

Universidade de São Paulo
Escola Politécnica
Departamento de Energia e Automação Elétricas

Volante de inércia com mancais
magnéticos passivos para armazenagem
de energia cinética rotacional

Paulo Henrique M. Scatena
Rodolfo Ribeiro Zanetti

São Paulo, SP
Dezembro, 2010

Universidade de São Paulo
Escola Politécnica
Departamento de Energia e Automação Elétricas

Volante de inércia com mancais
magnéticos passivos para armazenagem
de energia cinética rotacional

Paulo Henrique M. Scatena
Rodolfo Ribeiro Zanetti

Trabalho apresentado ao curso de
Engenharia Elétrica - Ênfase em
Energia e Automação Elétricas da
Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo como parte dos
requisitos para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia
Elétrica.

Prof. Dr. Ivan Eduardo Chabu – Orientador

Prof. Dr. Carlos Márcio Vieira Tahan – Coordenador

São Paulo, SP
Dezembro, 2010

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autores:

Paulo Henrique Morato Scatena
Rodolfo Ribeiro Zanetti

Título:

Volante de inércia com mancais magnéticos passivos para
armazenagem de energia cinética rotacional

Conceito:

Desenvolvimento de uma bateria eletromecânica, de conversão
de energia elétrica em mecânica cinética rotacional e vice-versa,
dotada de mancais magnéticos passivos a ímãs permanentes.

Orientador:

Prof. Dr. Ivan Eduardo Chabu

Assinatura: _____

Data de aprovação: ___ / _____ / _____

AGRADECIMENTOS

A nossas famílias, que – mesmo sem compreender tudo que fazíamos – sempre nos apoiou.

Ao professor Carlos Vieira Tahan, pela motivação e confiança dedicados, diferente do professor orientador.

Aos professores Wilson Komatsu e Walter Kaiser, pela ajuda e solicitude ao longo do projeto eletrônico.

Ao pessoal da Equacional Elétrica e Mecânica Ltda., sempre disposto a nos ajudar ao longo da fabricação e montagem dos componentes.

A nosso professor orientador, Ivan Eduardo Chabu, pelo apoio e auxílio dedicados ao longo de todo o projeto, assim como ao tempo e esforços despendido para garantir sua execução.

E a todos, que, direta ou indiretamente, foram de importância para a realização do trabalho aqui realizado.

"When in doubt, use brute force."

Kenneth Thompson

RESUMO

O desenvolvimento e subsequente barateamento dos ímãs permanentes de terras raras têm permitido o surgimento de novas topologias de máquinas elétricas, assim como o de novos dispositivos – principalmente na área denominada levitação magnética passiva – em projetos idealmente mais compactos e de maior rendimento.

Apresenta-se neste trabalho o desenvolvimento do projeto de um dispositivo de armazenamento de energia na forma cinética rotacional através de um volante de inércia, com o uso de mancais de ímã permanente. O dispositivo é também uma máquina elétrica sem escovas, de fluxo axial, com excitação por ímãs permanentes e acionamento controlado eletronicamente, permitindo operação como motor ou gerador.

Para se atingir esse objetivo, foram estudadas as possíveis topologias e sua análise foi feita por métodos analíticos e numéricos, na busca de sua otimização. O dimensionamento prevê a produção de um dispositivo de pequeno porte, de aplicação genérica, para demonstração de funcionamento. Também foi apresentada uma nova topologia de mancais magnéticos de baixo custo.

O circuito de controle e acionamento foi desenvolvido com foco em facilidade de construção, principalmente pensando-se em uma possível produção seriada. A definição do protótipo do dispositivo também foi focada em facilidade de usinagem e montagem.

O protótipo foi construído e testado, mostrando o devido funcionamento da topologia proposta, além de apresentar melhor rendimento quando comparado com projetos anteriores sem o uso de mancais magnéticos.

Palavras-chave: Volante de Inércia. Mancal Magnético. Máquina elétrica de fluxo axial. *Driver* de motor *brushless*.

ABSTRACT

The development of rare-earth permanent magnets (PM) has made them stronger and steadily less expensive, allowing use in new topologies such as high-efficiency compact electrical machines and passive magnetic levitation devices.

In this work, an energy storage device has been developed through an electrically driven flywheel employing passive magnetic bearings. An axial flux permanent magnet (AFPM) brushless machine has been designed to operate as a motor or as a generator, providing means for the flywheel to be driven to a certain speed and for further conversion of its rotational energy to electrical energy. The electronic motor driver was also developed.

The method employed for attaining this objective was the study of the design possibilities and further analytical and numerical analysis. The whole device design is focused on developing a generic affordable rig, lightweight enough for one man to carry.

As a solution for achieving a compact and cost-effective device, a novel magnetic bearing design has been designed. The strategy for defining its configuration, as well as the whole concept design, was focused on the ease of construction and use.

A prototype has been built and tested, as a test of concept and functionality, proving it an attractive option for energy storage. Its efficiency was found better than that of former works employing ball bearings.

Keywords: Flywheel. Magnet Bearing. Axial Flux Machines. Permanent Magnet Motor. Brushless DC Motor. Brushless DC Motor Driver. AFPM. BLDC.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES E TABELAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Desenhos Técnicos do Protótipo Desenvolvido Anteriormente | 6 |
| Figura 2: Topologias básicas do desenvolvimento de máquinas <i>DC brushless</i> | 8 |
| Figura 3: Topologia de motor de fluxo axial de duplo rotor e estator interno, sem núcleo, de [REF do AXIAL]. 1- Bobina do estator, 2- Rotor, 3- Ímã Permanente, 4- Carcaça, 5- Mancal, 6- Eixo..... | 9 |
| Figura 4: Diagrama da lógica de acionamento do motor <i>brushless</i> | 10 |
| Figura 5: Inversor de estado sólido (i), e formas de onda ideais de corrente quadrada (ii) e senoidal (iii)..... | 10 |
| Figura 6: Correntes durante chaveamento de motor brushless: (A)- Corrente nas fases A e B, (B)- Forma de onda retangular da corrente ^[3] | 11 |
| Figura 7: Montagens de ímãs permanentes anulares que permitem estabilidade radial..... | 14 |
| Figura 8: Montagens para mancais estáveis radialmente ^[11] | 15 |
| Figura 9: Ímãs em montagem de Halbach, e sua movimentação sobre uma série de bobinas | 16 |
| Figura 10: Rigidez radial do conjunto para diversas topologias de montagem do mancal magnético | 19 |
| Figura 11: Anel formado por pequenos discos de ímã permanente e anel feromagnético associado | 21 |
| Figura 12: Rigidez do conjunto na rigidez radial, para diversas configurações construtivas | 21 |
| Figura 13: Vista em corte da topologia desenvolvida | 22 |
| Figura 14: Circuito magnético simplificado..... | 23 |
| Figura 15: Diagrama para se encontrar o ponto de operação do circuito magnético | 24 |
| Figura 16: Distribuição aproximada de densidade de fluxo no entreferro na direção azimutal..... | 24 |
| Figura 17: Circuito equivalente por fase (convenção do gerador) ^[3] | 25 |
| Figura 18: Diagrama lógico do <i>driver</i> desenvolvido | 27 |
| Figura 19: Conversor abaixador de tensão contínua..... | 29 |

SUMÁRIO

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1. | INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 | Apresentação | 1 |
| 1.2 | Visão Geral | 1 |
| 1.3 | Objetivos..... | 2 |
| 1.4 | Motivação | 2 |
| 1.5 | Linhas Gerais..... | 3 |
| 2. | FUNDAMENTOS | 3 |
| 2.1 | Histórico e Relações entre Conceitos | 3 |
| 2.2 | Antecedentes..... | 5 |
| 3. | REVISÃO LITERÁRIA | 7 |
| 3.1 | Máquina Elétrica..... | 7 |
| 3.2 | Acionamento | 9 |
| 3.3 | Dinâmica do Volante | 12 |
| 3.4 | Mancais Magnéticos..... | 13 |
| 3.4.1 | Mancal primário..... | 14 |
| 3.4.2 | Mancal auxiliar de sustentação..... | 14 |
| 3.5 | Montagem e Associação dos Elementos | 16 |
| 4. | O PROJETO – JUSTIFICATIVA E METODOLOGIA | 17 |
| 4.1 | Foco e Restrições de projeto..... | 17 |
| 4.2 | Revisão do Protótipo Anterior..... | 17 |
| 4.3 | Metodologia e Diretrizes | 18 |
| 5. | PROJETO DOS MANCAIS | 18 |
| 5.1 | Mancal Magnético..... | 18 |
| 5.2 | Mancal de Sustentação Radial..... | 18 |
| 5.2.1 | Primeiro desenvolvimento | 18 |
| 5.2.2 | A Questão do Custo e da Disponibilidade Comercial | 20 |
| 5.2.3 | Uma nova topologia de mancal de ímãs permanentes | 20 |
| 5.3 | Mancais de Suporte..... | 22 |
| 6. | PROJETO ELETROMAGNÉTICO | 23 |
| 6.1 | Topologia da Máquina Elétrica..... | 23 |
| 6.2 | Circuito Magnético | 23 |
| 6.3 | Projeto Elétrico | 24 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 7. | PROJETO MECÂNICO..... | 25 |
| 7.1 | O Volante de Inércia | 25 |
| 7.2 | Eixo..... | 26 |
| 7.3 | Mancal Magnético..... | 26 |
| 7.4 | Topologia de Montagem..... | 26 |
| 7.5 | A Estratégia de Construção | 26 |
| 8. | PROJETO ELETRÔNICO | 27 |
| 8.1 | A Lógica de Controle e Acionamento | 27 |
| 8.2 | Controle Eletrônico..... | 27 |
| 8.2.1 | O Microcontrolador | 28 |
| 8.2.2 | Sensoriamento de posição | 28 |
| 8.3 | Conversor CC/CC..... | 29 |
| 8.4 | Chaveamento de potência | 29 |
| 8.5 | Definição esquemática do projeto..... | 30 |
| 8.6 | Definição da placa de circuito impresso | 30 |
| 9. | PREVISÃO DE PERDAS..... | 30 |
| 10. | O PROTÓTIPO | 31 |
| 10.1 | Fabricação e Montagem dos Componentes..... | 31 |
| 10.2 | Montagem final | 31 |
| 11. | EXECUÇÃO DE TESTES E ENSAIOS..... | 32 |
| 12. | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 32 |
| 13. | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 33 |
| 13.1 | Conclusões..... | 33 |
| 13.2 | Resumo das Contribuições | 33 |
| 13.3 | Pesquisa Futura | 34 |
| 14. | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 35 |
| 15. | ANEXOS | 37 |
| 15.1 | Cálculo da energia potencial cinética armazenada no volante..... | 37 |
| 15.2 | Cálculo do circuito magnético e dimensionamento do estator..... | 38 |
| 15.3 | Desenhos esquemáticos da lógica de controle e acionamento | 40 |
| 15.4 | Tabela de componentes utilizados no projeto eletrônico | 43 |
| 15.5 | Layout final para fabricação da placa de circuito impresso | 46 |
| 15.5.1 | Simbologia / Legenda dos Componentes..... | 46 |
| 15.5.2 | Demarcação da Furação..... | 46 |
| 15.5.3 | Trilhas da camada superior | 47 |

| | | |
|-------------|--|-----------|
| 15.5.4 | Trilhas da camada superior – com preenchimento de cobre | 47 |
| 15.5.5 | Trilhas da camada inferior | 48 |
| 15.5.6 | Trilhas da camada inferior – com preenchimento de cobre | 48 |
| 15.6 | Análise das perdas previstas | 49 |
| 15.6.1 | Atrito com o ar | 49 |
| 15.6.2 | Perdas por efeito Joule nos condutores | 49 |
| 15.6.3 | Perdas Foucault (ou por correntes parasitas) | 50 |
| 15.6.4 | Perdas nas chaves de estado sólido..... | 50 |
| 15.7 | Fotos do protótipo e sua produção | 51 |
| 15.7.1 | Montagem de um módulo do mancal magnético | 51 |
| 15.7.2 | Mancal magnético – Detalhe do anel para concentração de fluxo magnético | 51 |
| 15.7.3 | Módulo isolado do mancal magnético | 52 |
| 15.7.4 | Enrolamento do estator | 53 |
| 15.7.5 | Placa de acionamento | 53 |
| 15.8 | Desenhos técnicos do primeiro projeto..... | 54 |
| 15.9 | Desenhos técnicos do segundo projeto..... | 71 |

1. INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

Volantes de inércia ganharam grande destaque nos últimos anos devido à recorrente onda de pensamento e postura ecosustentáveis, promovendo melhor aproveitamento energético em todos os processos humanos. Isso porque a conceito de armazenagem de energia vêm sendo reestudado na busca de métodos que permitam a normalização do consumo energético – promovendo a acumulação em processos de liberação energética para seu subsequente consumo em momentos de maior demanda.

Embora esse processo tenha as mais diversas formas de ser alcançado (baterias químicas, represamento de água, elevação de massas etc), volantes de inércia se apresentam como uma forma elegante de manter energia no formato cinético rotacional. O conceito é fortemente empregado na indústria no setor de estamparia, permitindo a transferência intensa de energia em um instante pequeno, sem, porém, demandar muita potência do motor de acionamento. Também são utilizados volantes para equilibrar, suavizando flutuações, a rotação de um determinado eixo.

A associação do volante a módulos motores e geradores elétricos permite, portanto, a transferência e acumulação de energia elétrica. Essa topologia é denominada frequentemente como bateria eletromecânica (EMB, do inglês *electromechanical battery*).

1.2 Visão Geral

O desenvolvimento de baterias mecânicas encontra campo fértil devido principalmente ao desenvolvimento de novas ligas de ímãs permanentes (ímãs de terras raras) e ao progresso da eletrônica de potência, assim como a descoberta de novos compósitos para sua construção – este último, porém, sendo pouco relevante para o presente trabalho.

O desenvolvimento do motor de corrente contínua de ímãs permanentes permitiu projetos de motores potentes compactos, eliminando a necessidade do enrolamento e da fonte de excitação. Mais recentemente – associado ao rápido desenvolvimento da eletrônica, especialmente a de potência – surgiram as máquinas sem escovas, nas quais a função do comutador e suas escovas são implementadas por chaves de estado sólido. Isso permitiu o aumento de seu rendimento e a redução quase total de sua manutenção. Também, essa nova topologia é flexível quanto ao número de fases utilizadas, sendo mais versátil para diversas aplicações.

Quanto à geometria, as máquinas de corrente contínua sem escovas (BLDC, do inglês *brushless DC*), apresentam-se fundamentalmente em dois tipos: as cilíndricas e as em disco. A topologia em disco, abordada nesse projeto, também conhecida por máquina de ímã permanente e fluxo axial (AFPM, do inglês *axial flux permanente magnet*) permite sua construção em diversas outras topologias. Aqui será estudada a topologia de rotor duplo com estator central sem núcleo ferromagnético. Esse e demais formatos serão explorados ao longo do texto.

Ao mesmo tempo, ímãs permanentes de terras raras têm sido utilizados em dispositivos de levitação, sejam estes puramente passivos ou passivos e ativos (isto é, com o auxílio de eletroímãs). A intensidade de campo magnético por volume dos novos materiais hoje disponíveis em mercado permite o desenvolvimento de topologias de mancais magnéticos de alta rigidez, reduzindo idealmente a zero as perdas em mancais e aumentando sensivelmente o rendimento do dispositivo em que está empregado.

