alimentação do eletroímã.

Na Figura 23 é possível ver a tela do programa enquanto o controle do posicionamento está atuando. Essa tela mostra a frequência de amostragem em Hertz, os valores do ganho proporcional e derivativo, o sinal de entrada do sensor e o sinal de saída do computador que realiza o controle em Volts.

```
Inicio de leitura
frequencia de amostragem: 300 Hz
Kp = 10.000
Kd = 1.000
sinal de entrada: -0.132 volts
sinal de saída: 6.776 Volts

Pressione N para novos parametros
Pressione E para finalizar
```

Figura 23. Tela do programa que realiza o controle

8. IMPLEMENTAÇÃO

8.1 Projeto Mecânico

O material utilizado para a construção do rotor e do suporte da bancada de testes foi o polipropileno. Optou-se por utilizar o mesmo material devido à facilidade de aquisição e de usinagem.

Na Figura 24, o formato cônico do rotor pode ser observado.



Figura 24. Rotor

Inicialmente, na parte superior do rotor, foram acoplados dois ímãs permanentes cilíndricos de terras raras: um de 13 mm de diâmetro e 6 mm de altura e outro de 6 mm de diâmetro e 6 mm de altura. Na Figura 25, é possível ver o ímã permanente de diâmetro 6 mm que foi colocado na parte superior do rotor, para que ele junto com o ímã de 13 mm possa sofrer atração ou repulsão ao eletroímã que se encontra na parte superior do suporte da bancada de testes (Figura 26).



Figura 25. Ímã permanente na parte superior do rotor



Figura 26. Eletroímã na parte superior do suporte da bancada de testes

Na Figura 27, encontra-se a vista inferior do rotor. Os seis ímãs permanentes com diâmetro de 6 mm serão atraídos pelo núcleo de aço que se encontra na base intermediária do rotor e o alvo de aço no centro da base inferior do rotor permitirá que o sensor de posicionamento faça a medição da distância entre o rotor e a base.



Figura 27. Vista Inferior do rotor

8.2 Protótipo

Na Figura 28, encontra-se a vista lateral do suporte da bancada de testes. É possível observar que o suporte possui uma altura maior que a área de trabalho para facilitar a realização dos testes e as eventuais alterações realizadas.



Figura 28. Vista lateral do suporte da bancada de testes

9. METODOLOGIA

9.1 Eletroímã

Com toda a estrutura mecânica pronta, foi possível iniciar os ensaios. Um dos ensaios realizados teve como objetivo a determinação da corrente que deve ser fornecida para o eletroímã para que o rotor flutue. Para isso, com o eletroímã desligado, colocou-se o rotor entre as bases intermediária e superior do suporte da bancada de testes. Enquanto na parte superior do rotor, as forças atuantes são entre dois ímãs permanentes, na parte inferior do rotor elas são entre ímã permanente e núcleo de aço. Dessa forma, as forças de atração da parte superior do rotor é maior que a da parte inferior. Com isso, o rotor “gruda” na parte superior do suporte. Logo após, ligou-se o eletroímã e a corrente de alimentação foi sendo aumentada até que o rotor começasse a flutuar. Porém, esse método não funcionou. Com o aumento da corrente, houve um aquecimento excessivo e o suporte do eletroímã que era feito de nylon (material isolante) não agüentou e derreteu, inutilizando o eletroímã como pode ser observado na Figura 29.

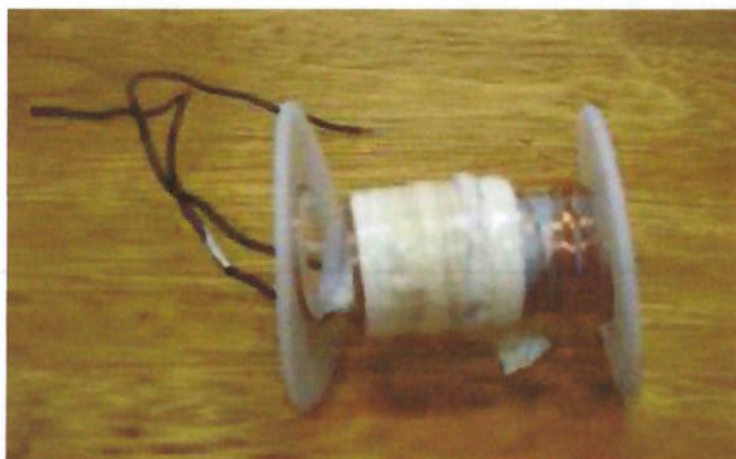


Figura 29. Eletroímã queimado

Dessa forma, um novo eletroímã foi confeccionado para evitar o superaquecimento. Para que isso ocorra devemos diminuir a potência dissipada. Sabendo que:

$$P = Ui$$

$$U = Ri$$

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

$$A = \pi \frac{\phi^2}{4}$$

Onde:

P = potência dissipada

i = corrente

U = tensão

R = resistência do fio

ρ = constante da resistividade

l = comprimento do fio

A = área da seção transversal do fio

ϕ = diâmetro do fio

Dessa forma, tem-se a potência dissipada: $P = \frac{4i^2 \rho l}{\phi^2}$.

Conclui-se então que para diminuir a potência dissipada, o diâmetro do fio foi aumentado de 0,32 mm para 0,52 mm. Agora é preciso diminuir a corrente. Pela Lei de Biot-Savart simplificada, tem-se que o campo magnético gerado por N espiras é:

$$\vec{B} = \frac{N\mu i}{2\pi R}$$

Onde:

\vec{B} = campo magnético

N = número de espiras

μ = permeabilidade magnética

i = corrente

R = raio de cada espira

Dessa forma, quanto maior o número de espiras, maior o campo magnético gerado e menor a corrente necessária. Por esse motivo, aumentou-se o número de espiras de 400 para 700.

Além disso, optou-se por outro método para se encontrar a posição inicial do equilíbrio estável. O novo método consiste em posicionar o rotor entre o eletroímã e o núcleo de aço. Quando o rotor estiver bem próximo da posição de equilíbrio, o rotor começa a vibrar, que é a resposta da atuação do controle. Encontrada essa posição, basta soltar o rotor e verificar se ele flutua ou não.

Se ele não flutuar, verificar qual o comportamento do rotor. Se o rotor estiver se aproximando do eletroímã, significa que a força de atração rotor/eletroímã é maior que a força de atração rotor/núcleo de aço. Logo, deve-se aumentar a distância entre o rotor e o eletroímã. Se houver inclinação do rotor, significa que a rigidez radial está muito baixa. Logo, deve-se diminuir a distância entre o rotor e o eletroímã. Além da mudança da altura da plataforma intermediária, também é possível modificar a distância entre o sensor e o alvo de aço para a obtenção de melhores resultados.

9.2 Sensor

Com o rotor pronto, foi realizado um experimento para determinar a curva do sensor. Para este experimento, alinhou-se o sensor com o centro do alvo de aço da base inferior do rotor conforme ilustrado na Figura 30. O próprio rotor foi utilizado para a determinação da curva, pois por ser um sensor indutivo, alvos de materiais diferentes provocam respostas diferentes no sensor (ver Figura 15). O rotor foi fixado magneticamente a uma guia para que o rotor fosse distanciado do sensor sem perder o alinhamento.

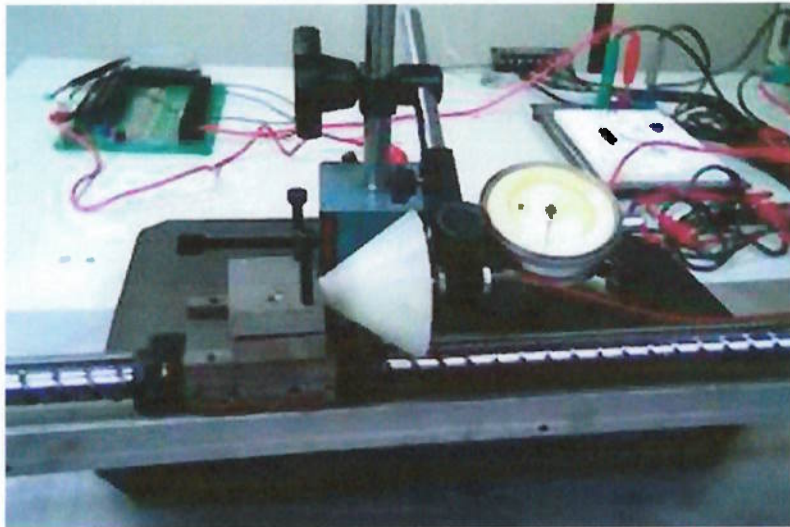


Figura 30. Montagem realizada para a determinação da curva do sensor

Um relógio apalpador foi acoplado junto com o sensor para que fosse possível ter uma medida precisa da distância entre a ponta do sensor e a base inferior do rotor. O experimento iniciou com essa distância igual a zero. Conforme essa distância foi sendo aumentada, a resposta do sensor variava e, desta forma, foi possível plotar os pontos medidos em um gráfico conforme a Figura 31. A distância foi aumentada até o ponto em que a resposta do sensor parou de variar.