1.3 Objetivos

O principal objetivo desse trabalho é desenvolver o projeto e o protótipo de um dispositivo para armazenagem de energia elétrica na forma de energia cinética rotacional, provido de mancais magnéticos passivos. Inerente a essa proposta, aparece como objetivo o estudo e otimização do projeto de volante de inércia desenvolvido anteriormente^[1], que serve de base para o presente trabalho.

As etapas a serem cumpridas para tal fim são principalmente:

- Estudo da literatura sobre máquinas de corrente contínua sem escovas de ímãs permanentes e fluxo axial, assim como seu acionamento e controle. Também, o estudo de mancais magnéticos;
- Revisão do protótipo existente, especialmente do ponto de vista do projeto do mancal magnético;
- Formulação de modelos para os mancais magnéticos e para a máquina elétrica;
- Dimensionamento dos parâmetros mecânicos do dispositivo;
- Desenvolvimento do projeto elétrico do estator;
- Definição de topologia e projeto do mancal magnético;
- Projeto do sistema de controle e acionamento;
- Elaboração de desenhos e esquemas;
- Fabricação ou provisão dos componentes;
- Montagem mecânica e elétrica do protótipo;
- Execução de testes e ensaios.

1.4 Motivação

A idéia de desenvolvimento desse projeto foi concebida pelo professor orientador, que apresentava interesse em criar um módulo independente de bateria eletromecânica. Os autores deste trabalho, associando esse interesse à ciência de que já havia sido realizada uma série de projetos – alguns de sua própria autoria – que, sozinhos, não apresentavam aplicabilidade prática imediata, notaram o potencial de integração. Disso se propôs o desenvolvimento da bateria eletromecânica com o uso de mancais magnéticos. Tal projeto se apresenta como uma evolução de um trabalho de formatura de 2009^[19], buscando seu aperfeiçoamento e sua finalização como módulo independente.

O projeto ambiciona avanços na área de pesquisa de máquinas elétricas e dispositivos magnéticos e da eletrônica de potência.

1.5 Linhas Gerais

O Capítulo 2 apresenta os conceitos envolvidos neste projeto, assim como o histórico dos temas envolvidos e os projetos antecedentes.

O Capítulo 3 expõe o estudo de literatura das áreas englobadas, permitindo o leitor a se situar sobre os assuntos envolvidos.

No Capítulo 4 são exibidas as diretrizes gerais do projeto, englobando a revisão do projeto anterior.

O Capítulo 5 apresenta o projeto dedicado dos mancais de sustentação, apresentando as topologias de mancais magnéticos desenvolvidas e as idéias adotadas para garantir a estabilidade do sistema.

O Capítulo 6 contém o projeto da máquina elétrica, englobando a definição análise do circuito magnético, com subsequente dimensionamento do enrolamento do estator.

O Capítulo 7 se foca no projeto mecânico, apresentando a disposição geométrica dos componentes e preocupações e cálculos de esforços e comportamento dinâmico.

O Capítulo 8 acompanha o projeto do sistema de controle e acionamento eletrônico, expondo as lógicas de comutação para a alimentação e também a da regulação de tensão de saída.

O Capítulo 9 indica a preocupação com a previsão e análise de perdas no sistema.

O Capítulo 10 acompanha a produção do protótipo, apontando o procedimento de montagem e dificuldades encontradas.

O Capítulo 11 é dedicado à apresentação dos testes aos quais se submeteu o dispositivo.

Finalmente, os Capítulos 12 e 13 contêm as análises finais do projeto, assim como conclusões, resumo das contribuições conquistadas e propostas de pesquisa futura.

2. FUNDAMENTOS

2.1 Histórico e Relações entre Conceitos

Volantes de inércia são baseados na idéia de se utilizar uma massa girante como forma de se acumular energia cinética rotacional, permitindo estabilizar rotações quando o torque imposto em um eixo oscila. Esse princípio permite a realização de trabalho de valor elevado em curta duração utilizando para isso a energia cinética rotacional, aliviando a necessidade, portanto, de uma fonte de energia (mecânica ou elétrica) que precise suprir esse pico. O acionamento do volante pode devolvê-lo à sua velocidade original de forma mais lenta. Assim, esses dispositivos são intensamente utilizados na indústria, principalmente na área de prensas e estamaria.

A idéia de acoplar o volante de armazenagem de energia cinética também a um gerador – permitindo que se tome a energia de volta na forma elétrica – tem, por sua vez, primeira referência no ônibus urbano suíço Gyrobus, desenvolvido a partir dos anos 40. A idéia seria ter um ônibus elétrico sem depender das linhas aéreas de energia, i.e., utilizando o volante de armazenagem como uma bateria. Por

volta dos anos 70, já se faziam estudos sobre os materiais empregados nos volantes, em busca de se aumentar a densidade de energia acumulada. Existe um período de tempo, porém, em que pesquisas dessa linha ficaram praticamente suspensas, já que a eletrônica de potência e as tecnologias de acionamento da época não tornavam tal dispositivo interessante. Nesse tempo, volantes de inércia acoplados a geradores tiveram aplicação apenas em casos particulares, como a geração de picos de potência, que perturbariam demasiadamente a rede (aparecimento de *spikes*) se fossem diretamente demandados.

Com as novas necessidades e novas tecnologias, entretanto, as pesquisas na área da bateria eletromecânica passaram por um renascimento nos anos 90, guiado principalmente por um grupo de pesquisa da LLNL, encabeçado por Richard Post^{[9][10]}, pensando-se em aplicação veicular. Ao unir o conceito da bateria eletromecânica ao de frenagem regenerativa, enxergou-se o potencial de se conseguir reduzir as enormes quantidades de energia perdida nos processos de frenagem de uma forma prática, injetando ânimo (e investimentos) para pesquisas na área.

A idéia então iniciada como um volante de inércia acoplado a um gerador e a um motor chegou a um estado reduzido e concentrado ao utilizar uma máquina elétrica tendo o seu rotor já como o volante de inércia.

Tendo-se em mente que a energia acumulada em um dispositivo está relacionada diretamente com a inércia do volante e quadraticamente com a sua velocidade de rotação (equação 1), as idéias iniciais faziam uso de ligas metálicas (mais pesadas), para buscar aumentar a energia acumulada.

$$E = \frac{1}{2} J \cdot \omega^2 \quad (1)$$

No entanto, à medida que se tornou possível, com a eletrônica de potência, impor acionamentos de alta frequência, buscaram-se materiais mais leves porém resistentes aos esforços mecânicos resultantes da alta rotação, de forma que seu reduzido peso seja compensado pela capacidade de atingir rotações muito mais altas. Dos compósitos analisados, a fibra de carbono aparece como uma particular solução. Apenas deve-se atentar que devido a sua anisotropia, um cuidado especial na orientação das fibras precisa ser tomado.

Empregar essa nova estratégia, no entanto, obrigou a se repensar toda a topologia da bateria eletromecânica, anteriormente definida para o uso de volantes metálicos.

Colocando em foco o rendimento do sistema, nota-se que a parcela referente às perdas no ferro no rotor desaparece caso não mais se utilize material ferromagnético no rotor. A parcela do estator pode ser convenientemente reduzida ou cancelada com o desenvolvimento de topologias que reduzam ou eliminem o emprego de ferro.

Aparece, enfim, como um significativo responsável pela limitação do rendimento das EMBs, o atrito, apresentado nos mancais e na interação do volante com o ar. A última pode ser fortemente reduzida pelo encapsulamento do dispositivo em uma câmara de vácuo. O grande desafio reside, portanto, no desenvolvimento de mancais de alto rendimento. Nesse ponto, ou se utilizam mancais mecânicos de alto rendimento, ou recorrem-se a topologias de mancais magnéticos.

O desenvolvimento de mancais magnético esbarra, porém, no Teorema de Earnshaw[†], que se estende a sistemas magnéticos de corrente ou de magnetização fixa. Tal teorema declara ser impossível atingir a levitação estável a partir somente de forças magnéticas ou elétricas estáticas. Ao menos um eixo no espaço ficaria sempre instável.

Os meios mais triviais de se contornar essa problemática são ou utilizar meios mecânicos de se estabilizar o(s) eixo(s) instável(eis) ou fazer uso de um sistema de sensoriamento ligado a um atuador em malha fechada (mancal magnético ativo). Embora esse último tenha se desenvolvido muito e atualmente se encontra aplicado nas mais diversas áreas, os requisitos de confiabilidade, robustez e baixas perdas das baterias eletromecânicas tornam o uso de eletroímãs e seu complexo hardware de controle pouco adequado.

Maneiras menos convencionais de driblar esse cenário são utilizar materiais diamagnéticos (supercondutores) ou *ferrofluids* (fluídos que respondem fortemente a campo magnético) ou fazer uso de campos (e portanto forças) variantes no tempo.

Para a aplicação em volantes de inércia, já é bem estabelecida a topologia de mancais magnéticos passivos associados a mancais mecânicos. No entanto, existem pesquisas desenvolvidas e em desenvolvimento que apontam a viabilidade de sistemas totalmente levitados passivamente, através de topologias bastante particulares, baseadas nos efeitos do campo magnético variante no tempo produzidos com a rotação do dispositivo. Mais sobre essa topologia será descrito adiante.

Por fim, com o desenvolvimento da eletrônica de potência, tornou-se possível o acionamento dos motores em frequências muito elevadas. A topologia consagrada para isso consiste em se trabalhar a EMB como um motor *DC brushless*, que consiste basicamente de um motor síncrono, mas cujas entradas advêm de um circuito eletrônico que reproduz em sua saída tensões para as N fases, quadradas ou senoidais. Ondas quadradas eram mais utilizadas no início do desenvolvimento de tais dispositivos, mas, com o desenvolvimento de controladores PWM (do inglês *pulse-width modulation*), tornou-se mais fácil o acionamento por tensões senoidais, do qual resulta menor ondulação (*“ripple”*) de torque.

2.2 Antecedentes

Por se tratar de um dispositivo em crescente desenvolvimento atual, cujos mecanismos integrantes ainda apresentam grande margem para pesquisa e otimização, a bateria eletromecânica abrange tópicos muito recorrentes nas pesquisas acadêmicas e científicas modernas. Portanto, em toda a comunidade científica, desenvolvem-se projetos – seja na área de materiais, de acionamento ou de mancais – que têm efeito direto no desenvolvimento de projetos de acumuladores eletrodinâmicos de energia.

[†] Apresentado em 1842 por Samuel Earnshaw, tal teorema^[6] é baseado na Equação de Laplace diz que um grupo de partículas carregadas governado pela lei do inverso dos quadrados nunca será estável estaticamente.

Os autores particularmente trabalharam com os conceitos de eletromagnetismo aplicado em um trabalho realizado juntamente com o mesmo orientador, associado à disciplina Práticas de Eletricidade e Eletrônica II, intitulado “Mancal de Levitação Magnética – Projeto e Construção de Um Protótipo”. Após isso, em seus respectivos planos de iniciação científica, trabalharam o Rodolfo Zanetti com máquinas elétricas e seus acionamentos e o Paulo Scatena com mancais magnéticos.

Ainda que se analisem apenas os trabalhos de formatura vinculados ao Departamento de Energia e Automação da Engenharia Politécnica da USP, já existem exemplos úteis e relacionados ao projeto aqui desenvolvido. Orientados também pelo Prof. Dr. Ivan Chabu, podem-se citar:

- Projeto de um acumulador de energia eletrodinâmico – Aldo Luis Colla Gasparetto; Felipe Junji Kuwabara, 2009;

- Caracterização de mancais magnéticos passivos com ímãs permanentes – Vivian Cipriano Mineta, 2009;

- Projeto e Acionamento de Motor de Corrente Contínua Sem Escovas e Sem Ímãs Permanentes, com Circuito Magnético Não Usual – Renato Motohide Yabiku, 2003;

- Projeto e Construção de um Motor de Corrente Contínua de Comutação Eletrônica - Brushless DC – Renato Restituti, 1998.

O conceito envolvido no trabalho de formatura citado em primeiro lugar serviu de fundação para o desenvolvimento do projeto aqui apresentado. O acumulador de energia ali desenvolvido é o dispositivo cujo aperfeiçoamento é o presente objetivo, e sua topologia mecânica básica deve ser mantida. Consiste – em teoria – em uma máquina de corrente contínua *brushless* (cujos enrolamentos correspondem aos de uma máquina síncrona trifásica) de entreferro axial, de dois pólos, associada a um volante de duas peças, dentro do qual ficam alojadas pastilhas de ímã permanente (NdFeB) formando os dois pólos magnéticos. Tal conjunto fica preso a mancais mecânicos de rolamento pelas duas extremidades de seu eixo. O esquema básico se apresenta na Figura 1.

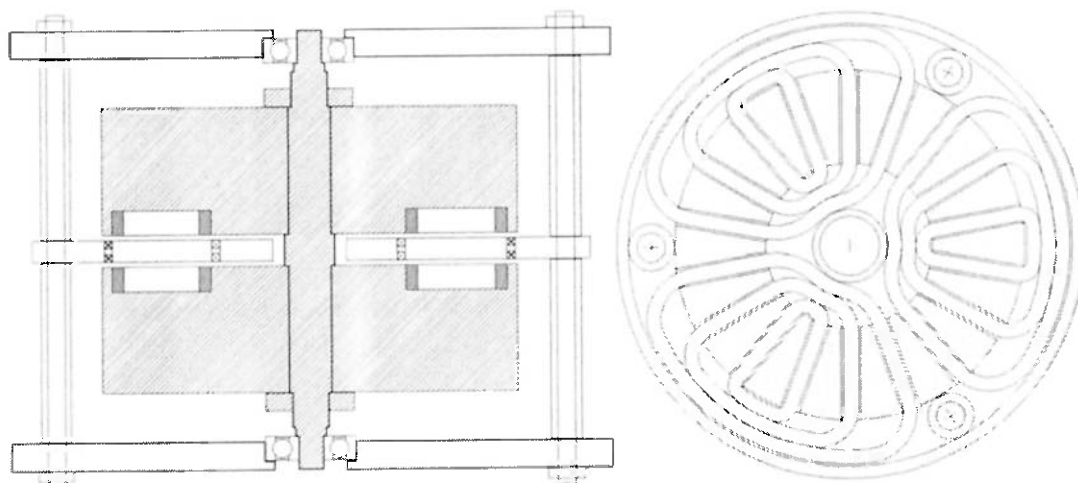


FIGURA 1: DESENHOS TÉCNICOS DO PROTÓTIPO DESENVOLVIDO ANTERIORMENTE

Também as mais diversas instituições vêm desenvolvendo projetos análogos. Dentre os mais úteis – seja pela similaridade com o que aqui será trabalhado, seja pela sua entendida descrição e didática – apresentam-se os projetos realizados com o Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL)^[11],

encabeçados por Richard F. Post, pesquisador com grande produção em sistemas de armazenagem de energia inercial, e com a National Aeronautics and Space Administration (NASA)^[13].

3. REVISÃO LITERÁRIA

Devido à extensão da área de pesquisa envolvida no projeto de uma bateria eletromecânica, será apresentada uma conceituação geral dos tópicos envolvidos, assim como do estado da arte das topologias e conceitos relacionados a este tema, servindo ao leitor como base teórica para a compreensão do projeto, análise, construção e operação do dispositivo em estudo.

3.1 Máquina Elétrica

Sistemas de armazenamento de energia por volantes inerciais têm diversos métodos de propulsão. Os que se utilizam de motores elétricos, buscam topologias que permitam fácil partida e preferencialmente alto já permitam operação como gerador, buscando o alto rendimento.

Aparecem como resposta as máquinas de ímãs permanentes, ao promoverem o campo de excitação sem absorver energia elétrica para isso, aumentando o rendimento da máquina e simplificando sua manutenção^[5].