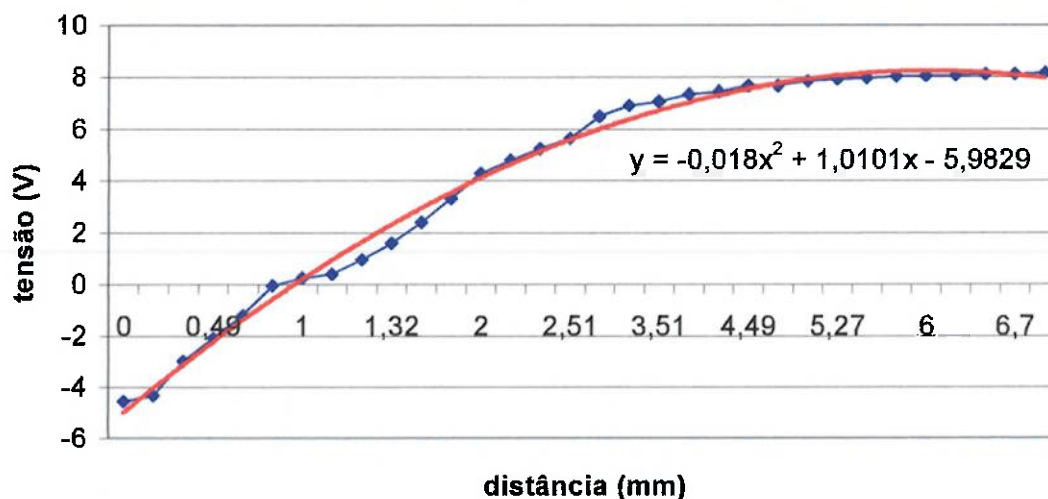


Figura 31. Curva do Sensor

De acordo com as especificações técnicas do sensor, a resposta do sensor é linear, ou seja, o valor da tensão de saída é proporcional à leitura de distância. Porém, de acordo com a plotagem dos pontos, obtivemos uma equação do segundo grau:

$$y = -0,018x^2 + 1,0101x - 5,9829$$

Com a equação acima, a tensão necessária para a flutuação do rotor pode ser facilmente calculada onde x é a distância em mm entre o rotor e o sensor e y é a tensão necessária em Volts.

O fabricante do sensor garante a linearidade para um alvo cilíndrico com o diâmetro 3,5 vezes maior que o diâmetro do sensor (Figura 32). Quando essa relação for menor, há uma diminuição na sensibilidade.

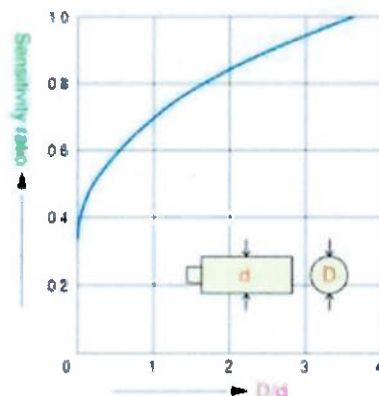


Figura 32. Gráfico da sensibilidade do sensor

No protótipo em questão a relação é $\frac{D}{d} = \frac{15}{7} \approx 2,14$.

Dessa forma, tem-se que a sensibilidade é aproximadamente 0,83. Essa variação na sensibilidade faz com que a resposta do sensor não possa ser representada pela linha ideal, e sim pela linha real (Figura 33).

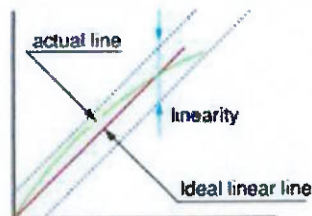


Figura 33. Linearidade: linha ideal X linha real

Vale ressaltar que quando a espessura do alvo é maior que 0,2 mm, sua sensibilidade também não é afetada. No protótipo, a espessura do alvo é 3 mm, logo a sensibilidade não sofreu alterações nesse sentido.

9.3 Rotor

Inicialmente, na parte superior do rotor, foram acoplados um ímã de 6 x 6 mm junto com um ímã de 13 x 6 mm. Porém, com essa configuração, a força de atração entre esses ímãs permanentes e o eletroímã era muito maior que a força de atração entre os 6 ímãs alternados e o núcleo de aço. Com o aumento da distância entre o rotor e o eletroímã, há uma diminuição da força superior. Porém, com o aumento dessa distância, a rigidez radial diminuiu, impossibilitando a levitação do rotor. Além disso, devido à limitação do amplificador de tensão, não foi possível obter o equilíbrio de forças, uma vez que era necessário um valor alto de corrente.

Para solucionar o problema do desequilíbrio de forças, os 2 ímãs permanentes (6 x 6 mm e 13 x 6 mm) foram substituídos por 3 ímãs de 6 x 6 mm. Para o problema da diminuição da rigidez radial, optou-se por aumentar a altura do rotor. Para aumentar a altura, enquanto um ímã de 6 x 6 mm se encontrava na parte superior do rotor, os outros dois ímãs foram acoplados logo acima do rotor. Dessa forma, aumentou-se a altura em 12 mm. Com essa nova configuração, foi possível levantar o rotor, obtendo uma boa aproximação para os valores da frequência de amostragem, do ganho proporcional e do ganho derivativo.

Apesar de ter sido possível a flutuação do rotor, a distância superior (9 mm) era muito maior que a especificação (3 a 5 mm). Para que o projeto atendesse às especificações, o projeto foi submetido a experimentos, sofrendo modificações conforme mostra a Tabela 3.

Configuração		A	B	C	D
Variáveis		valores			
Altura do rotor (mm)		34,5	46,5	40,5	34,5
Ímãs permanentes na parte superior do rotor	Quantidade	2	3	2	2
	Dimensões (mm) (diâmetro x altura)	6 x 6		6 x 6	
		13 x 6	6 x 6	6 x 6	
		-	6 x 6	-	-
Distância entre rotor e eletroímã (mm)		-	7	4,8	6
Distância entre rotor e núcleo de aço (mm)		-	5,9	4,8	5,3
Distância entre rotor e sensor (mm)		-	2	1	1

Tabela 3. Resultados dos experimentos

Após os experimentos, a melhor configuração até o momento, ou seja, que está de acordo com as especificações do projeto, é a configuração C. Quando o rotor estiver bem próximo da posição de equilíbrio, o rotor começa a vibrar, que é a resposta da atuação do controle. Encontrada essa posição, basta soltar o rotor que ele flutuará.

A bancada onde foram realizados todos os experimentos se encontra na Figura 34. É possível observar todos os elementos utilizados: driver, circuito comparador, caixa que contém o amplificador de corrente, suporte com o eletroímã e o núcleo de aço acoplado com o sensor, protótipo do rotor e fonte.

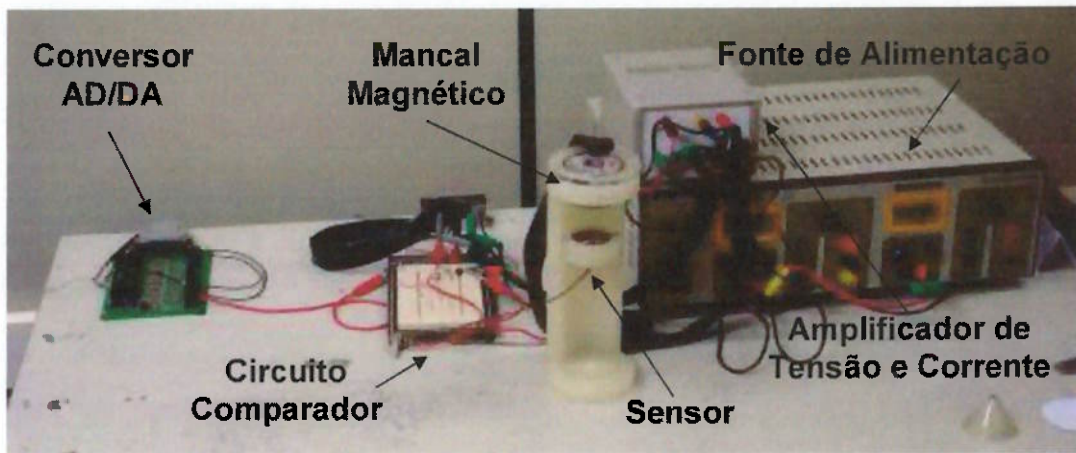


Figura 34. Bancada utilizada para os testes

10. RESULTADOS

O programa utilizado para fazer o controle gera dois arquivos: um com os valores do sinal de entrada e outro com os valores do sinal de saída. Dessa forma, foi possível gerar o gráfico da Figura 35.