Motores de ímãs permanentes existem em três configurações básicas: máquinas de corrente contínua com escovas; máquina sem escovas e motores de passo. Máquinas com escova representam maior dificuldade construtiva e perdas ao transferir parte do enrolamento para o rotor. Por sua vez, motores de passo têm aplicações específicas e não teriam maior utilidade para o acionamento de um volante frente a máquinas mais simples. Portanto as máquinas sem escovas ("*brushless*") se tornam a solução mais interessante e mais empregada. Apesar de terem suas desvantagens – principalmente em seu acionamento mais complexo –, máquinas brushless de ímãs permanentes permitem a compactação construtiva de seu projeto ao eliminar o conjunto comutador-escovas, ao mesmo tempo em que permite alta eficiência e potência de saída quando comparada com o motor de indução^[1].

Máquinas *brushless* de ímã permanente separam-se pela forma de acionamento, embora sua construção e enrolamento sigam princípio igual. Existem as máquinas de alimentação trifásica senoidal, que operam como máquinas síncronas, através da presença de campo girante. Há também máquinas acionadas por onda quadrada, de enrolamento polifásico (usualmente três). Nesse formato, parte das fases é alimentada durante um intervalo com corrente contínua, promovido por um esquema de controle de comutação eletrônica, realizado por chaves de estado sólido. Como esse esquema de controle é funcionalmente equivalente à comutação mecânica de máquinas CC, esses motores se denominam comumente máquinas de corrente contínua sem escovas ("*brushless DC*").

O comportamento elétrico da máquina *brushless* é também similar ao da máquina comutada. Sua tensão induzida, como se pode deduzir sem grandes dificuldades^{[2][3][Anexo 15.2]}, é proporcional ao número de espiras, à intensidade do

fluxo magnético concatenado e a velocidade de rotação. O torque, por sua vez, além das propriedades construtivas e magnéticas, é proporcional à corrente.

De qualquer modo, além da definição elétrica da máquina, há variantes construtivas de funcionamento equivalente, porém mais apropriado para cada aplicação. As três configurações consagradas são:

-Rotor interior (Figura 2.a): É a topologia mais clássica para as máquinas AC. Apresenta como principal vantagem a possibilidade de se aproveitar a linha de produção de máquinas AC para sua construção. Suas desvantagens são a reduzida inércia do rotor, geralmente de pequeno raio, e a necessidade de se prover uma grande capacidade de retenção dos ímãs permanentes, que devem ser instalados na periferia do rotor (próximos ao entreferro), ficando submetidos a um grande esforço. Essa topologia demanda normalmente a presença de dois mancais de sustentação do eixo, um em cada ponta.

-Rotor externo (Figura 2.b): Se apresenta como o melhor custo-benefício para a instalação dos ímãs. Sua vantagem é permitir o aproveitamento da linha de produção de armaduras de máquinas CC para a construção de seu estator. Suas vantagens são a elevada inércia de seu rotor e a vantagem de os ímãs ficarem voltados para dentro, tornando mais direta a garantia de sua retenção. O rotor é geralmente desenvolvido na forma de um caneco, e algumas topologias permitem que seu suporte seja realizado por apenas um mancal.

-Rotor em disco ou *pancake* (Figura 2.c): Também chamados de máquinas de fluxo axial ou entreferro axial, trata-se de uma máquina plana, "achatada" no formato de um disco, com seu estator podendo ser miniaturizado a ponto de consistir apenas em enrolamentos de circuito impresso. Suas vantagens são o baixo custo de produção e sua suave rotação devido à ausência de *cogging* (torque devido à interação entre os ímãs permanentes do rotor e as ranhuras do estator). Suas desvantagens são o entreferro relativamente largo, dando margem pra dispersão de campo, e, em algumas topologias, as altas perdas por Foucault e histerese no ferro do estator, limitando sua velocidade de operação. Porém permitindo que o estator fique seguro por material não magnético, e que o fluxo do rotor se feche ou com um disco solidário ao eixo rotativo, ou construindo o rotor em dois discos externos ao estator, aumentando sua eficiência e praticamente eliminando o limite de rotação.

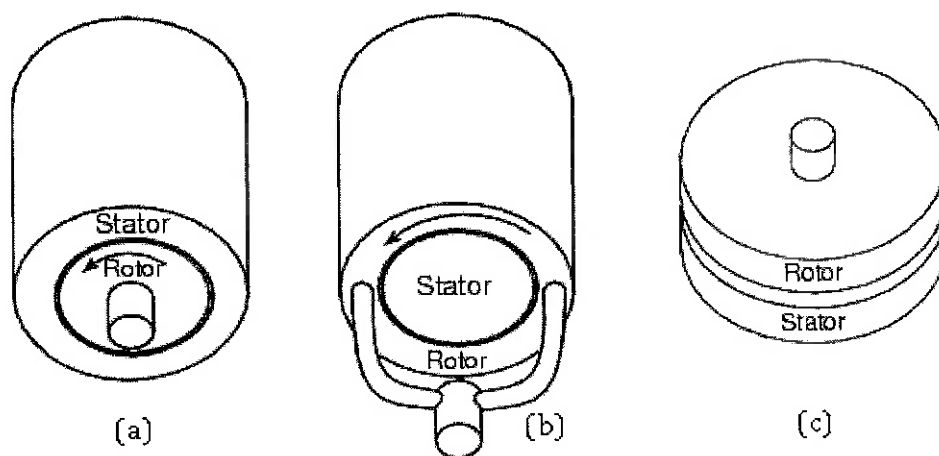


FIGURA 2: TOPOLOGIAS BÁSICAS DO DESENVOLVIMENTO DE MÁQUINAS DC BRUSHLESS

Para volantes em forma de disco, máquinas de fluxo axial se mostram apropriadas. Embora se possa ser apresentada em diversas topologias^[3], a máquina de fluxo axial têm como forte aspecto sua capacidade de ser facilmente integrada em módulos, sendo que “fatias” de estator e rotor podem ser consecutivamente associadas. Particularmente, a topologia de estator único e central com rotor duplo externo, conforme Figura 3, é reconhecidamente vantajosa^[3], principalmente para casos em que se trabalhe com acoplamento com maiores massas. Motores nessa topologia são facilmente encontrados comercialmente.

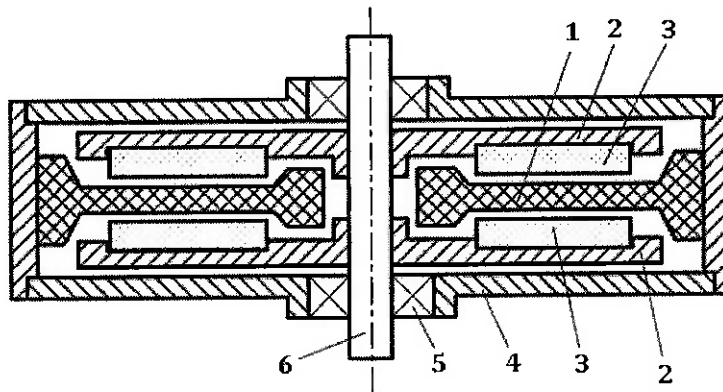


FIGURA 3: TOPOLOGIA DE MOTOR DE FLUXO AXIAL DE DUPLO ROTOR E ESTATOR INTERNO, SEM NÚCLEO, DE [REF DO AXIAL]. 1- BOBINA DO ESTATOR, 2- ROTOR, 3- ÍMÃ PERMANENTE, 4- CARCAÇA, 5- MANCAL, 6- EIXO

É vantajoso para aplicações em volantes de inércia, nos quais o rendimento é fator de maior importância, trabalhar com estator de material não-magnético (“*coreless stator*”). Nesta topologia, não há perdas por histerese ou correntes de Foucault. No entanto, manter uma densidade de fluxo satisfatória no entreferro demanda um volume elevado de material magnético quando comparado a topologias de núcleo ferromagnético, devido ao elevado entreferro.

3.2 Acionamento

As facilidades trazidas na construção da máquina *brushless* se refletem em dificuldades no seu acionamento. Embora sua operação como gerador seja bastante simples, bastando retificar em ponte a tensão em seus terminais para se obter tensão contínua, sua operação como motor tem como primeiras necessidades o sensoriamento de posição do rotor e a eletrônica de comutação. Do ponto de vista do controle, o motor *brushless* não é muito distinto da máquina de corrente contínua comutada, visto a simplicidade das equações de tensão induzida e torque desenvolvido, o que permite controle em malha fechada sem grandes complicações. A dificuldade reside na forma de se implementar essa lógica (Figura 4). Assim como existem duas configurações elétricas para a máquina *brushless*, há dois métodos de acionamento.

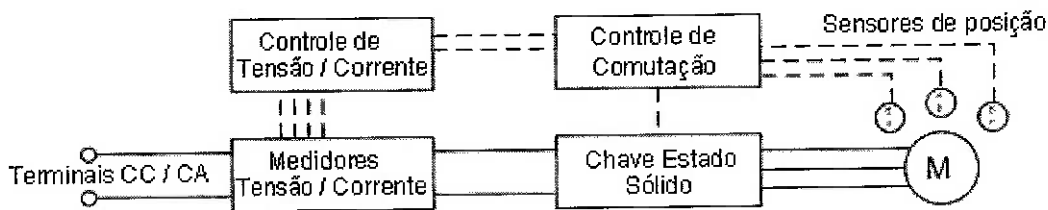


FIGURA 4: DIAGRAMA DA LÓGICA DE ACIONAMENTO DO MOTOR BRUSHLESS

Controladores de onda senoidal (“*sinewave drivers*”) permitem a alimentação do motor com tensão alternada senoidal de frequência controlável. Portanto a velocidade de rotação do campo girante é controlável. Sua arquitetura é complexa, envolvendo usualmente o controle em modulação por largura de pulso (PWM) da alimentação de cada fase a partir de um barramento de corrente contínua. Essa forma de acionamento, de melhor rendimento e resposta dinâmica, encontra maior potencial de aplicação através de métodos de conversão de frequência, que partem de tensões senoidais de determinada frequência, como o método de conversão em matriz (“*matrix converter*”^[21]).

Controladores de onda quadrada, ou trapezoidal (“*squarewave drivers*”) por sua vez realizam a alimentação em corrente contínua, de forma sincronizada à posição do rotor, de forma análoga à operação do conjunto de comutador e suas escovas na máquinas de corrente contínua. Sua arquitetura básica é inerentemente mais simples. Como visível na Figura 5, apenas dois de seus terminais apresentam tensão em determinado instante. Para uma conexão em estrela, isso representa duas fases alimentadas por vez, pois apenas duas chaves de estado sólido são ativadas por estado. É bastante comum o uso de transistores MOSFET (“*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*”) ou IGBT (“*Insulated Gate Bipolar Transistor*”), principalmente pois esses componentes apresentam nativamente a presença de diodo em anti-paralelo, cuja utilidade será explicada a seguir. A seqüência de alimentação que produz a saída indicada na Figura 5.ii é produzida pela série de comutação 1-4, 1-6, 3-6, 3-2, 5-2, 5-4.

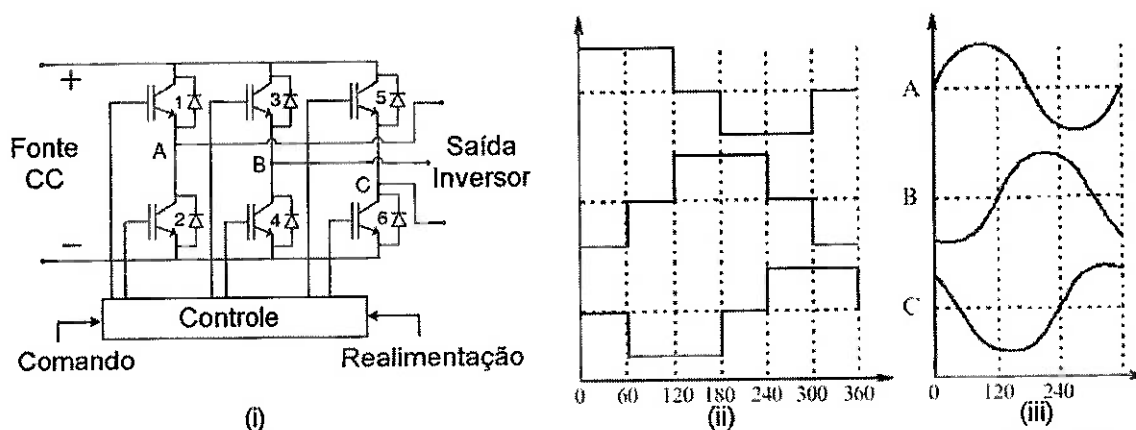


FIGURA 5: INVERSOR DE ESTADO SÓLIDO (I), E FORMAS DE ONDA IDEAIS DE CORRENTE QUADRADA (II) E SENOIDAL (III)

O circuito, no entanto, raramente é restrito à mera comutação, pois sua alimentação usualmente é feita a partir de um barramento de tensão contínua, de valor fixo. Portanto sua operação é estendida para o controle de nível de tensão e/ou corrente, permitindo operação segura, principalmente durante as partidas e

frenagens. Portanto, a estratégia utilizada para controle da tensão presente nos terminais do inversor é o chaveamento em alta frequência de seus transistores. Estratégias como a modulação por largura de pulso (PWM) permitem de forma eficiente que a saída do inversor tenha valor médio proporcional ao tempo relativo em que os transistores permanecem conduzindo (ciclo de trabalho, ou *duty cycle*). Pode-se notar que apenas um dos transistores ligados a cada saída do inversor precisa necessariamente ser chaveado. A presença de diodos em anti-paralelo se mostra necessária para permitir o fluxo de corrente nos períodos em que o transistor é desativado, devido à energia indutiva armazenada nos enrolamentos (processo conhecido como "*free-wheeling*"), e também permitindo a operação do dispositivo como gerador e freio. Nessa configuração de comutação, a corrente se comporta de acordo com a Figura 6. Nota-se que para operação de frenagem forçada, poder-se-ia ativar todos os transistores de determinado lado, colocando em curto a força eletromotriz gerada.

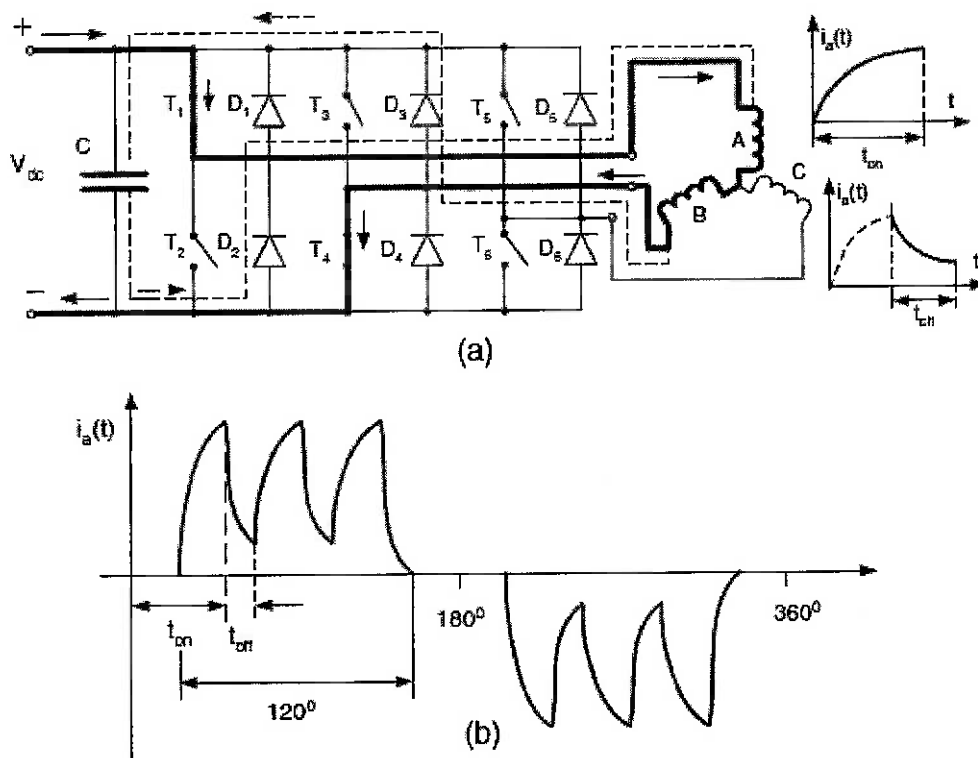


FIGURA 6: CORRENTES DURANTE CHAVEAMENTO DE MOTOR BRUSHLESS: (A)- CORRENTE NAS FASES A E B, (B)- FORMA DE ONDA RETANGULAR DA CORRENTE^[3]

A estratégia citada acima permite a redução, ou direcionamento, das perdas de chaveamento para apenas um lado dos transistores. Isso é particularmente interessante pois geralmente o sistema de controle e o acionamento do motor estão em patamares distintos de tensão, e os transistores superiores precisam de certa lógica de deslocamento de nível de tensão ("*level-shift*") para poderem operar adequadamente. O chaveamento unilateral permite que esse sistema opere à frequência de chaveamento pleno, enquanto os transistores inferiores trabalham em alta frequência, em modulação.