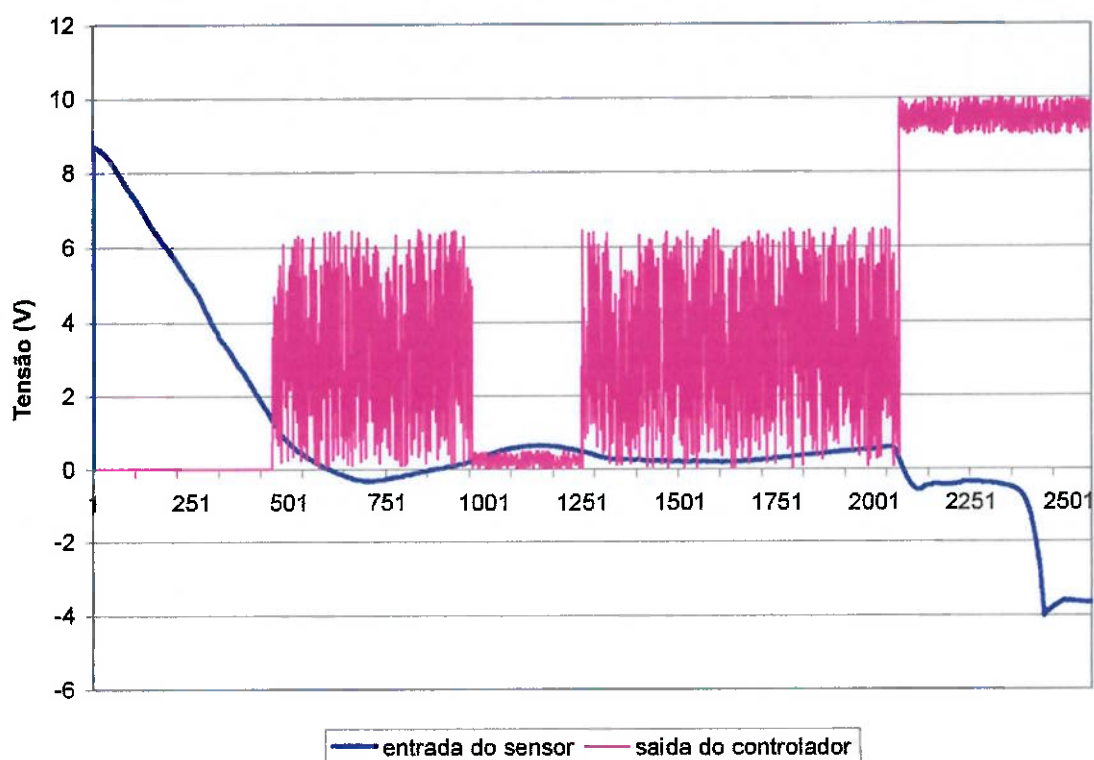


Figura 35. Gráfico do sinal de entrada do sensor e do sinal de saída do controle

A Figura 35 ilustra a situação em que o rotor estava flutuando. Como foi simulada uma situação em que o rotor estava girando, observa-se uma oscilação do sinal de saída do controle. A grande variação do sinal de entrada do sensor ocorre, pois num instante inicial é necessário posicionar o rotor próximo da região de equilíbrio estável. Pelo gráfico nota-se que a posição de equilíbrio do rotor ocorre quando a tensão de saída é próxima a 3 Volts (maior concentração de pontos nessa região: 501 a 1001 e 1251 a 2001).

Na Figura 36, encontra-se uma imagem do rotor flutuando, onde se observa claramente que o rotor está suspenso entre as duas bases, não estando em contato com nenhuma delas.



Figura 36. Rotor flutuando

11. PRÓXIMOS PROJETOS

Para dar prosseguimento ao projeto iniciado foram formuladas as seguintes sugestões:

- Alterar o sensor de distância, será necessário um que possua um ganho alto para distâncias maiores;
- Aumentar o comprimento do rotor para aumentar a rigidez radial;
- Fazer o acionamento rotativo;
- Aumentar o ganho do amplificador de corrente;
- Equilibrar as forças de atração entre o rotor e as bases superior e inferior;
- Diminuir o diâmetro dos ímãs permanentes na base inferior do rotor para aumentar a rigidez radial.

12. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados, pode-se concluir que o objetivo do trabalho foi alcançado, uma vez que houve a levitação do rotor.

O rotor proposto inicialmente pelo projeto flutuou, porém com baixa estabilidade. Devido a isso foram feitas alterações na configuração do protótipo do rotor visando obter uma maior estabilidade à inclinação e ainda assim mantendo as distâncias entre o rotor e a parte superior e inferior dentro das especificações do projeto.

Com a nova configuração, adicionando um ímã na parte superior do rotor, a estabilidade radial aumentou. Foram feitos ensaios com ele e o sinal visto na Figura 35 foi feito com o rotor flutuando e em movimento de rotação.

A rigidez radial aumenta com o inverso da distância entre o rotor e as bases. Só não foi diminuída a distância no projeto porque não houve equilíbrio entre as forças de atração superior e inferior.

No ponto de equilíbrio não há superaquecimento do eletroímã, pois a passagem de corrente por ele não é de grande magnitude. Se as forças de atração responsáveis pela rigidez axial fossem iguais, o consumo de corrente seria ainda menor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SILVA, Isaias. **Mancais magnéticos híbridos do tipo atração com controle uniaxial**. São Paulo: EPUSP, 2003.

ANDRADE, A. et al. **Adaptações finais do projeto do coração artificial auxiliar visando o início das avaliações clínicas**. 2005.

Informações sobre o coração artificial auxiliar. Disponível em: <http://inventabrasilnet.t5.com.br/cora.htm>. Acesso em 20 mar. 2006.

Informações sobre o dispositivo de assistência ventricular. Disponível em: <http://inventabrasilnet.t5.com.br/davincor.htm>. Acesso em: 28 mar. 2006.

HORIKAWA, Oswaldo; ANDRADE, Aron; SILVA, Isaiás; BOCK, Eduardo. **Estudo para aplicação de mancal magnético em dispositivo de assistência ventricular**. São Paulo: 2006.

HILL, Paul Horowitz Winfield. **The Art of electronics**. Cambridge University Press, 1989.

IDOETA, Ivan Valeije; CAPUANO, Francisco Gabriel. **Elementos de Eletrônica Digital**. São Paulo: Érica, 1984.

OGATA, Katsuhiko; MAYA, Paulo Álvaro; LEONARDI, Fabrizio. **Engenharia de Controle Moderno**. São Paulo: Prentice Hall, 2003.

CIPELLI, Antonio Marco Vicari; MARKUS, Otávio; SADRINI, Waldir João. **Teoria e desenvolvimento de projetos de circuitos eletrônicos**. São Paulo: Érica, 2004.

SERWAY, Raymond A. **Física 3: para cientistas e engenheiros com física moderna**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos LTC, 1996.

ANDRADE, A. et al. **Characteristics of a Blood Pump Combining the Centrifugal and Axial Pumping Principles: The Spiral Pump**. 1996. Vol. 20 (6), 605-12.

Arrow International: Products. CorAide™ Left Ventricular Assist System. Disponível em <http://www.arrowintl.com/products/card_assist/>. Acesso em: 19 out. 2004.

CAMPBELL, P. **Permanent Magnet Materials and Their Application**. Cambridge University Press, 1994. Vol. I, 191 p.

DELAMARE, J. **Suspensions magnétiques partiellement passives**. Grenoble, França: Thèse de doctorat, INPG, 1994.

EARNSHAW, S. **On nature of molecular forces**. Trans. Cambridge Philosophical Society, 1939. Vol. 7 – Part 1, 97-112 p.

IBMT. Institut für Biomedizinische Technologien der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. Disponível em <<http://www.hia.rwth->

[aachen.de/research/biomechanik/mikrodiagonal_pumpe.html](http://www.aachen.de/research/biomechanik/mikrodiagonal_pumpe.html)>. Acesso em: 19 out. 2004.

NOSE, Y. **Design and development strategy for the rotary blood pump.** Artificial Organs, 1998. Vol. 22 (6), 438-446 p.

OHJI, T.; Mukopadhyay, S.C.; Kuwahara, T; Iwahara, M. **Investigation of Configuration of Permanent Magnets on Repulsive Type Magnetic Bearing.** Kanazawa, Japão: Fifth Int. Simp. on Magnetic Bearings, 1992. 485-490 p.

SILVA, Isaiás; HORIKAWA, Oswaldo. **An 1-dof Controlled Attraction Type Magnetic Bearing.** IEEE Transaction on Industry Applications, 2000. Vol. 36 (4), 1138.

TAKATAMI, S. et al. **Totally Implantable Total Artificial Heart and Ventricular Assist Device with Multipurpose Miniature Electromechanical Energy System.** Artificial Organs, 1994. Vol. 18 (1), 80-92 p.

Terumo heart, Inc. News and Events. Apresenta notícias e eventos relacionados à marca Terumo®. Disponível em <<http://www.ishlt.org/publications/ishltSocietyNews.asp>>. Acesso em: 19 out. 2004.

Ventracor. The heart Company. Disponível em <http://www.ventrassist.com/product/descrip_cont.html>. Acesso em 19 out. 2004.

WESTABY, S.; KATSUMATA, T.; HOULEL, R.; EVANS, R.; PIGOTT, D.; FRAZIER, O. H.; JARVIK, R. **Jarvik2000 heart: Potential for Bridge to Myocyte Recovery.** *Circulation*, 1998. Vol. 98 (15), 1568-74.

WIESELTHALER, G.M.; SCHIMA, H.; HIESMARY, M.; PACHER, R.; LAUFER, G.; NOON, G.P; DEBAKEY, M.; WOLNER, E. **First Clinical Experience with the DeBakey VAD Continuous-Axial-Flow Pump for Bridge to Transplantation.** *Circulation*, 2000. Vol. 101 (4), 356-359 p.

YONNET, J.P. **Permanent Magnet Bearing and Coupling.** *IEEE Trans.on Mag.*, 1981. Vol. 17, 1169-1172 p.

ANEXO A – CÓDIGO FONTE DO CONTROLE

A seguir, encontra-se o código fonte que realiza o controle da posição axial do rotor. Esse código foi desenvolvido em linguagem Pascal.

```
{*****}
{*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: real;
erro_ant1, erro_ant2: real;
erro, tensao_equilibrio_1, ka: real;
i, n_c: longint;
h, m, u, f: longint;
cn0_ant1, cn0_ant2, saida_controlador: real;
proporcional, derivada, integral, saida_1: double;
p, p_c, K, A, R: 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;

```

```
const
```

```
base = $220;          {endereço base da placa 220h}
```

```
clock_placa = 2e6;
```

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

```
{Arquivos de rotinas}
```

```
{$! janela_1}
```

```
{$! 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');

```

```

gotoxy(5,13);write('Kp = ');
read(Kp);
{gotoxy(5,15);write('Ki = ');
read(Ki);}
Ki := 0;
gotoxy(5,15);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
cascateados}

```

```

    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
```

```
  i := 1;
```

```
  h := 1;
```

```
  m := 1;
```

```
  erro_ant1 := 0;
```

```
  erro_ant2 := 0;
```

```
  cn0_ant1 := 0;
```

```
  cn0_ant2 := 0;
```

```
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];
```

```
  canal[0] := (leitura_digital[0] * 10)/32768;
```

```
end;
```

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

```
procedure Filtro_digital;
```

```

begin
  saida_filtro := 0.5*canal[0] + 0.35*cn0_ant1 + 0.15*cn0_ant2;

  cn0_ant1 := canal[0];
  cn0_ant2 := cn0_ant1;
end;

```

```

{*****}

```

```

procedure entrada_zero;
begin
  {Utilizando referencia interna}
  tensao_de_referencia := 0;
  erro := (tensao_de_referencia - canal[0]);
end;

```

```

{*****}

```

```

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

```

```

{*****}

```

```

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

  {atualizacao de variaveis}

  erro_ant1 := erro;

```

```

erro_ant2 := integral;

saida_controlador := derivada + proporcional + integral;
end;

{*****}

procedure saida;
begin
  tensao_equilibrio_1 := 0; {volts Resistencia da bobina*corrente de equilibrio }
  ka := 10;           {Volts ganho do amplificador}

  saida_1 := ((tensao_equilibrio_1/ka)+saida_controlador);

  {Limitacao da placa do conversor D/A}

  if saida_1 > 2 then
  begin
    saida_1 := 4.9;
  end
  else
  begin
    if saida_1 < -2 then
      saida_1 := -5;
    end;
  end;

  saida_tela := saida_1 + 5;

  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;
```

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

```
{Programa principal}
```

```
begin
```

```
  inicia_modulo_graf;
```

```
  inicio;
```

```
  janela_principal_dav;
```

```
  fecha_grafico;
```

```
  modo_texto;
```

```
  repeat
```

```
    dados_entrada;
```

```
    seta_placa;
```

```
    inicializa_variaveis;
```

```
    periodo_controle;
```

```
    clrscr;
```

```
    repeat
```

```
      sair := 0;
```

```
      fim := 0;
```

```
      le_canais;
```

```
      filtro_digital;
```

```
      entrada_zero;
```

```
      pid;
```

```
      saida;
```

```
      gera_vetores;
```

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

```
      gotoxy(10, 9);write('Kp = ', Kp:2:3);
```

```
      gotoxy(10, 11);write('Kd = ', Kd:2:3);
```

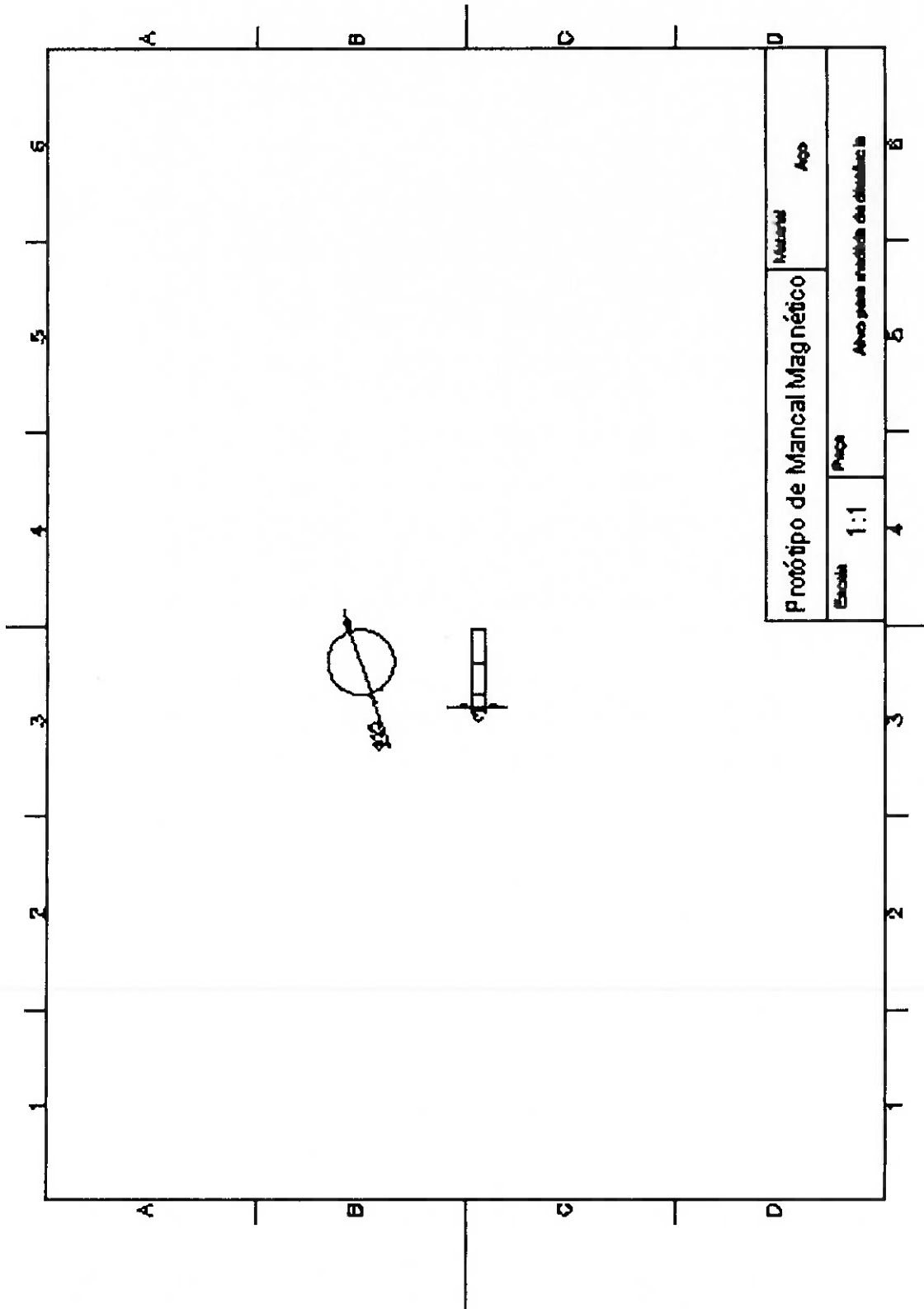
```
      gotoxy(10, 13);write('sinal de entrada: ', canal[0]:2:3, ' Volts ');
```

```
gotoxy(10, 15);write('sinal de saida: ', saida_tela:2:3, ' Volts');
textcolor(red);
gotoxy(10, 19);write('Pressione N para novos parametros');
gotoxy(10, 20);write('Pressione E para finalizar');
textcolor(white);
if (keypressed) then
begin
    tecla_pressionada := Readkey;
    if (tecla_pressionada = 'n') then
    begin
        break;
    end
    else if (tecla_pressionada = 'e') then
    begin
        sair := 1;
        fim := 1;
    end;
end;
until sair = 1;
until fim = 1;
gera_arquivos;
end. {fim do programa}
```