Entretanto, pode-se escolher chavear todos os transistores. Essa estratégia é o primeiro passo para controle da operação em quatro quadrantes, permitindo acionamento com rotação em ambos os sentidos e com aplicação de torque em

ambos os sentidos. Os controladores mais simples permitem apenas a aplicação de torque no mesmo sentido da rotação (operação dois quadrantes). As estratégias de chaveamento unilateral aplicam torque no sentido oposto apenas por métodos de curto-circuito da tensão gerada, o que ocasiona circulação de corrente limitada apenas pelas impedâncias internas, e que não é sensível pela fonte nem por sensoriamento em relação à terra. Entretanto, chaveamento bilateral dobra as perdas nos transistores, além de aumentar a oscilação de corrente (o que provoca maiores perdas no núcleo do motor, quando presente). Essa estratégia, portanto, se justifica quando é necessária a aceleração e desaceleração controlada.

É comum a realimentação de corrente, proporcional ao torque. O devido tratamento desse sinal permite o controle do chaveamento limitando a corrente apresentada ou torque máximo desenvolvido.

Para o sensoriamento de posição do rotor, é necessário algum tipo de transdutores de posição ou rotação. É comum o uso de sensores de efeito Hall, uma vez que se está trabalhando com uma topologia de ímãs permanentes, mas também são utilizados sensores ópticos ou codificadores (absolutos ou incrementais). Embora existam outras estratégias, como uso de *resolvers* (um tipo de transformador rotativo) ou inferência de posição sem sensores, por tratamento dos sinais elétricos envolvidos, não se darão a elas maior importância aqui, visto sua aplicabilidade pontual. Para as topologias mais diretas, são utilizados três sensores de efeito Hall ou ópticos, distanciados entre si. As lógicas mais comuns são as de 60 ou 120 graus elétricos. O objetivo, pois, é de se permitir a distinção da posição do rotor para cada fase. Como no enrolamento trifásico a defasagem entre fases é de 120°, o posicionamento dos sensores a uma distância múltipla de 60° elétricos é necessário e suficiente, embora se deva prever o posicionamento adequado – ou permitir a liberdade de ajuste posterior – para permitir o chaveamento no ponto de menor indução de tensão (linha neutra).

3.3 Dinâmica do Volante

O rotor, consistindo em um eixo giratório acoplado a uma considerável massa e submetido a elevadas rotações, têm em seu comportamento dinâmico um relevante aspecto de projeto. Todo eixo rotativo está sujeito a deflexão, mesmo na ausência de carga. A combinação das massas acopladas ao eixo pode causar deflexão que causará vibrações ressonantes em certa rotação, considerada a rotação crítica, que depende da aceleração gravitacional e do módulo de elasticidade, do momento de inércia, da massa e da localização no eixo dos módulos acoplados^[3].

Outra ameaça à estabilidade dinâmica são os efeitos de desbalanceamento. No projeto de volantes metálicos, são requisitos de maior importância o balanceamento de precisão e o cuidado em minimizar fontes de vibrações e comportamentos instáveis. Usualmente se procuram manter as tolerâncias mínimas nos mancais, porém com o uso de mancais magnéticos, a estabilidade do sistema dependerá de sua rigidez.

Não há tática válida universalmente para a redução e controle desses distúrbios. O projetista precisa dimensionar o rotor tendo em mente efeitos de instabilidade, e buscando dispor de meios de amortecimento. Estratégias para lidar com as ressonâncias da velocidade crítica são, geralmente, dimensionamento do

rotor na tentativa de deixar a frequência crítica acima da maior frequência prevista de operação, ou, em oposição, dimensionar o conjunto tal que a ressonância ocorra bastante abaixo da rotação de operação. Nesse caso, o rotor ultrapassa essa faixa instável durante sua partida e, em regime, supondo o balanceamento bem feito e a disponibilidade de meios de amortecimento, entra-se no regime supercrítico, no qual os efeitos de ressonância ficam limitados em amplitude e o rotor gira sobre seu próprio eixo de rotação ligeiramente fora do eixo de simetria dos mancais. Essa estratégia já foi testada com sucesso em aplicações de volantes inerciais^[9].

3.4 Mancais Magnéticos

A levitação magnética passiva aplicada em sistemas de suporte (mancais) aparece como potencial forma de se anular problemas e perdas oriundos da sustentação com atrito, permitindo aumento da confiabilidade e da eficiência dos sistemas em que se aplica. O crescente desenvolvimento de ímãs permanentes de terras raras deu força às pesquisas dessa área ao permitir que se driblasse a principal restrição dos mancais magnéticos passivos: apresentar características de rigidez e amortecimento satisfatórias para aplicações industriais. Embora ainda sejam bastante dependentes da temperatura de operação, podendo se degradar a partir de 80° C, ímãs permanentes tem cada vez mais espaço no projeto de máquinas e dispositivos de levitação.

Mancais magnéticos passivos não requerem a lógica de controle necessária aos mancais ativos (eletromagnéticos). Porém, por terem seus parâmetros definidos em seu projeto, sendo portanto a rigidez e o amortecimento inerentes a sua construção, mancais de ímãs permanentes precisam garantir seu desempenho ao longo de toda a excursão de operação.

A maior dificuldade de projeto, no entanto, reside em garantir a estabilidade do dispositivo. Para se obter um sistema de levitação completa, é necessário driblar a instabilidade inerente a sistemas de magnetização fixa. As possíveis saídas são os casos em o Teorema de Earnshaw^[6] não se aplica: controle ativo em malha fechada, campos variantes no tempo, sistemas diamagnéticos, materiais supercondutores e *ferrofluids* (fluidos que respondem fortemente a campo magnético). Embora existam estudos e soluções apresentadas explorando cada uma dessas estratégias, nenhuma é de caracterização trivial.

A aplicação do Teorema de Earnshaw – que declara que a soma das rigidezes de suspensão é igual ou menor que zero – a um sistema de simetria axial permite exprimir a relação:

$$K_{ax} + 2 \cdot K_{rad} \leq 0 \quad (2)$$

Sendo K_{ax} a rigidez no sentido axial e K_{rad} , no sentido radial. A partir de (2), pode-se notar que um sistema isolado estável axialmente será instável radialmente e vice-versa, portanto o sistema precisa estar associado a outros dispositivos que forneçam o derivativo de força (rigidez) suficiente para garantir a estabilidade total. Uma estratégia popular de projeto assumir esse sistema externo como existente, e estudar os mancais magnéticos a partir dessa premissa.

3.4.1 Mancal primário

Topologias de mancais magnéticos passivos vêm sendo desenvolvidas principalmente nos últimos 15 anos. Respeitando a simetria axial das máquinas elétricas, torna-se conveniente trabalhar mancais de ímã permanente no formato de anéis ou discos. A interação entre essas peças permite a estabilidade em um eixo. Topologias comuns são apresentadas na Figura 7.

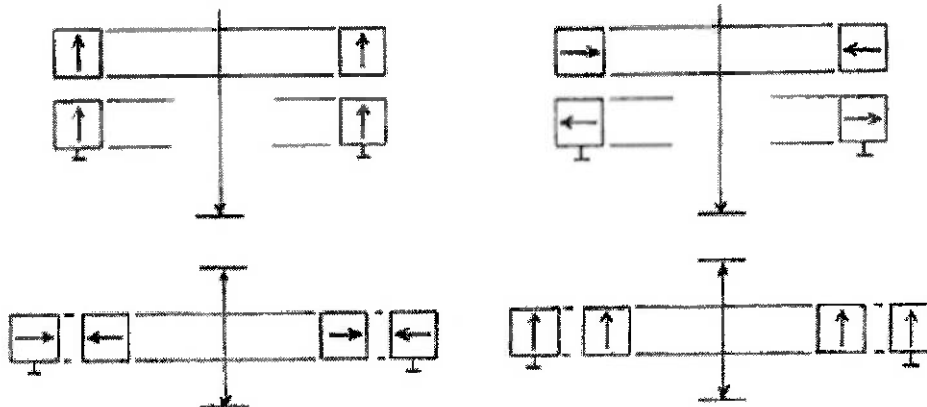


FIGURA 7: MONTAGENS DE ÍMÃS PERMANENTES ANULARES QUE PERMITEM ESTABILIDADE RADIAL

Há décadas se conheciam as disposições geométricas que permitem essa operação, mas apenas mais recentemente foi provado que se podem alcançar os mesmos resultados atingidos com o emprego de anéis de ímã permanente de magnetização radial através de ímãs de magnetização axial, que são muito mais simples de se produzir (e portanto mais baratos). Deve-se notar que a inversão da polaridade de magnetização de apenas uma das peças altera o eixo estável (de axial para radial e vice-versa).

Os trabalhos do francês Jean-Paul Yonnet^{[7][8]} foram especialmente produtivos nesse campo, e servem de base para o estudo dessa topologia. Também, descobriu-se que a montagem formada por anéis sobrepostos de orientação magnética oposta traz diversos benefícios para a rigidez do sistema^[16]. Com as adequadas aproximações, mancais dessa arquitetura podem ter suas propriedades encontradas analiticamente^[8].

A associação de mancais magnéticos dessa arquitetura nas extremidades do eixo permite se alcançar a estabilidade quanto à torção. No entanto, o conjunto permanece instável no sentido axial ou radial.

3.4.2 Mancal auxiliar de sustentação

Mancais passivos são inerentemente estáveis, e, enquanto sua associação permite equilibrar as forças de atração ou repulsão, para se garantir a estabilidade do sistema, é ainda necessário prover a rigidez suficiente. Para os casos apresentados na Figura 8, é possível realizar o devido dimensionamento e alinhamento de forma que se atinja o ponto de equilíbrio instável das forças. Nessa precisa posição, o sistema fornece uma alta força derivativa radial, sem a manifestação de forças no sentido axial. Para manter o sistema nessa posição, não é necessária a execução de força em sentido algum, porém algum subsistema

externo precisa garantir a presença de rigidez estabilizante (positiva) no sentido axial, de magnitude maior do que a promovida pelo módulo de mancais magnéticos (negativa).

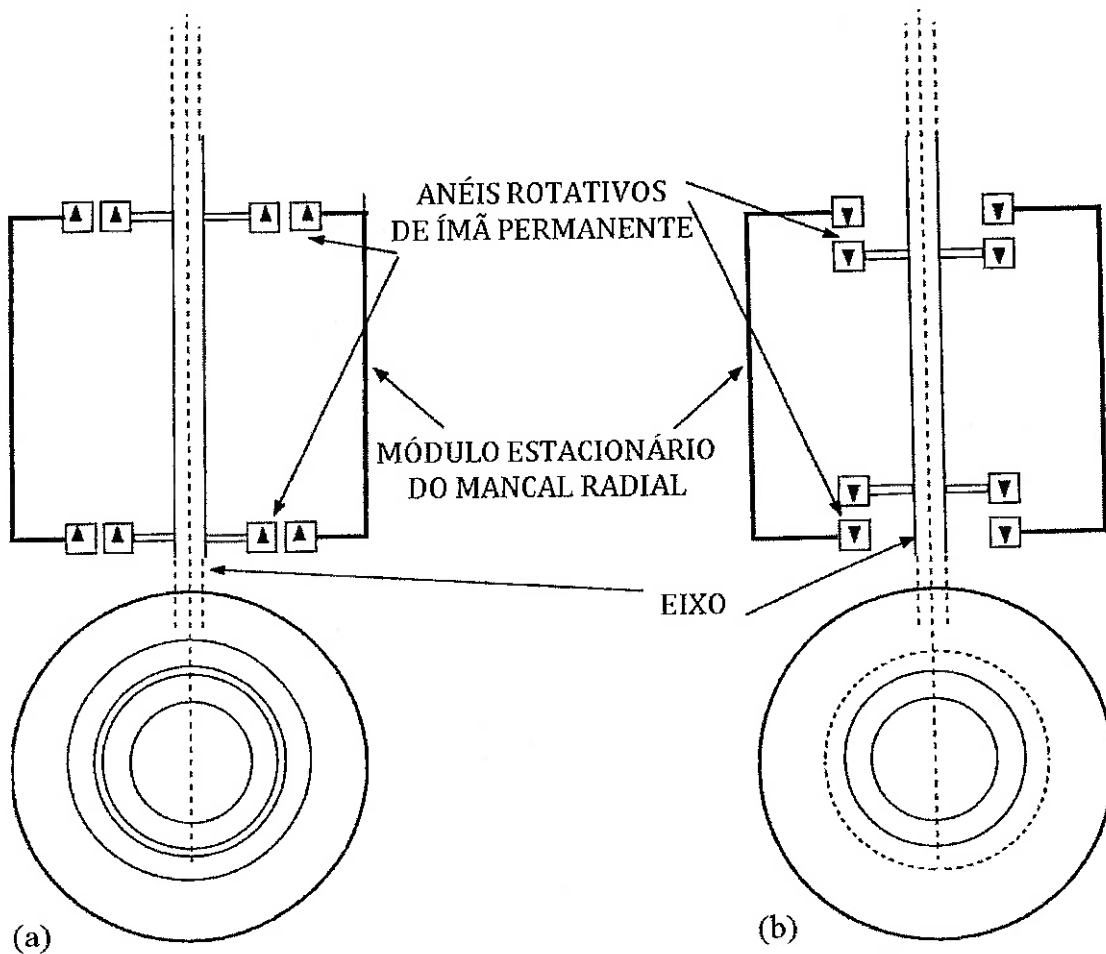


FIGURA 8: MONTAGENS PARA MANCAIS ESTÁVEIS RADIALMENTE^[11]

Uma possível solução, não levitada, promover o suporte do eixo instável através de um mancal mecânico, de contato pontual. As perdas por atrito nesse caso são bastante baixas, uma vez que são proporcionais à força axial, e essa deve se manter praticamente nula. Usualmente, se trabalha com essa alternativa através de mancais mecânicos provendo suporte axial e mancais magnéticos estáveis radialmente. Isso porque mancais mecânicos de suporte axial são mais fáceis de instalar e apresentam menores perdas, especialmente no caso de mancais cerâmicos.