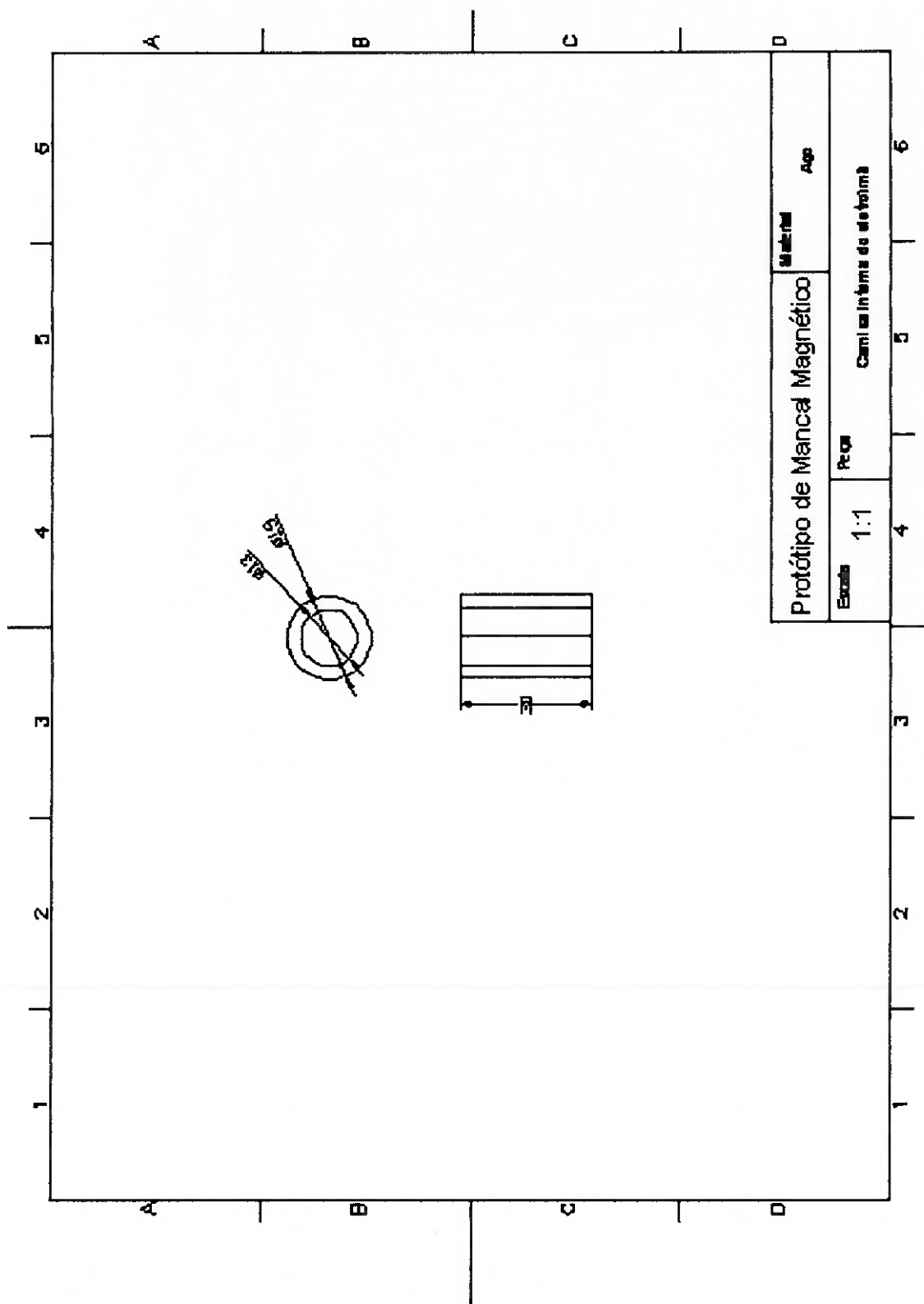
ANEXO B – DESENHOS DE FABRICAÇÃO

A seguir, estão anexados os desenhos de fabricação das peças. Os desenhos foram feitos no AutoCad.