Existem soluções alternativas, completamente levitadas. Um método confirmado faz uso da estratégia de campos variantes no tempo, através de bobinas em movimento relativo através de campo magnético variante no espaço. Costuma ser mais fácil acoplar pastilhas magnéticas no rotor e manter o enrolamento estacionário. Os ímãs se costumam dispor em uma montagem bastante específica, chamada *Halbach array*. Tal montagem proporciona a presença de campo magnético em uma face enquanto na outra o campo é praticamente nulo. Uma série de condutores elétricos estacionários é disposta então imersa no campo magnético gerado, conforme Figura 9. A movimentação da montagem de ímãs permanentes promove nas bobinas uma força eletromotriz.

4. O PROJETO – JUSTIFICATIVA E METODOLOGIA

É visível, pela revisão literária, o volume de trabalhos de caráter científico e de pesquisa dedicados a temas relacionados aos conceitos envolvidos neste estudo. Porém, é comum que se vejam trabalhos pontuais, de foco no estudo dedicado de determinado conceito. Portanto existem projetos e topologias desenvolvidos comprovadamente funcionais de maneira isolada, em ambiente controlado. Isto é, a maior parte dos trabalhos isola o dispositivo em estudo – o mancal magnético, a máquina elétrica, o eixo rotativo – dos componentes externos e verifica seu comportamento independente. Disto, existe pouca pesquisa no que tange à associação dos componentes, e, portanto, seu comportamento fora de condições ideais.

O desafio e propósito deste estudo é desenvolver um protótipo que envolva diversas das novas topologias e métodos de controle e acionamento para confirmar a viabilidade de sua associação e, principalmente, estudar seu comportamento em operação, aspecto pouco visível na produção científica presente.

4.1 Foco e Restrições de projeto

O projeto do novo protótipo permitiria, teoricamente, total liberdade de criação em seu desenho. Porém se buscou manter sua arquitetura similar à do projeto anterior, na busca de se manterem válidas possíveis comparações de desempenho entre os protótipos. Outro objetivo mantido em mente é a portabilidade e segurança em operação. Portanto o volante a ser desenhado precisava ser leve o bastante para não depender de estruturas de suporte para sua movimentação, e pequeno o bastante para representar menor risco de ferimentos graves em sua construção durante sua operação a elevadas rotações.

4.2 Revisão do Protótipo Anterior

O protótipo desenvolvido anteriormente trata-se de um volante de inércia de rotor duplo, sendo formado por dois cilindros solidários de aço, de diâmetro de 16 cm e altura de 5 cm. A máquina elétrica foi escolhida de fluxo axial por tornar mais fácil a tarefa de alocação das pastilhas de ímã permanente, que promovem o campo magnético no entreferro, dentro do volante (Figura 1). Como para seu acionamento decidiu-se operar com um conversor rotativo de frequência (gerador síncrono acionado por máquina de corrente contínua), o que torna difícil atingir altas frequências, a máquina elétrica definida apresenta somente um par de pólos. Todo seu suporte é realizado por dois mancais mecânicos, de rolamento, presos na extremidade do eixo.

Devido a sua topologia, torna-se fácil trabalhar com o conjunto em módulos, dispostos no sentido axial. Portanto nota-se que há margem para o projeto e instalação de mancais magnéticos nas extremidades do eixo. O projeto mecânico pode ainda passar por alterações, caso se mostre necessário, e há campo de melhora no projeto elétrico.

4.3 Metodologia e Diretrizes

A metodologia de desenvolvimento escolhida foi trabalhar em paralelo o projeto estrutural e mecânico, o elétrico e de acionamento e por fim o dos mancais. Devido a sua montagem associada, os projetos precisam progredir junto, pois alterações de topologia em determinado subsistema podem implicar em modificações dos projetos das demais partes.

Primeiras análises do projeto definem diretrizes para seu desenvolvimento. Busca-se, por uma questão de orçamento e facilidade, reaproveitar a estrutura do protótipo anterior. A topologia, com os componentes dispostos axialmente, permite a fácil associação de elementos adicionais, como mancais ou sensores. É previsto o prolongamento do eixo, para permitir a instalação de módulos de mancais magnéticos em suas extremidades.

Como o projeto envolve o desenvolvimento do sistema de acionamento, prevê-se operação em altas rotações, tendo-se como valor de referência inicial 50000 RPM. O acionamento deve ser capaz de acelerar o rotor até a velocidade nominal definida em projeto, ao mesmo tempo em que uma lógica de controle deve permitir saída de potência através de um nível determinado de tensão contínua.

Idealmente todo o sistema seria encapsulado, operando em ambiente despressurizado.

5. PROJETO DOS MANCAIS

5.1 Mancal Magnético

O sistema de mancais magnéticos representa o desafio técnico mais crítico ao desenvolvimento do projeto. Como estratégia de projeto, assume-se inicialmente que se garante a estabilidade axial por meios externos, e foca-se o desenvolvimento de mancais de estabilização radial. Após sua definição, pode-se estudar a viabilidade de meios de levitação completa, ou projetar meios mecânicos de estabilização.

5.2 Mancal de Sustentação Radial

5.2.1 Primeiro desenvolvimento

O princípio seguido para os mancais de sustentação primários será o de anéis concêntricos, trabalhando em modo de repulsão, conforme Figura 8.a. Seu dimensionamento deve ser tal que a rigidez promovida por tal sistema seja suficiente para manter o rotor estável ao longo de toda a operação.

Embora métodos analíticos permitam uma primeira estimativa das forças e da rigidez envolvida, optou-se por utilizar simulação de campos magnéticos pelo método dos elementos finitos para a definição de seus parâmetros.

Para o cálculo preciso da rigidez na direção radial, seria necessária simulação em três dimensões. Porém, para o estado de equilíbrio, deduz-se do Teorema de Earnshaw para sistemas de simetria axial a relação:

$$K_{ax} = -2 \cdot K_{rad} \quad (3)$$

A rigidez na direção axial pode ser extraída por simulação bidimensional de simetria axial, mais direta. Com isso, pode-se obter a rigidez radial no eixo central de simetria. O uso dessa relação foi empiricamente comprovado^[13]. Além disso, pode-se estimar a rigidez para deslocamentos radiais do ponto de equilíbrio através de aproximações analíticas^[18].

Para se acoplar os mancais no eixo rotativo, buscaram-se anéis de neodímio-ferro-boro (NdFeB) de dimensões tais que seu raio interno permitisse a inserção do eixo através da montagem, e fosse possível a montagem de um anel externo a outro, deixando entre si um pequeno entreferro. As dimensões comerciais mais adequadas para tal propósito foram:

Anel interno – D: 40 mm; d: 26 mm; h: 5 mm

Anel externo – D: 50,5 mm; d: 41,7 mm; h: 10 mm

Sendo D seu diâmetro externo, d seu diâmetro interno, e h sua altura. Nessa configuração, trabalha-se com um entreferro de 0,85 mm. A rigidez do sistema pode ser ajustada pelo número de anéis a serem empilhados e sua configuração (direção de magnetização, conforme Figura 10).

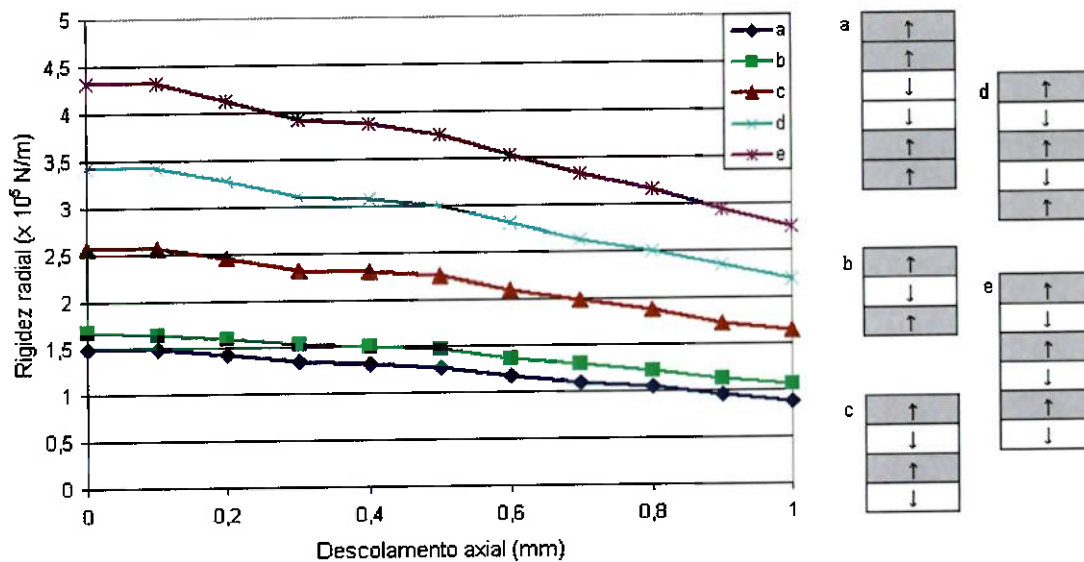


FIGURA 10: RIGIDEZ RADIAL DO CONJUNTO PARA DIVERSAS TOPOLOGIAS DE MONTAGEM DO MANCAL MAGNÉTICO

Devido à difícil caracterização do comportamento dinâmico do rotor, a escolha de topologia é feita com base em estimativas, e espera-se ver suas tolerâncias à respostas mecânicas empiricamente. Através da ponderação entre rigidez prevista, dimensões de cada módulo e custo do material magnético, optou-se trabalhar com seis fatias de material magnético orientado alternadamente, correspondendo, portanto, em seis unidades do anel externo e doze unidades do anel interno por módulo.

Cada série de anéis magnéticos deve ser montada sobre um encapsulamento de material ferromagnético. O conjunto associado aos ímãs internos será acoplado ao rotor, e o conjunto externo deve ser preso à estrutura estacionária. Através de roscas, deve ser possível ajustar o deslocamento dos módulos estacionários ao longo da direção axial. Esse ajuste permite a alteração da força de expulsão na direção axial exprimida pelos mancais, com o objetivo de compensar o peso do volante e atingir a posição de equilíbrio (instável), aliviando os mancais de apoio. Os desenhos dessa topologia se apresentam no Anexo 15.8.

Nota-se que essa arquitetura representa significativo aumento do comprimento do conjunto total, implicando o emprego de um eixo com quase três vezes o comprimento do eixo do protótipo anterior. Isso pode potencializar problemas com deflexão, e talvez seja necessário o aumento de seu diâmetro, implicando em ajustes na furação das peças do volante.

5.2.2 A Questão do Custo e da Disponibilidade Comercial

A grande restrição enfrentada para a implementação da topologia acima proposta é o custo do material magnético. Ímãs de terras raras no formato de anéis têm custo significativamente mais alto do que ímãs de mesmo diâmetro no formato de disco. Portanto o custo por volume de material magnético é muito elevado para pastilhas desse formato, e a soma necessária para a compra de todos o material previsto em projeto se mostrou maior do que o orçamento inicialmente permitido para o desenvolvimento deste projeto.

Além dessa questão, a disponibilidade comercial de pastilhas dessa geometria particular é baixa, e representa uma ameaça para o desenvolvimento do projeto, uma vez que a importação de peças adicionais representa um período de um mês parado. Com essas questões em mente, foi necessário desenvolver um novo projeto de mancal magnético.

5.2.3 Uma nova topologia de mancal de ímãs permanentes

Visto o aumento do comprimento da montagem prevista final ocasionado pelo emprego dos mancais magnéticos inicialmente propostos, mostra-se necessária a aplicação de uma topologia mais compacta. Pensando nisso foi desenvolvida uma topologia alternativa, no modo atração, conforme Figura 8.b.

A desvantagem de tal topologia é que ela não permite tão fácil associação de anéis magnéticos orientados alternativamente. Portanto para alcançar altos valores de rigidez, é necessário empregar maior volume magnético. A topologia no modo atração, no entanto, permite que se trabalhe com anéis magnéticos de mesmas dimensões, uma tática comercialmente mais viável. Ainda mais, essa estratégia permite o acoplamento dos anéis magnéticos rotativos diretamente no volante, facilitando sua construção.

Ainda assim, anéis de material magnético de dimensões tais que a rigidez do conjunto se aproxime à definida na topologia anterior somam um custo similar ao encontrado anteriormente. Portanto definiu-se uma nova arquitetura de baixo orçamento, não encontrada na literatura.

A nova topologia consiste em se trabalhar com pequenos discos de material magnético dispostos tangentes um ao outro, no formato de um grande anel. Uma peça de material ferromagnético, com seção de corte em trapézio ou em "T", é sobreposta à montagem de ímãs, concentrando e uniformizando o fluxo magnético, anulando possíveis efeitos de relutância variável, conforme Figura 11. Essa peça serve também para sustentação e fixação da montagem.

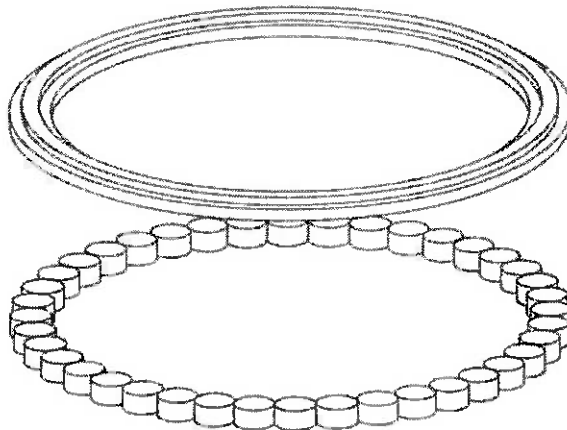
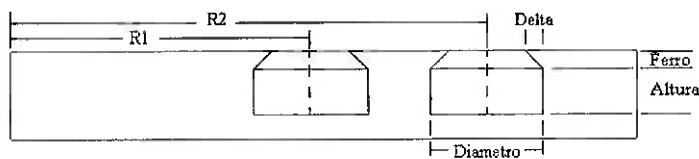


FIGURA 11: ANEL FORMADO POR PEQUENOS DISCOS DE ÍMÃ PERMANENTE E ANEL FERROMAGNÉTICO ASSOCIADO

Dois conjuntos (anéis) de discos magnéticos devem ser empregados para cada face do mancal magnético, com sentidos de magnetização opostos, melhorando a distribuição de material magnético e promovendo o fechamento do seu circuito. Os conjuntos são simétricas em relação ao plano do entreferro, facilitando sua fabricação

Através de simulação de campo magnético com as devidas aproximações (Figura 12), nota-se que é necessário um volume de material magnético superior (por volta de 25%) ao empregado na topologia anterior, porém seu custo total, por se tratar de peças de fabricação simples e distribuição massiva, é 70% inferior.



| Rigidez radial ($\times 10^5$ N/m) | | | | | |
|-------------------------------------|----|-------|-------|------------|------|
| Parâmetros (mm) | | | | Entreferro | |
| R1 | R2 | Delta | Ferro | 1 mm | 2 mm |
| 26 | 50 | 2 | 2 | 6,25 | - |
| 32 | 57 | 2 | 2 | 7,32 | - |
| 38 | 62 | 0 | 2 | 8,31 | - |
| 32 | 57 | 0 | 2 | 4,60 | 2,47 |
| 32 | 57 | 1 | 2 | 5,92 | 2,80 |
| 32 | 57 | 2 | 2 | 7,32 | 2,99 |
| 32 | 57 | 3 | 2 | 8,04 | 2,86 |
| 32 | 57 | 1 | 1 | 5,59 | - |
| 32 | 57 | 2 | 1 | 6,39 | - |
| 32 | 57 | 3 | 1 | 6,54 | - |

Diâmetro: 10 mm

Altura: 5 mm

FIGURA 12: RIGIDEZ DO CONJUNTO NA RIGIDEZ RADIAL, PARA DIVERSAS CONFIGURAÇÕES CONSTRUTIVAS

Um aspecto negativo dessa topologia é que ela prevê a alocação de ímãs de NdFeB a uma grande distância do centro de rotação, e, portanto, a uma mesma rotação, os material magnético dessa arquitetura está sujeito a esforços mecânicos maiores do que estaria o material da topologia anterior. Esse fator limita a rotação

máxima do volante em um valor inferior ao antes previsto, definido agora em pouco menos que 20000 RPM (Anexo 15.1).

A topologia básica dessa montagem pode ser vista na Figura 13. Desenhos técnicos se encontram no Anexo 15.9.

5.3 Mancais de Suporte

Seria interessante trabalhar-se com a levitação completa do volante, eliminando o atrito por contato mecânico. Topologias como as desenvolvidas pela NASA apresentam estabilidade inerente em operação^[3], empregando apenas ímãs permanentes e um conjunto de enrolamentos. Entretanto, testes em pequena escala comprovaram que seria necessária uma montagem com alta quantidade de material magnético para se obter a tensão induzida suficiente para promover as forças de restauração necessárias. Este módulo seria de complicada construção, e representaria um custo adicional em material magnético. O desenvolvimento de tal dispositivo demandaria maior tempo dedicado a seu projeto, e, portanto, para a montagem aqui proposta, resolveu-se adotar um método mais simples de suporte.

Para o suporte axial, devem ser usados mancais de contato, consistindo em uma esfera de aço solidária ao eixo, que fará contato contra uma superfície estacionária de aço. As perdas por atrito nos pontos de contato deve se manter bastante baixa, desde que os mancais de estabilização radial sejam posicionados de forma a compensar o peso do conjunto volante, aliviando os esforços sobre o apoio axial.

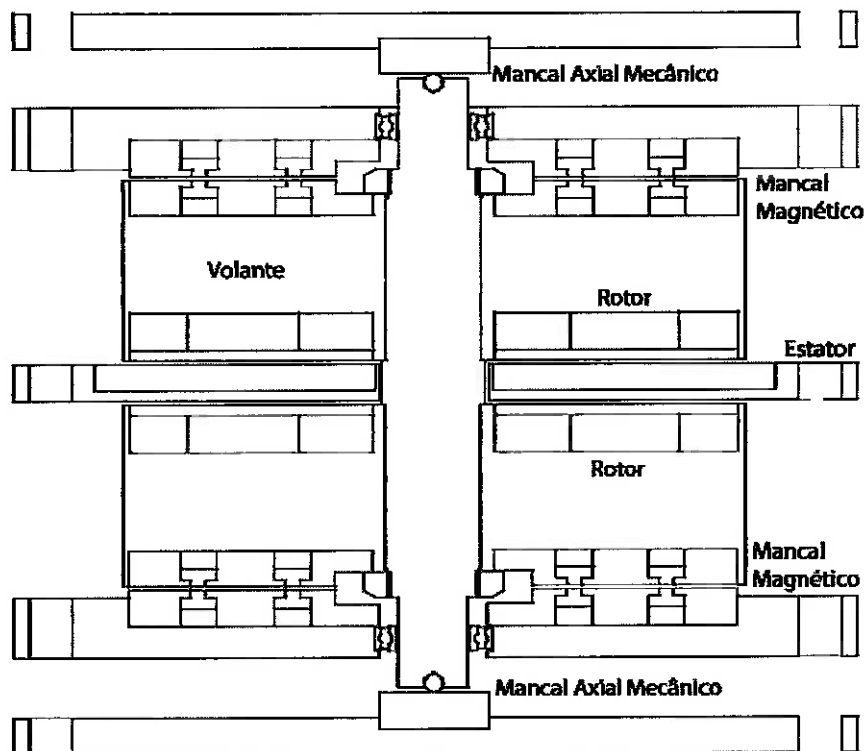


FIGURA 13: VISTA EM CORTE DA TOPOLOGIA DESENVOLVIDA

Adicionalmente, para garantir a segurança de operação, evitando uma grande excursão do rotor e auxiliando sua montagem, serão instalados mancais de rolamento de segurança (*backup*), próximos às extremidades do eixo. Esses mancais permitirão uma pequena margem de movimentação do rotor, permitindo a demonstração de funcionamento do mancal magnético, porém impedindo o rotor de entrar em contato com o estator ou parte da estrutura, conforme Anexo 15.9.

6. PROJETO ELETROMAGNÉTICO

6.1 Topologia da Máquina Elétrica

A máquina elétrica utilizada, que deve operar como motor e gerador, terá ter sua arquitetura mantida, sendo definida, portanto, em uma máquina de corrente contínua sem escovas de fluxo axial e excitação de ímãs permanentes, de estator sem núcleo ferromagnético e rotor duplo.

Assumindo acionamento eletrônico, o número de pólos não precisa ser mantido baixo, e por isso decidiu-se trabalhar com quatro pares de pólos. O aumento do número de pólos melhora a distribuição de campo magnético no entreferro, assim como o aproveitamento das bobinas, isto é, a relação entre comprimento útil das espiras e seu comprimento total. No entanto, o aumento excessivo do número de pólos torna difícil o enrolamento do estator e a alocação de ímãs permanentes no rotor. A definição de oito pólos magnéticos permite o reaproveitamento das pastilhas magnéticas do protótipo anterior.

O enrolamento do estator, por facilidade construtiva, deverá ser de simples camada e passo pleno.

6.2 Circuito Magnético

O circuito magnético da máquina deriva da Figura 14. Para os fins de análise, o circuito utilizado é bastante simples. Deve-se ter em mente que o estator sem núcleo magnético representa entreferro do ponto de vista dos ímãs.



FIGURA 14: CIRCUITO MAGNÉTICO SIMPLIFICADO

O cálculo do circuito magnético pode ser feito, com as devidas simplificações, de maneira analítica e simples. Estimativas da relutância do circuito ou de seus efeitos de dispersão e espraiamento permitem a definição de uma curva do circuito magnético em um gráfico de densidade de fluxo magnético (B) versus intensidade de campo magnético (H).

O cruzamento desta reta, definida por sua permeância, com a curva de desmagnetização dos ímãs permanentes define o ponto de operação do circuito, permitindo se encontrar o fluxo magnético no entreferro (Figura 15). Os cálculos deste processo se apresentam no Anexo 15.2.

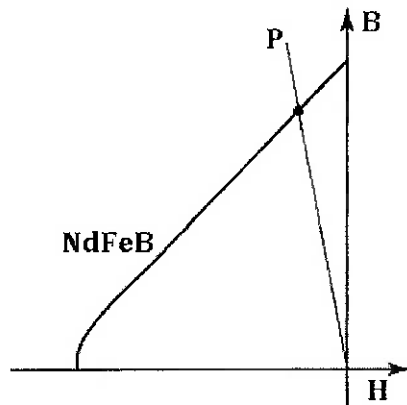


FIGURA 15: DIAGRAMA PARA SE ENCONTRAR O PONTO DE OPERAÇÃO DO CIRCUITO MAGNÉTICO

6.3 Projeto Elétrico

A distribuição de densidade de fluxo no entreferro na direção azimutal (ao longo da rotação) deve se apresentar aproximadamente retangular (Figura 16), entretanto efeitos de dispersão e espriamento provocam certa suavização na distribuição de campo. A distribuição é variável também ao longo da direção radial, principalmente porque os ímãs permanentes têm formato cilíndrico. O arco magnético, portanto, que se apresenta de aproximadamente 130° no raio que cruza o ponto central do ímã permanente, tem valor reduzido fora dessa circunferência.

Nesse caso, para o projeto elétrico, como se deverá trabalhar com passo pleno, torna-se mais cômodo calcular a tensão induzida no enrolamento através do fluxo concatenado por pólo. Estipulando a rotação nominal em 20000 RPM e assumindo a tensão de trabalho nominal como 100 V, define-se o número de espiras para tal condição, conforme Anexo 15.2, em 5 espiras por fase.

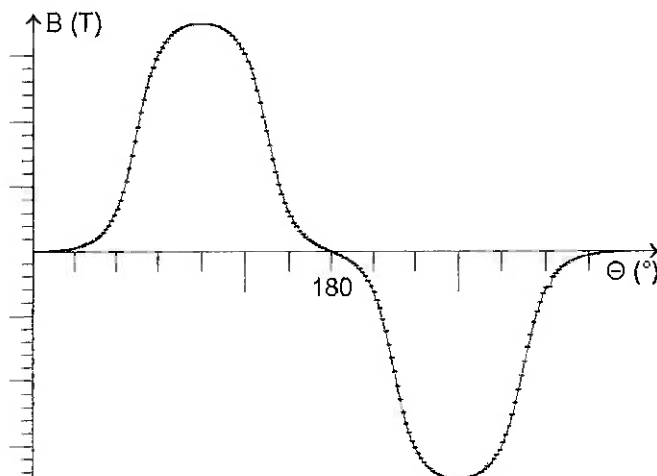


FIGURA 16: DISTRIBUIÇÃO APROXIMADA DE DENSIDADE DE FLUXO NO ENTREFERRO NA DIREÇÃO AZIMUTAL

O número de condutores do enrolamento encontra-se pela área de ranhura e cabeça de bobina. Optando-se por trabalhar com condutor AWG 17, têm-se o número de condutores por ranhura, conforme Anexo 15.2, de 15 condutores por ranhura, consistindo em três bobinas em paralelo. A capacidade de corrente em regime estima-se em 30A.

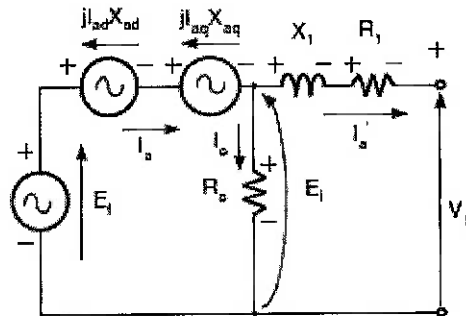


FIGURA 17: CIRCUITO EQUIVALENTE POR FASE (CONVENÇÃO DO GERADOR)^[3]

Embora o projeto elétrico seja feito para o modo gerador, pode-se estender seu resultado para a operação no modo motor. Basta analisar o circuito equivalente da máquina, conforme Figura 17, em que R_1 é a resistência do estator, X_1 é sua reatância de dispersão, E_f é a forma eletromotriz induzida pela excitação de ímãs permanentes, V_1 é a tensão nos terminais da fase e I_a é a corrente eficaz do estator. A resistência em paralelo R_e representa as perdas por corrente Foucault nos condutores. As indutâncias X_{ad} e X_{aq} representam as reatâncias síncronas nos eixos direto e de quadratura, responsáveis pela reação de armadura.

Para operação em onda quadrada, é comum desprezar-se os efeitos indutivos, e, portanto, para alimentação em estrela, tem-se a relação:

$$V_{DC} = E_{f,-l} + 2 \cdot R_1 \cdot I_a \quad (4)$$

Sendo V_{DC} a tensão de alimentação promovida pelo inversor, $E_{f,-l}$ a soma de das forças eletromotrizes induzidas em duas fases e $2 \cdot R_1$ representando a resistência vista pelos terminais, assumindo enrolamento equilibrado. Disso se nota que a operação como motor só precisa superar as perdas no cobre para promover tensão no enrolamento tal que se atinja a rotação nominal.

7. PROJETO MECÂNICO

7.1 O Volante de Inércia

O volante não representa a maior preocupação de projeto. Suas dimensões foram mantidas tais que se poderia ter bom aproveitamento energético sem que ficasse muito pesado ou grande.

Embora se buscasse aproveitar o volante do protótipo anterior, a definição da nova topologia de mancal magnético tornou bastante difícil sua alocação acoplada ao rotor. Portanto decidiu-se fabricar uma nova peça, e logo se buscou tentar melhorar o projeto.

Seu diâmetro foi ligeiramente aumentado para dar espaço aos mancais magnéticos, passando de 16 para 17 cm. Desenhos técnicos são encontrados no Anexo 15.9.

7.2 Eixo

O eixo apresenta regiões de diâmetro distinto a fim de garantir a separação mecânica das peças envolvidas, que, em sua maioria, tendem a aproximação axial devido às forças magnéticas.

Após a decisão de se alterar o volante, o eixo teve também seu raio aumentado, reduzindo o risco de problemas devido à deflexão.

7.3 Mancal Magnético

Devido à arquitetura do mancal magnético, formado por diversas pastilhas de NdFeB, a serem dispostas próximas umas as outras, apresentando, porém, mesmo sentido de magnetização, é prevista certa dificuldade de montagem, uma vez que os ímãs apresentarão a tendência de repelir-se.

As peças de concentração de fluxo magnético foram feitas tais que permitem o encaixe com peças de material não magnético para sua fixação. Prevê-se a construção de peças em alumínio para a contenção mecânica do pacote magnético, e fixação no volante (através de parafusos).

7.4 Topologia de Montagem

As peças projetadas permitem sua montagem de forma modular, facilitando sua montagem por partes e possíveis alterações locais.

Prevê-se a construção de uma estrutura que sirva para alocação dos sensores de posição, a ser posicionada próxima ao volante de inércia.

Todo o sistema é preso por encaixes e parafusos, tornando simples possíveis tarefas como desmontagem e alterações de peças. A montagem e fixação da estrutura completa serão feita através de seis tirantes (barras roscadas), que atravessarão todas as peças, prendendo-as entre porcas. As arruelas usadas devem ser do tipo lisas, que, embora não promovam igual fixação, permitirão o ajuste mais fácil das peças ao longo dos tirantes.

7.5 A Estratégia de Construção

É previsto que os maiores desafios para a montagem residirão nos mancais magnéticos. As inerentes forças de repulsão podem dificultar a tarefa de posicionamento dos ímãs, talvez demandando a fabricação de peças auxiliares para sua montagem.

Para a montagem final, se pronunciarão diversas forças na direção axial. A montagem do rotor duplo em torno do estator deve ser feita com cuidado a fim de não danificá-lo, uma vez que os ímãs do rotor tenderão a se atrair.

As peças que integram os mancais magnéticos também tendem a se atrair, e portanto sua instalação deve prever um método de se garantir o entreferro. Acredita-se que através do ajuste das porcas ao longo dos tirantes de fixação, essa tarefa será possível.

Deve ser tomada particular cautela quanto à possibilidade de impactos no mancal de apoio axial. Impactos excessivos poderiam danificar a esfera de aço ou seus apoios.

8. PROJETO ELETRÔNICO

8.1 A Lógica de Controle e Acionamento

O método básico de acionamento da máquina elétrica não tem grande margem de projeto, seguindo sempre a mesma essência, como pode ser visto na Figura 18.

Deve haver o circuito de chaveamento de potência operando como inversor, que permite a operação da máquina como motor. Para tanto, o acionamento em onda quadrada em um quadrante já é suficiente. Ao mesmo tempo, deve haver uma ponte retificadora e um sistema de condicionamento da tensão de saída. Como a força eletromotriz induzida é proporcional à rotação, a tensão de saída deverá variar durante a operação do módulo como bateria, sendo necessário um conversor de corrente contínua.