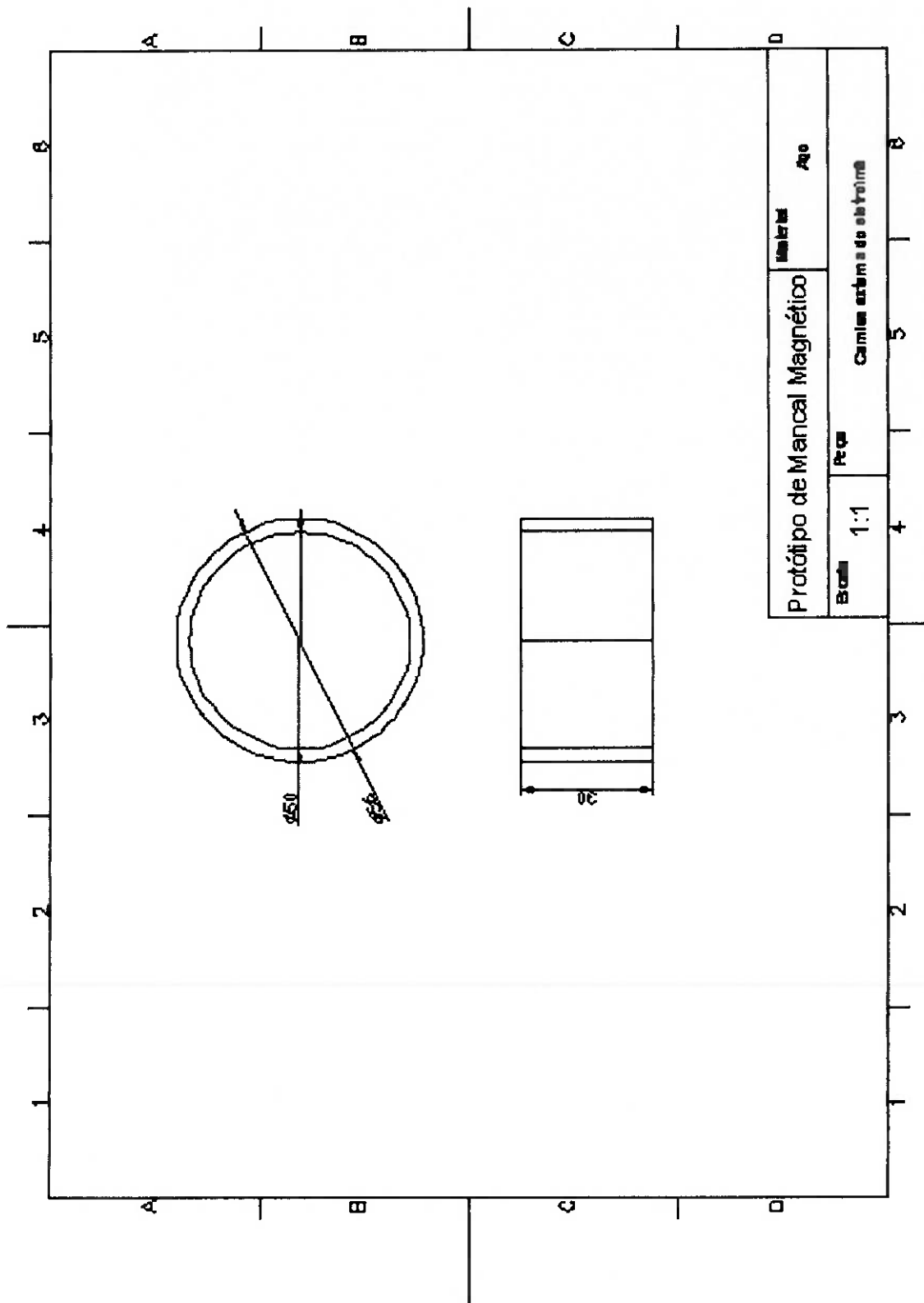
ANEXO B.1 – ALVO PARA MEDIDA DE DISTÂNCIA



ANEXO B.2 – CAMISA INTERNA DO ELETRÓIMÃ

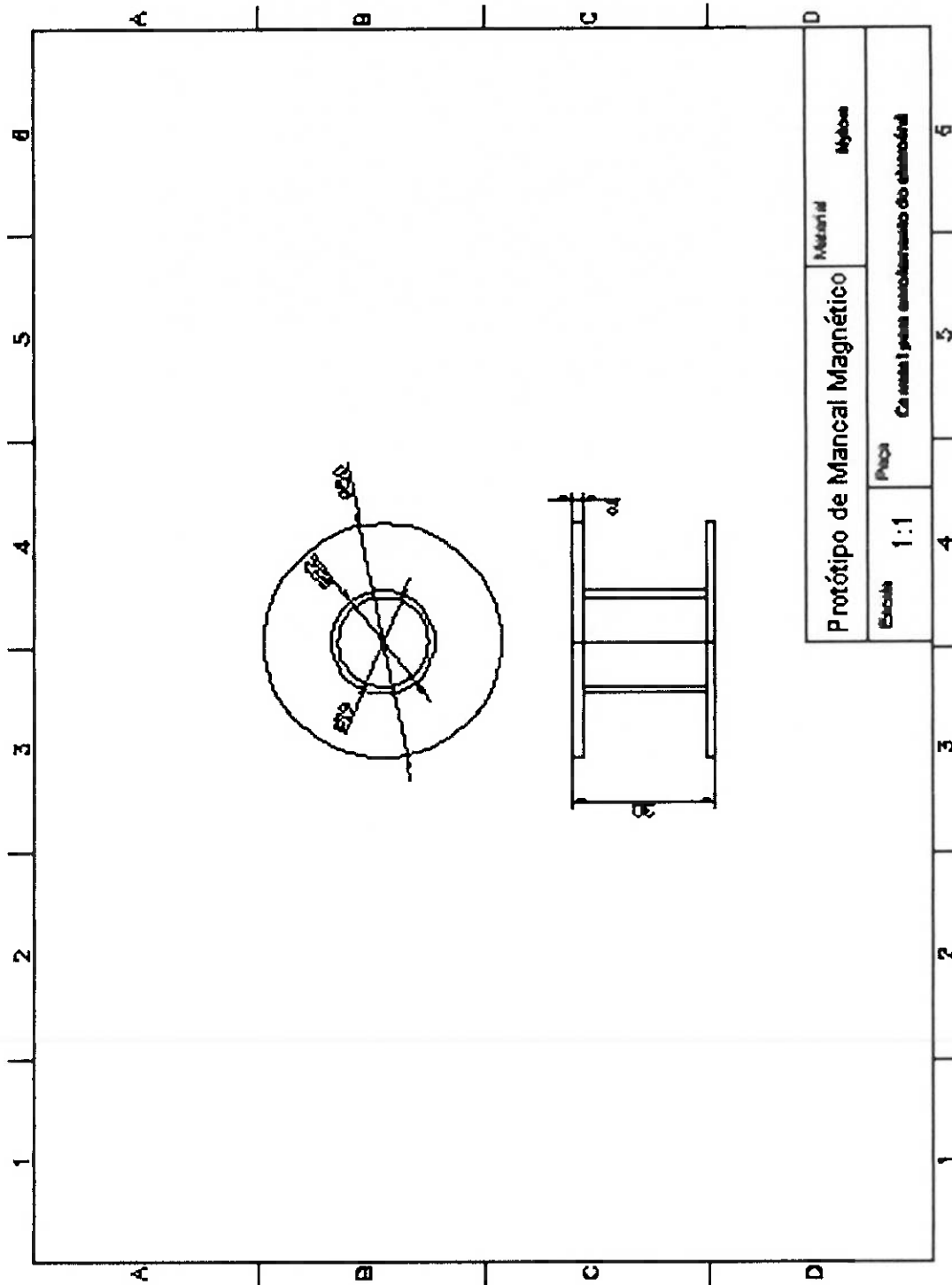


ANEXO B.3 – CAMISA EXTERNA DO ELETROÍMÃ

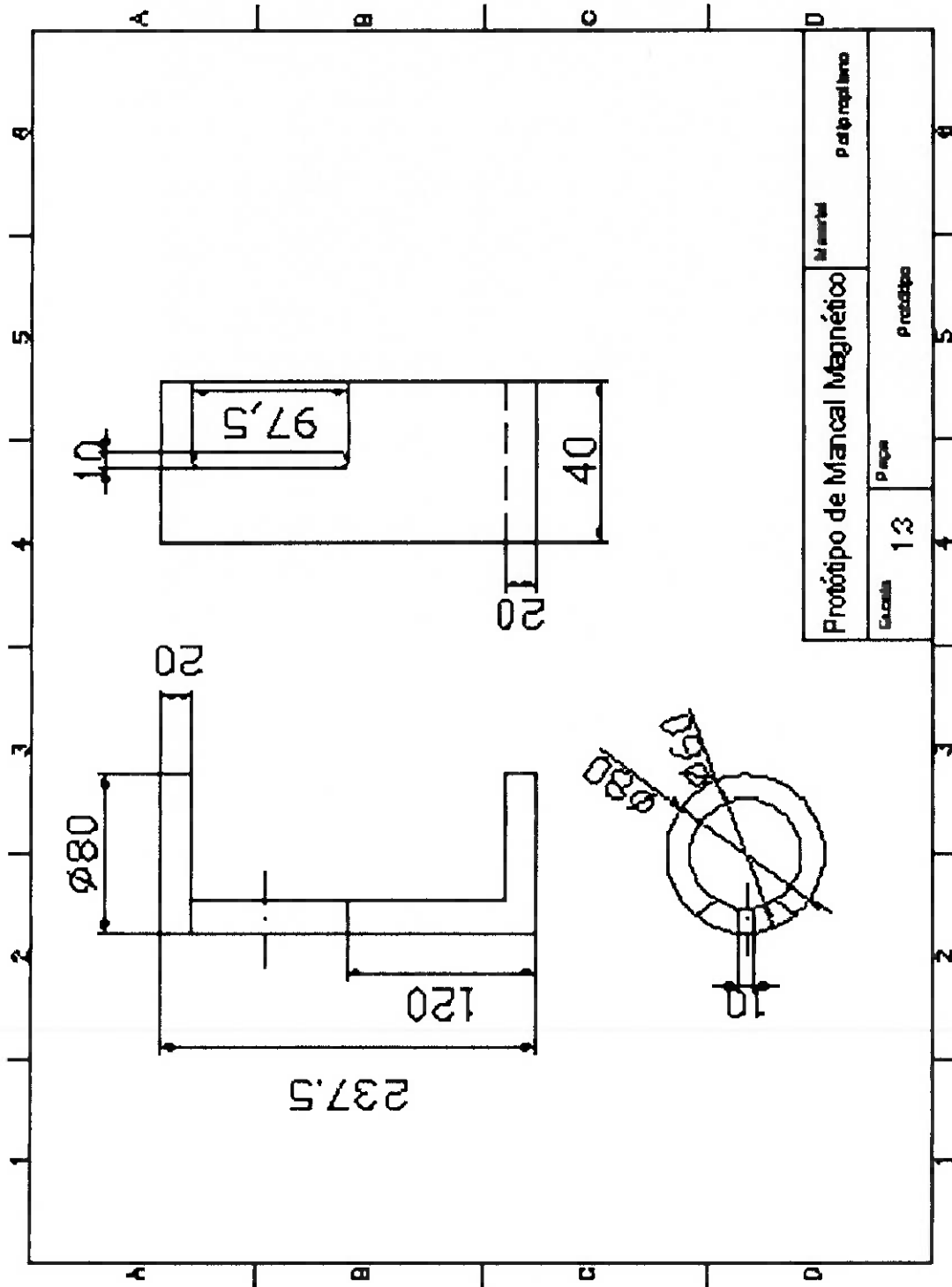


Protótipo de Mancaí Magnético		Número		Aço
		Camisa externa do eletroímã		
Escala	1:1	Peça	5	Ø