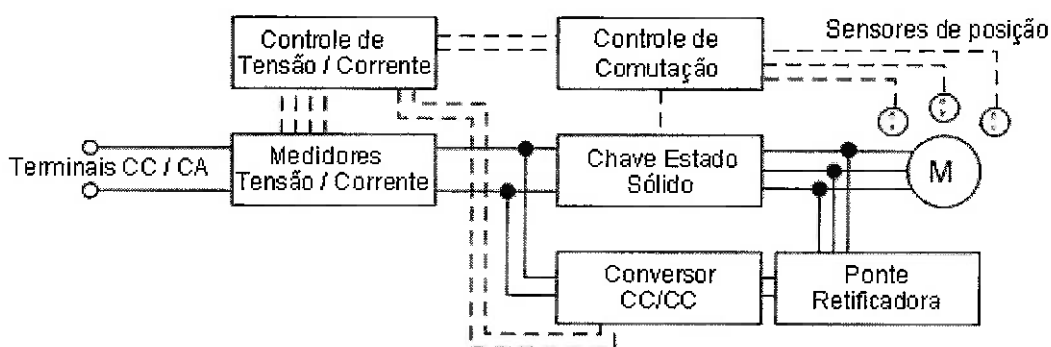


FIGURA 18: DIAGRAMA LÓGICO DO DRIVER DESENVOLVIDO

O controle e acionamento da máquina elétrica foram projetados com foco em simplicidade, porém com confiabilidade. Por isso optou-se em buscar circuitos integrados comerciais para trabalhar a lógica de comutação, uma vez que se busca operar em altas frequências de rotação, e os microcontroladores comerciais já são projetados para lidar com os problemas que podem surgir com a alta frequência de chaveamento.

8.2 Controle Eletrônico

O acionamento foi projetado com foco em simplicidade, porém com confiabilidade. Por isso optou-se em buscar circuitos integrados comerciais para trabalhar a lógica de comutação, uma vez que se busca operar em altas frequências

de rotação, e o microcontrolador comercial já foi projetado para lidar com os problemas que podem surgir com a alta frequência de chaveamento.

8.2.1 O Microcontrolador

Devido à disponibilidade, foi escolhido o CI UC3625, da Texas Instruments/Unitrode. Tal microcontrolador é capaz de promover chaveamento em PWM, permitindo controle por tensão ou corrente, assim como controle em malha fechada da velocidade. A devida associação desse CI com componentes passivos de filtragem permite uma operação robusta, com alto nível de rejeição de ruído e intertravamento dos sinais de acionamento das chaves de estado sólido.

Embora ele permita operação nos quatro quadrantes, seu uso deverá ficar restrito a dois quadrantes, o que já é suficiente para a operação da máquina como motor, assim reduzindo as perdas no chaveamento. Através da devida conexão lógica entre o CI e os transistores, será possível manter o monitoramento da corrente nos enrolamentos, mesmo quando modo de gerador.

Para evitar perdas excessivas no chaveamento, o controle de nível de tensão de alimentação (que define a velocidade de rotação) deverá ser feito diretamente na fonte de alimentação, evitando operação em regime com chaveamento em PWM. De qualquer modo, o CI empregado prevê operação com sensoriamento de corrente, através da leitura da queda de tensão sobre um resistor (*shunt*) de valor apropriado. Para valores acima da corrente considerada nominal, o circuito procura reduzir a tensão se saída através de modulação do chaveamento. Portanto, o CI garante a segurança do circuito de acionamento em condições de alta demanda, como a partida. Embora o enrolamento poderia aguentar operação temporária sob alta corrente, os transistores e demais dispositivos eletrônicos não apresentam tolerância tão grande.

Portanto, o microcontrolador será responsável pela tensão nos terminais caso a corrente se mostre muito elevada, e, durante as condições normais de operação, sua única responsabilidade será garantir a comutação das chaves de forma sincronizada à posição do rotor.

8.2.2 Sensoriamento de posição

O UC3625 trabalha com lógica de 120° elétricos para os sensores de posição. Na presente aplicação, isso corresponde a distanciamento de 30° geométricos entre os sensores.

Optou-se pelo uso de sensores ópticos, embora para topologia de ímãs permanentes seja propício o emprego de sensores de efeito Hall. Isso porque a distribuição de campo no entreferro é de difícil caracterização, e provavelmente não seria uniforme o bastante para ativar o sensor no intervalo correto, ocasionando operação indevida do CI. Os sensores ópticos são mais adequados para essa situação de protótipo por apresentar transições mais imediatas e previsíveis, além de permitir melhor calibração de posição, facilitando o ajuste do instante de comutação.

O único requisito para o uso dos sensores óticos é a pintura do rotor. O volante deve ter uma região pintada em oito faixas de mesmo tamanho, correspondendo ao número de pólos magnéticos.

8.3 Conversor CC/CC

Como método de conversão CC/CC, optou-se por um conversor abaixador, tipo *buck*. Esta é uma forma simples de se produzir um patamar estável de tensão contínua a partir de uma tensão de amplitude variável. Dimensiona-se o sistema de forma que a tensão de saída do conversor seja igual ou menor à tensão nos terminais da máquina geradora, quando operando na velocidade mínima de projeto (metade da velocidade nominal).

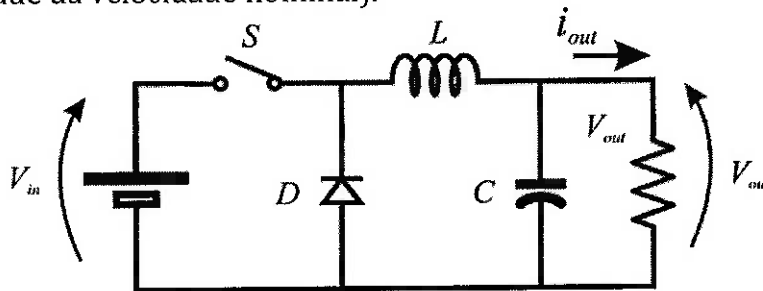


FIGURA 19: CONVERSOR ABAIXADOR DE TENSÃO CONTÍNUA

Para tal conversor, deve-se utilizar o circuito integrado TL494, capaz de promover o chaveamento em modulação por largura de pulso.

Definiu-se como tensão de saída 24V, um valor bastante comum para tensão contínua. O indutor e o capacitor associados promovem a limitação respectivamente da ondulação de corrente e de tensão de saída. Seu projeto pode ser realizado pelas seguintes relações aproximadas:

$$D = \frac{V_m}{V_{out}} \quad (5.1)$$

$$V = \frac{L \cdot \Delta i_L}{t_{CH}} \rightarrow L = \frac{(V_m - V_{out}) \cdot D}{\Delta i_L \cdot f_{CH}} = \frac{V_m \cdot D \cdot (1 - D)}{\Delta i_L \cdot f_{CH}} \quad (5.2)$$

$$\Delta V = \Delta I \cdot \left(R_{CAP} + \frac{t_{CH}}{C} + \frac{L_{CAP}}{t_{CH}} \right) \xrightarrow{L_{CAP}=0} C = \frac{\Delta I \cdot D}{(\Delta V_{out} - R_{CAP} \cdot \Delta I) \cdot f_{CH}} \quad (5.3)$$

Admitindo tolerâncias de oscilação de 10%, o indutor mínimo deve ficar em torno de 700uH, e o capacitor, de 250uF.

8.4 Chaveamento de potência

Foram escolhidos como chaves de estado sólido para o circuito de potência, transistores MOSFET. O CI empregado permite a operação desses transistores diretamente, sem a necessidade de circuito dedicado para isso (*gate driver*). Para simplificar o acionamento, serão usados transistores de canal N para o chaveamento de nível inferior e transistores de canal P para o nível superior.

É necessária cautela na associação do chaveamento de potência ao circuito de controle. Os circuitos integrados utilizados permitem operação associada diretamente até o nível de 40V. Como para a máquina elétrica busca-se trabalhar com tensões mais elevadas, é necessária uma lógica que impeça a ligação do barramento de alta tensão diretamente ao circuito de controle, tática conhecida como *level shift*. Para esse propósito foi empregada uma associação de dois transistores bipolares, um PNP e outro NPN, que trabalham alternadamente, além de um diodo zener. Essa lógica coloca o *gate* dos transistores de canal P ou no mesmo potencial de sua fonte ou em um valor até 12V inferior.

8.5 Definição esquemática do projeto

A lógica de controle foi definida com o auxílio de software. O plano esquemático se apresenta no Anexo 15.3. A maior parte dos componentes passivos serve para filtragem dos sinais envolvidos, buscando eliminar possíveis efeitos de ruído e interferência.

O circuito foi projetado permitindo certa margem de controle sobre a largura de pulso da modulação através de um potenciômetro. A configuração de intervalo de tempo de intertravamento entre os transistores foi definida de forma que será possível o acionamento da máquina a até 22 000 RPM.

Como documentação adicional, apresenta-se a tabela de componentes, disponível no Anexo 15.4, na qual o propósito de cada componente está apontado.

8.6 Definição da placa de circuito impresso

A metodologia de projeto de *layout* da placa de circuito impresso foi buscar o equilíbrio entre suas dimensões, a proximidade entre seus componentes e a facilidade de produção e soldagem dos componentes, assim como de manipulação e leitura. Decidiu-se trabalhar com o circuito de controle, processamento e coleta de sinais alocado na placa de circuito impresso, enquanto a malha de potência é definida em condutores flexíveis, paralelamente à placa.

Devido ao relativamente elevado número de componentes, o circuito se mostra impraticável de maneira simples em uma placa de face simples. A elaboração do *layout* em face dupla torna a disposição dos componentes e trilhas mais direta e elegante, porém é de difícil construção caseira. Deve-se, portanto, recorrer a empresas especializadas para a produção da placa. O *layout* da placa foi desenvolvido com o auxílio de software e se apresenta no Anexo 15.5.

9. PREVISÃO DE PERDAS

O sistema deve ter como perdas mais pronunciadas, as por atrito (ar e contato no mancal de apoio), por efeito Joule nos condutores, por correntes parasitas, e devido ao chaveamento. Uma análise mais detalhada se apresenta no Anexo 15.6. Nota-se que as perdas podem representar até 13% da potência máxima da máquina.

10. O PROTÓTIPO

10.1 Fabricação e Montagem dos Componentes

A fabricação dos componentes foi possível com o apoio da empresa Equacional Elétrica e Mecânica Ltda. A produção foi feita de acordo com os desenhos técnicos desenvolvidos (Anexo 15.9), e não apresentou grandes dificuldades. O enrolamento do estator não foi possível de acordo com o projeto definido de três ramos em paralelo (15 fios por ranhura), sendo feito com apenas dois (10 fios por ranhura).

A montagem dos componentes foi de relativamente fácil execução. Os mancais magnéticos, formados pela associação de múltiplas pastilhas de ímã permanente, se previam ser de difícil execução. No entanto, ao se realizar a montagem de fora para dentro, as forças de repulsão são contidas pelas camadas externas, e o material magnético tende naturalmente à distribuição uniforme. Fotos dos componentes e das etapas de montagem se apresentam no Anexo 15.7.

10.2 Montagem final

O conjunto completo foi montado, tendo seu entreferro ajustado pela posição das porcas ao longo do tirante. Notou-se dificuldade em garantir o alinhamento do eixo do volante com o eixo de simetria dos mancais. Devido às tolerâncias deixadas nas furações dedicadas à passagem dos tirantes, as peças podem ficar ligeiramente desalinhadas, provocando o desequilíbrio das forças de atração dos mancais. Nessas condições, o volante tendeu a sempre residir em uma posição de ligeiro desalinhamento, limitado pelos mancais de *backup*.

Esse efeito de instabilidade, não previsto em projeto, ocorre pois, em caso de inclinação do eixo, o deslocamento na direção axial do anel magnético faz com que a porção que se aproximou do módulo estacionário seja submetida a uma atração ainda maior, enquanto a porção que se distanciou, tenha sua força de atração reduzida. Portanto o efeito de instabilidade axial se mostrou imediatamente mais pronunciado do que o de restauração radial.

Como saída imediata, decidiu-se alterar a superfície de aço dos mancais de apoio. Pensando no movimento de inclinação do volante, que deve ocorrer em torno do seu centro de gravidade, a superfície ideal de apoio seria uma casca esférica. Por ser de difícil fabricação, a alteração tomada foi de tornear a peça de forma a criar um perfil cônico na superfície de apoio, direcionando o eixo à posição central.

Com essa medida, associada à calibração da posição dos mancais magnéticos de forma a aliviar o peso do rotor sobre os mancais de apoio, foi possível alcançar uma condição de baixo atrito.

11. EXECUÇÃO DE TESTES E ENSAIOS

O dispositivo foi acionado por corrente contínua entre duas fases de cada vez para se confirmar a manifestação de conjugado. Pôde-se ver que, em média, sob 2 A o rotor vence sua inércia e tende a alinhar seu fluxo magnético ao produzido pelo estator. Testes até 15 A mostram que o conjugado pronunciado, mesmo que a operação seja forçada para residir dentro das restrições de corrente do acionamento e do enrolamento, dando margem para efeitos peliculares e de correntes parasitas, será mais do que o suficiente para garantir a partida do rotor de maneira relativamente rápida. Considerando-se que se consiga manter o conjugado constante, o dispositivo alcançaria 10000 RPM dentro de 3 minutos.

A máquina foi então conectada ao *driver* eletrônico construído em paralelo neste projeto. Este conseguiu realizar a comutação sincronizada aos sinais dos sensores de posição, alcançando velocidade estimada em 300 RPM, para prova de conceito.

Os mancais magnéticos foram continuamente ajustados na busca do equilíbrio de forças na direção axial, ao mesmo tempo em que se buscaram condições em que o efeito de instabilidade à torção fosse menos pronunciado.

O dispositivo foi acionado até a velocidade máxima de 1 420 RPM, e, quando desacoplado do acionamento, levou 74 segundos para sua parada total.

12. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A montagem final alcançou condições de baixo atrito, e testes em baixas rotações mostraram que seria possível manter a energia cinética armazenada sem grandes problemas com perdas por atrito, servindo de prova de princípio do mancal magnético e do acionamento.

Entretanto, devido à instabilidade sob condições de inclinação do eixo, evitou-se a operação continuada, principalmente em rotações mais elevadas, uma vez que o mancal de apoio não teve seu projeto previsto para tolerar os esforços advindos da tendência do eixo em se inclinar, podendo então sofrer deformações.

Em teoria, para o volante perfeitamente balanceado, seu comportamento dinâmico provocaria a tendência a centralizar-se, portanto aliviando esses esforços sobre o mancal de apoio. Portanto, na condição de forças axiais equilibradas, o mancal de apoio precisaria apenas suprir a rigidez necessária para garantir a estabilidade do sistema, não estando submetido a precisamente alguma força.

Para o caso real, em que o desbalanceamento existe, o mancal de apoio deixa de servir somente para garantir que o conjunto fique em sua posição de equilíbrio instável, e passa a sofrer permanentemente um esforço radial para manter o eixo centralizado. Como seu projeto não engloba essa situação, a operação continuada não foi possível. Ao se promover a rotação, ficou clara a manifestação de esforços sobre o eixo de apoio, ou sobre os mancais de backup, quando os apoios axiais foram aliviados. Esse conjugado de atrito, associado à baixa impedância do enrolamento, impediu o acionamento da máquina em altas rotações, sendo necessário interromper os ensaios por sobreaquecimento dos transistores, ou por segurança dos mancais de apoio.

O modo gerador se manteve, portanto, inexplorado até o momento.

13. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar de a operação ideal ter sido proibida por fatores imprevistos em projeto, o trabalho aqui desenvolvido produziu conclusões úteis à pesquisa no campo de mancais magnéticos. Uma bateria eletromecânica foi projetada e construída, dotada de mancais magnéticos de uma nova topologia, de baixo orçamento. Um dispositivo de acionamento eletrônico para máquinas de corrente contínua sem escovas foi desenvolvido, permitindo o acionamento de máquinas de enrolamento trifásico a velocidades de até 22 000 RPM, para quatro pares de pólos. Ambos foram integrados com êxito.