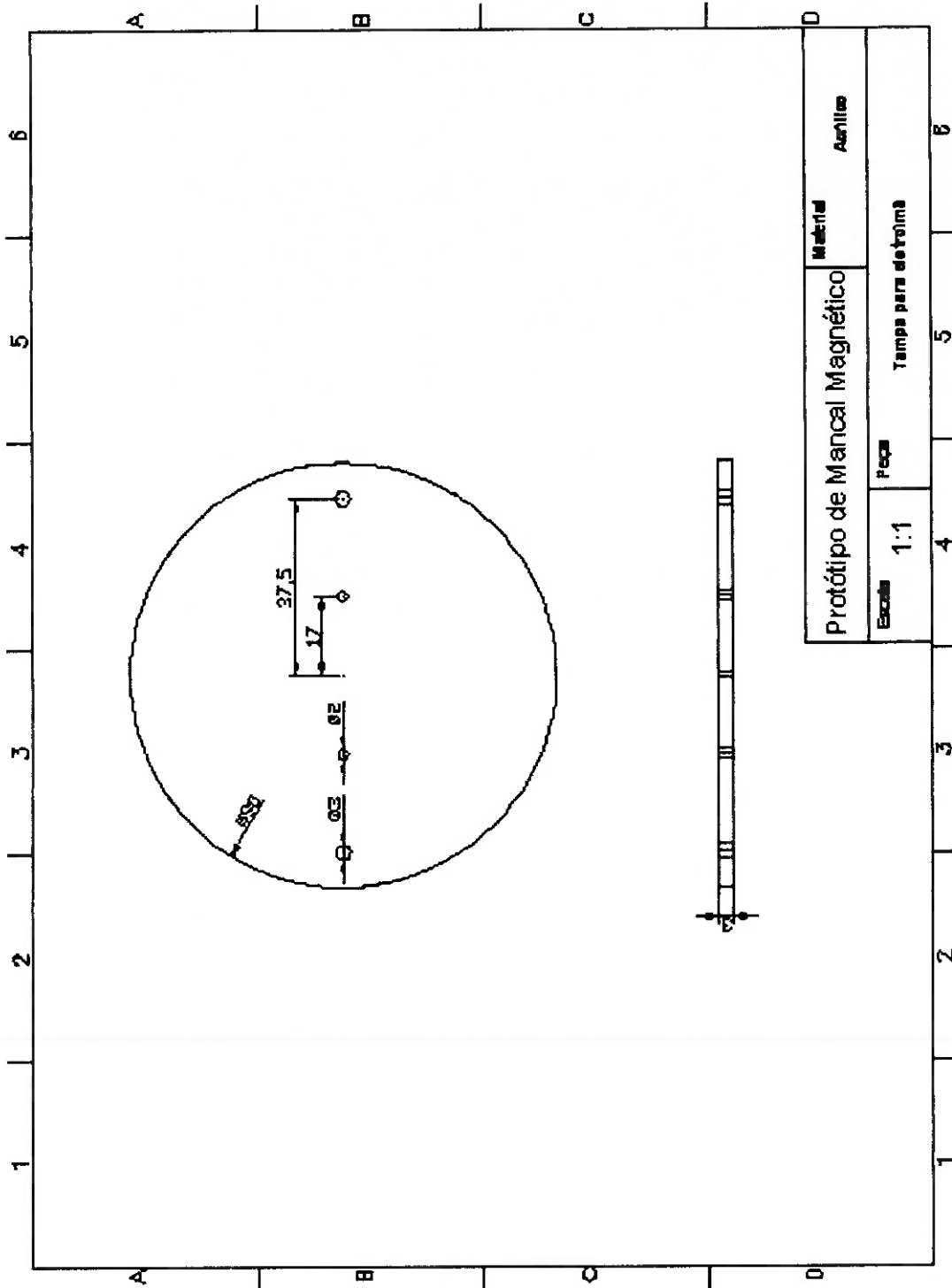
ANEXO B.4 – CARRETEL PARA ENROLAMENTO DO ELETROÍMÃ



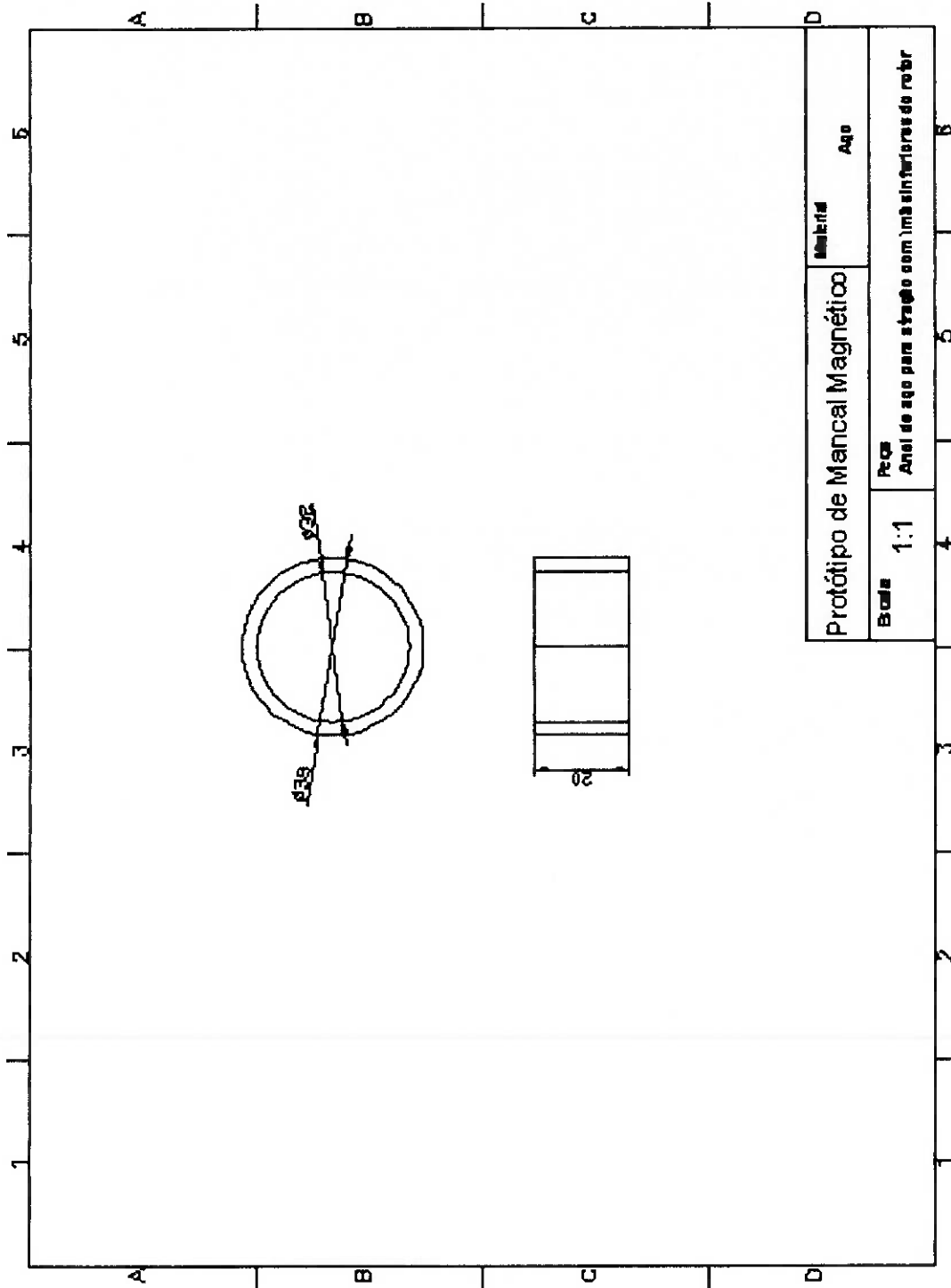
ANEXO B.5 - PROTÓTIPO



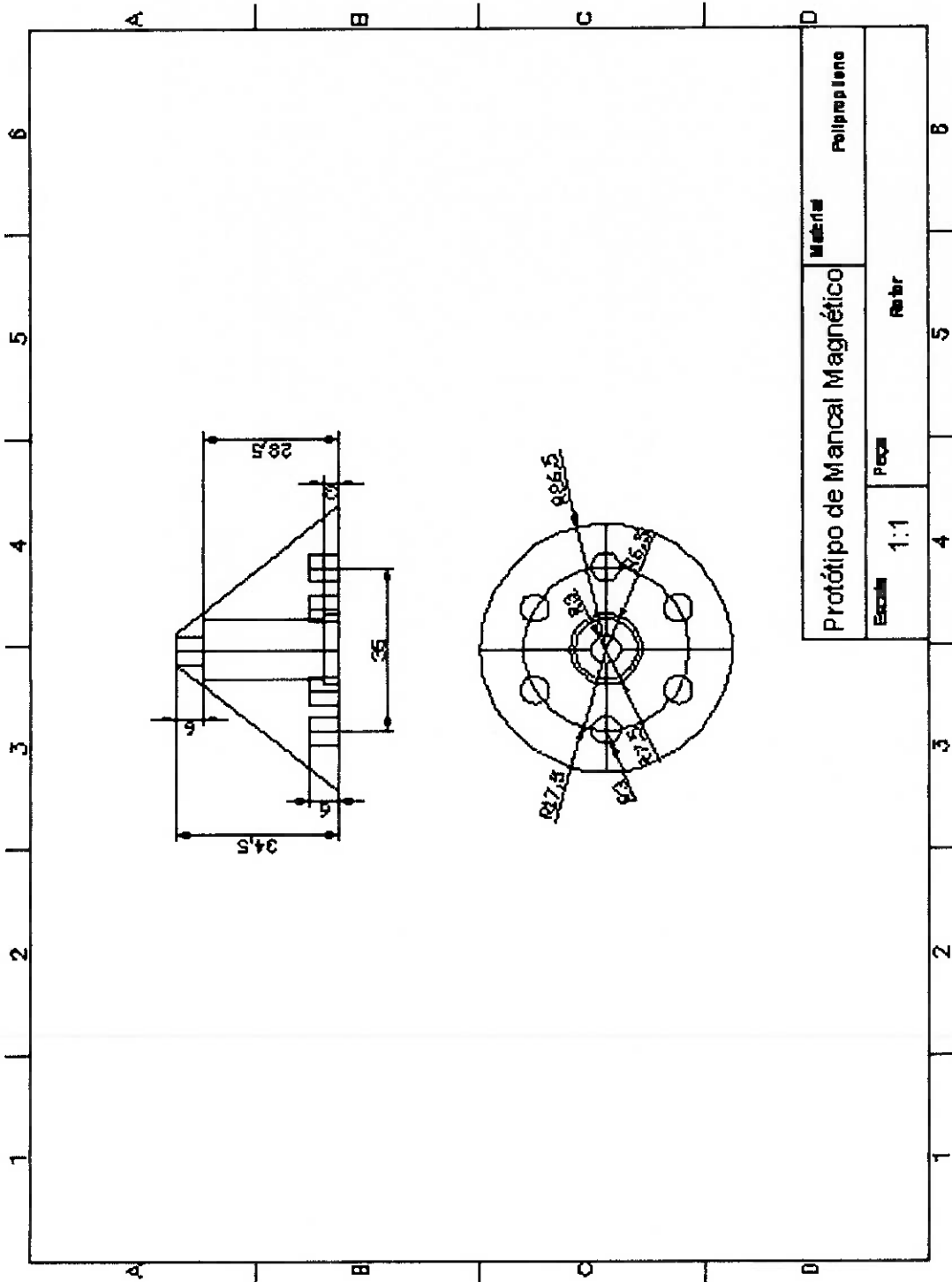
ANEXO B.6 – TAMPA PARA ELETROÍMÃ



ANEXO B.7 – ANEL DE AÇO

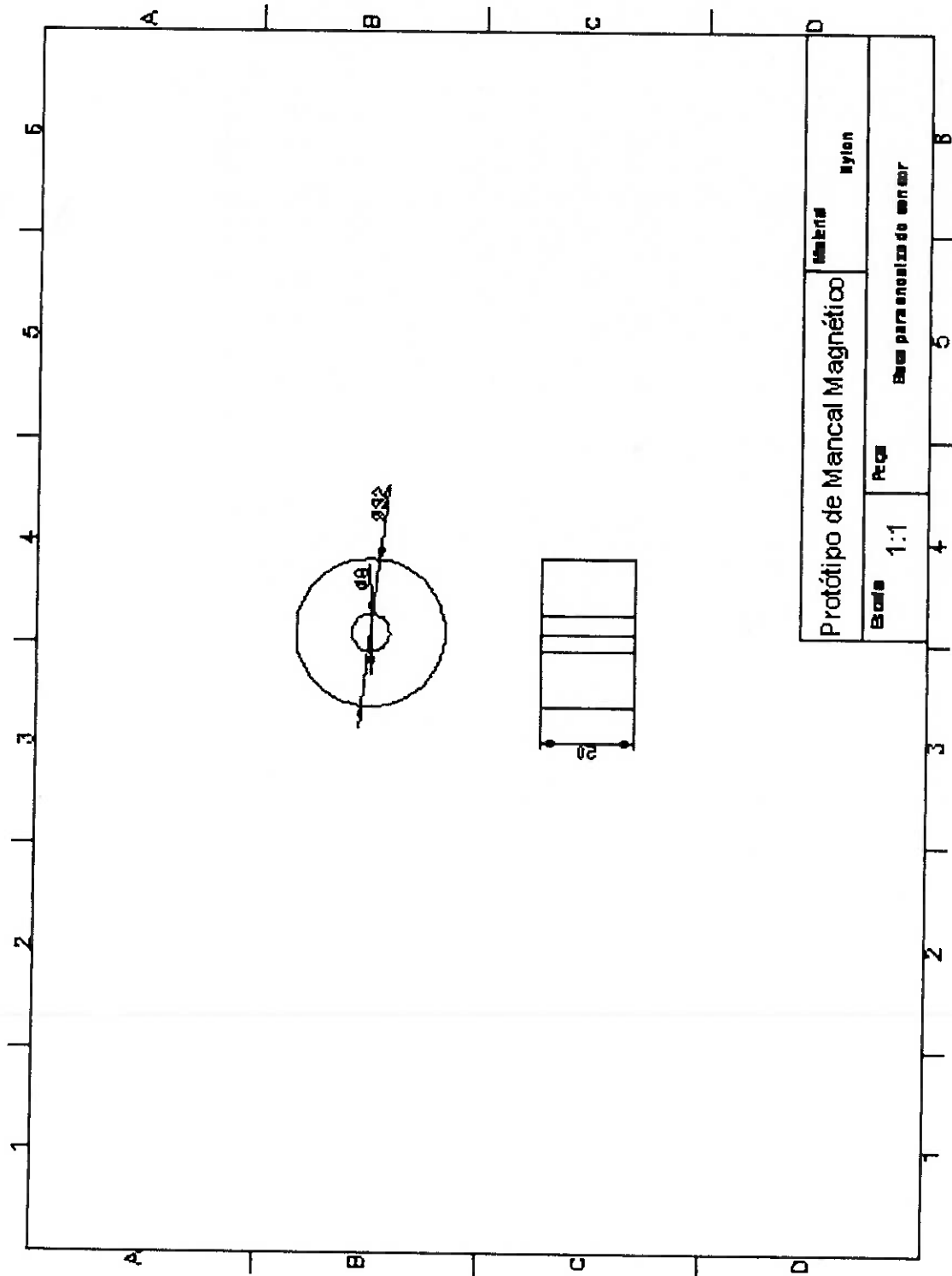


ANEXO B.8 – ROTOR



Protótipo de Manca! Magnético		Material	Polipropileno
Escala	1:1	Peça	Rotor

ANEXO B.9 – BASE PARA ENCAIXE DO SENSOR



Protótipo de Mancais Magnético		Materia	Nylon
Escala	1:1	Refer	Base parametrizada do sensor