13.1 Conclusões

O maior foco e desafio do trabalho, o mancal magnético, não apresentou o comportamento esperado, mas também se deve ter em mente que seu projeto não teve o mesmo amadurecimento que a primeira topologia, cujo funcionamento é sabidamente garantido. A nova topologia surgiu como solução rápida para as restrições de custo e disponibilidade comercial, não passando por tamanha etapa de projeto.

De qualquer forma, é uma topologia válida, e pode-se concluir que sua estabilidade depende do correto dimensionamento do conjunto, prevendo que a rigidez na direção radial, restauradora, seja superior à axial, de atração. Isso se tem quando a força pronunciada axialmente devido a uma ligeira rotação é menos do que a força restauradora axial. Portanto a inclinações no eixo precisa provocar sobre os anéis rotativos um maior deslocamento na direção radial do que na axial, Essa condição é atendida quando os mancais apresentam seu distanciamento ao longo do eixo superior a seu diâmetro. Conseqüentemente, esta topologia é inadequada para aplicações em formatos de discos chatos, porém apropriada para cilindros compridos.

O trabalho aqui desenvolvido portanto não serviu para fins de comparação de rendimento entre projetos, como foi o foco inicial, mas sim para o estudo de novas topologias de mancal magnético, direcionando o foco para a inovação tecnológica, no estudo de uma arquitetura pouco explorada na literatura, e que no entanto tem potencial aplicação devido ao reduzido custo e à relativa facilidade de montagem.

13.2 Resumo das Contribuições

Foi definido um sistema de bateria eletromecânica completo. Como forma de melhorar seu rendimento, um primeiro projeto de mancais magnéticos passivos foi desenvolvido e seus desenhos técnicos foram produzidos. Seu conceito de operação é comprovado, porém a sua adequação ao volante associado, por toda a operação ainda precisaria ser estudada.

Devido a restrições de custo e disponibilidade comercial, uma nova topologia de mancal magnético foi projetada. Sua construção e montagem confirmaram a viabilidade do emprego da associação de pequenas pastilhas

magnéticas e material ferromagnético como substituto de grandes peças magnéticas, apresentando comportamento equivalente para operações no modo de atração.

A ausência de rigidez restauradora contra inclinações no eixo notada nesta arquitetura mostra que mancais magnéticos no modo atração requerem maior cautela em seu dimensionamento, prevendo arquiteturas que promovam o efeito restaurador ou disponham de meios de garantir a que o conjunto permaneça na posição de equilíbrio. Este, apesar de instável, garante que os esforços sobre os apoios não serão acentuados.

É possível que em operação, para rotores balanceados, os esforços para alinhar o eixo sejam aliviados dos mancais de apoio, uma vez que o comportamento dinâmico do rotor tenda a alinhar os eixos. Volantes de fibras, mais leves porém mais resistentes aos esforços de cisalhamento, podem aparecer como aplicações potenciais para esse tipo de mancal, uma vez que seu balanceamento seja mais fácil.

Também, o desenvolvimento de um sistema eletrônico de acionamento foi desenvolvido. Embora de custo elevado por ter sido desenvolvido como protótipo, seu projeto poderia ser implementado de forma seriada, com um custo significativamente inferior (estima-se que até 70%) aos dispositivos comerciais de mesma finalidade.

13.3 Pesquisa Futura

Este projeto permite expansão de pesquisa tanto ainda aplicada ao módulo de bateria eletromecânica, visando buscar a adequação de topologias de mancais magnéticos alternativas ao sistema, quanto ao desenvolvimento e análise isolados da arquitetura de mancais magnéticos no modo atração. Esta topologia apresenta poucos estudos na literatura científica, e potencialmente muitas aplicações.

Para a máquina elétrica, vê-se margem para estudo das perdas devido a correntes parasitas, que se mostraram elevadas nas previsões teóricas. O emprego de alta frequência de acionamento talvez implique o uso de múltiplos condutores de menor seção.

Do ponto de vista de operação dinâmica, à margem para pesquisa e desenvolvimento de métodos de redução de atrito dos mancais de apoio, assim como o desenvolvimento de ambiente de baixa pressão, reduzindo as perdas devido ao arrasto aerodinâmico (entretanto dificultando a refrigeração do enrolamento).

Para os mancais magnéticos, há não somente campo para otimização e estudos de adequação, mas existe a possibilidade da instalação de módulos passivos de estabilização axial, como os citados na revisão literária. Tais dispositivos permitem a operação com perdas devido ao atrito virtualmente nulas, se mostrando como forte competidores aos mancais magnéticos ativos e aos sistemas empregando supercondutores, principalmente por não demandar potência externa – seja na forma de controle eletrônico ou refrigeração criogênica – para garantir sua estabilidade.

14. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Miller, T.J.E.; "Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives", Oxford Science Publications, 1989
- [2] Hendershot, J.R.; Miller, T.J.E.; "Design of brushless permanent-magnet motors", Oxford Science Publications, 1994
- [3] Gieras, J.F.; Kamper, M.J., Wang, R.-J.; "Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines", Springer, 2nd Ed., 2008
- [4] Hanselman, D.C.; "Brushless Permanent Magnet Motor Design", Magna Physics Publications, 2nd Ed., 2006
- [5] Gieras, J.F.; Wing, M.; "Permanent Magnet Motor Technology", CRC Press, 2nd Ed., 2002
- [6] Earnshaw, S.; "On the Nature of the Molecular Forces which Regulate the Constitution of the Luminiferous Ether," Trans. Of the Cambridge Philosophical Society, Vol. 7, Part I, pp. 97-112, 1842
- [7] Yonnet, J.-P.; "Passive magnetic bearings with permanent magnets", IEEE Transactions on Magnetics, vol.14, no.5, pp. 803-805, Sep 1978
- [8] Yonnet, J.-P.; "Permanent Magnet Bearings and Couplings", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 17, no. 1, January 1981, pp. 1169-1173
- [9] Post, R.F.; "The electromechanical battery: The new kid on the block", 1st Annual Symposium on Coupling Technology to National Needs", Albuquerque, New Mexico, Aug 1993
- [10] Post, R.F.; Ryutov, D.D.; "Ambient-Temperature Passive Magnetic Bearings: Theory and Design Equations", 6th International Symposium on Magnetic Bearings, Cambridge, Massachusetts, Aug 1998
- [11] Post, R.F.; "Passive Magnetic Bearings for Vehicular Electromechanical Batteries", Tec. Rep. UCRL-ID-123451, Lawrence Livermore National Laboratory, Mar 1996
- [12] Post, R.F.; "Dynamically Stable Magnetic Suspension/Bearing System", U.S. Patent nº 5 495 221, Mar 1994
- [13] Siebert, M., Ebihara, B., Jansen, R., Fusara, R.L., Kascak, A. and Kenny, A., "Passive Magnetic Bearing Flywheel," 36th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Jul 2001
- [14] Eichenberg, D.J.; Gallo, C.A.; Thompson, W.K.; "Development and Testing of a Axial Halbach Magnetic Bearing", NASA, Glenn Research Center, Cleveland, Ohio, Jul 2006
- [15] Eichenberg, D.J.; Gallo, C.A.; Thompson, W.K.; "Development and Testing of a Radial Halbach Magnetic Bearing", NASA, Glenn Research Center, Cleveland, Ohio, Dec 2006
- [16] Moser, R., Sandtner, and H. Bleuler, "Optimization of repulsive passive magnetic bearings", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 42, issue 8, pp. 2038-2042, Aug. 2006
- [17] Filatov, A.V.; Maslen, E.H.; "Passive Magnetic Bearing for Flywheel Energy Storage Systems", IEEE Transactions on Magnetics, vol.37, no.6, pp. 3913-3924, Nov 2001
- [18] Paden, B.E.; Groom, N.; Antaki, J.F.; "Design Formulas for Permanent-Magnet Bearings", Journal of Mechanical Design, 125(4):734-738, Dec 2003

- [19] Gasparetto, A.L.C., Kuwabara, F. J., "Projeto de um acumulador de energia eletrodinâmico", Projeto de Conclusão de Curso, Escola Politécnica, USP, Departamento de Energia e Automação Elétricas, 2009
- [20] Mineta, V.C.; "Caracterização de mancais magnéticos passivos com ímãs permanentes", Projeto de Conclusão de Curso, Escola Politécnica, USP, Departamento de Energia e Automação Elétricas, 2009
- [21] Matteini, M.; "Control techniques for matrix converter adjustables speed drives", PhD thesis, University of Bologna, Department of Electrical Engineering, 2001
- [22] Pereira, J.C.; "Introdução à Dinâmica de Rotores", UFSC, Departamento de Engenharia Mecânica, 2003
- [23] Hartog, J.P.; "Mechanical Vibrations", McGraw Hill, 1947

15. ANEXOS

15.1 Cálculo da energia potencial cinética armazenada no volante

$$(1) E = \frac{J \cdot \omega^2}{2}$$

Sende E a energia cinética rotacional e J o momento de inércia para o eixo de rotação e ω a velocidade angular.

O momento de inércia para um cilindro girando em seu eixo de simetria é dado por:

$$(2) J = \frac{m \cdot r^2}{2}$$

Com m sendo a massa e r o raio do cilindro.

De (1) e (2):

$$(3) E = \frac{m \cdot \omega^2 \cdot r^2}{4}$$

$$(4) m = \rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h$$

Sendo ρ a densidade do material e h a altura do cilindro.

De (3) e (4):

$$(5) E = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot \pi \cdot h \cdot \omega^2 \cdot r^4$$

Pode-se determinar a velocidade máxima de rotação possível para o raio do cilindro através do cálculo da máxima força de tração suportada na sua extremidade.

$$(6) \sigma = \rho \cdot \omega^2 \cdot r^2$$

Com σ sendo o limite de escoamento do material

De (6):

$$(7) \omega^2 = \frac{\sigma}{\rho \cdot r^2}$$

De (5) e (7):

$$(8) E = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \sigma \cdot h \cdot r^2$$

$$(9) E = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \sigma \cdot h \cdot d^2$$

Sendo d o diâmetro do cilindro.

Por definição construtiva, o máximo diâmetro que se pode utilizar é de 170 mm. Para dois cilindros de 50 mm de altura, a energia acumulada será:

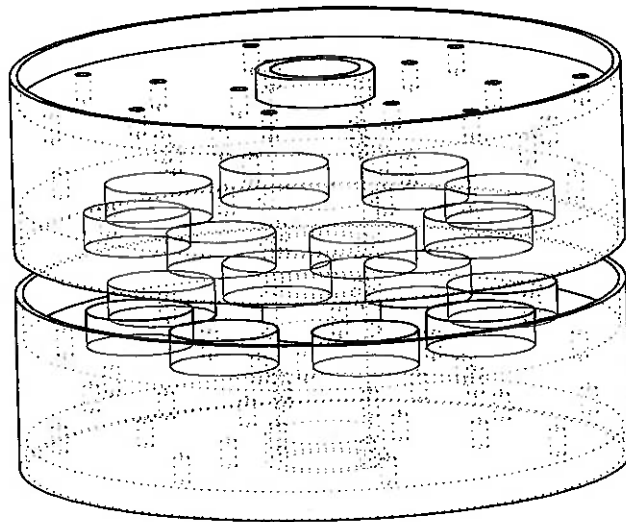
$$(10) E = 141353,1J = 39,26Wh, \text{ trabalhando a } 20000 \text{ RPM.}$$

Considerando a extensão de operação residindo entre a velocidade máxima e metade desta (10000 RPM), a energia útil será:

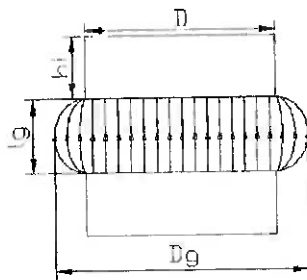
$$(11) E = 106014,8J = 29,45Wh$$

15.2 Cálculo do circuito magnético e dimensionamento do estator

A máquina de fluxo axial apresenta a seguinte topologia de ímãs de excitação:



O dimensionamento do enrolamento do estator desta máquina parte do cálculo do número de espiras, de acordo com o fluxo produzido pelos ímãs permanentes em cada pólo.



FLUXO ENTRE DOIS IMÃS, FORMANDO UM PÓLO

Tipicamente o diâmetro do feixe de fluxo pode ser aproximado por:

$$(1) D_g \cong (D + l_g)$$

Sendo D o diâmetro do ímã e l_g o entreferro entre os ímãs.

Com as dimensões aproximadas do campo, pode-se arbitrar um B_{garb} para que se determine a permeabilidade do circuito magnético.

$$(2) B_{garb} = 0,4T$$

$$(3) \phi_g = B_{garb} \cdot S_g = B_{garb} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D + l_g)^2 = 0,4 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (0,03 + 0,018)^2 = 7,23822 \cdot 10^{-4} Wb$$

$$(4) F_g = \frac{B_{garb}}{\mu_0} \cdot l_g = \frac{0,4}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0,018 = 5729,57 A.e$$

Para se obter o fluxo ϕ_g no diâmetro D_g é necessário um campo de intensidade $B_{imã}$:

$$(5) B_{im\tilde{a}} = \frac{\phi_g}{S_i} \cdot k_{disp} = \frac{\phi_g}{\frac{\pi \cdot D^2}{4}} \cdot k_{disp} = \frac{4.7,23822 \cdot 10^{-4}}{\pi \cdot 0,03^2} = 1,024 \cdot k_{disp}$$

Utilizando um valor um valor típico para o fator de dispersão, $k_{disp} = 1,5$:

$$(6) B_{im\tilde{a}} = 1,024 \cdot k_{disp} = 1,024 \cdot 1,5 = 1,536T$$

$$(7) H_{im\tilde{a}} = \frac{F_g}{2 \cdot h_i} = \frac{5729,57}{2 \cdot 0,01} = 286478,89 A/m$$

Agora se pode encontrar o ponto de operação do circuito B_{op} , que é a intersecção das curvas de magnetização do imã e do circuito magnético.

$$(8) B_{op} = \frac{B_{im\tilde{a}}}{H_{im\tilde{a}}} \cdot H_{op}$$

$$(9) B_{op} = B_r \left(1 - \frac{H_{op}}{H_c} \right)$$

Igualando H_{op} das equações (8) e (9):

$$(10) B_{op} = \frac{B_r}{1 + \frac{B_r}{H_c} \cdot \frac{H_{im\tilde{a}}}{B_{im\tilde{a}}}} = \frac{1,28}{1 + \frac{1,28}{915400} \cdot \frac{286478,89}{1,536}} = 1,01523T$$

$$(11) B_{gmed} = \frac{B_{op}}{B_{im\tilde{a}}} \cdot B_{garb} = \frac{1,01523}{1,536} \cdot 0,4 = 0,2643T$$

Fluxo de operação:

$$(12) \phi_{util} = B_{gmed} \cdot S_g = B_{gmed} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D + l_g)^2 = 0,2643 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (0,03 + 0,018)^2 = 4,7842 \cdot 10^{-4} Wb$$

Numero de bobinas por fase:

$$(13) N_f = \frac{E_f}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot k_e \cdot \phi_{util}} = \frac{\frac{E_i}{\sqrt{3}}}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot \left(\frac{w}{60} \cdot p \right) \cdot k_e \cdot \phi_{util}} = \frac{100/\sqrt{3}}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot \left(\frac{10000}{60} \cdot 4 \right) \cdot 1,4 \cdot 4,7842 \cdot 10^{-4}} = 40,743$$

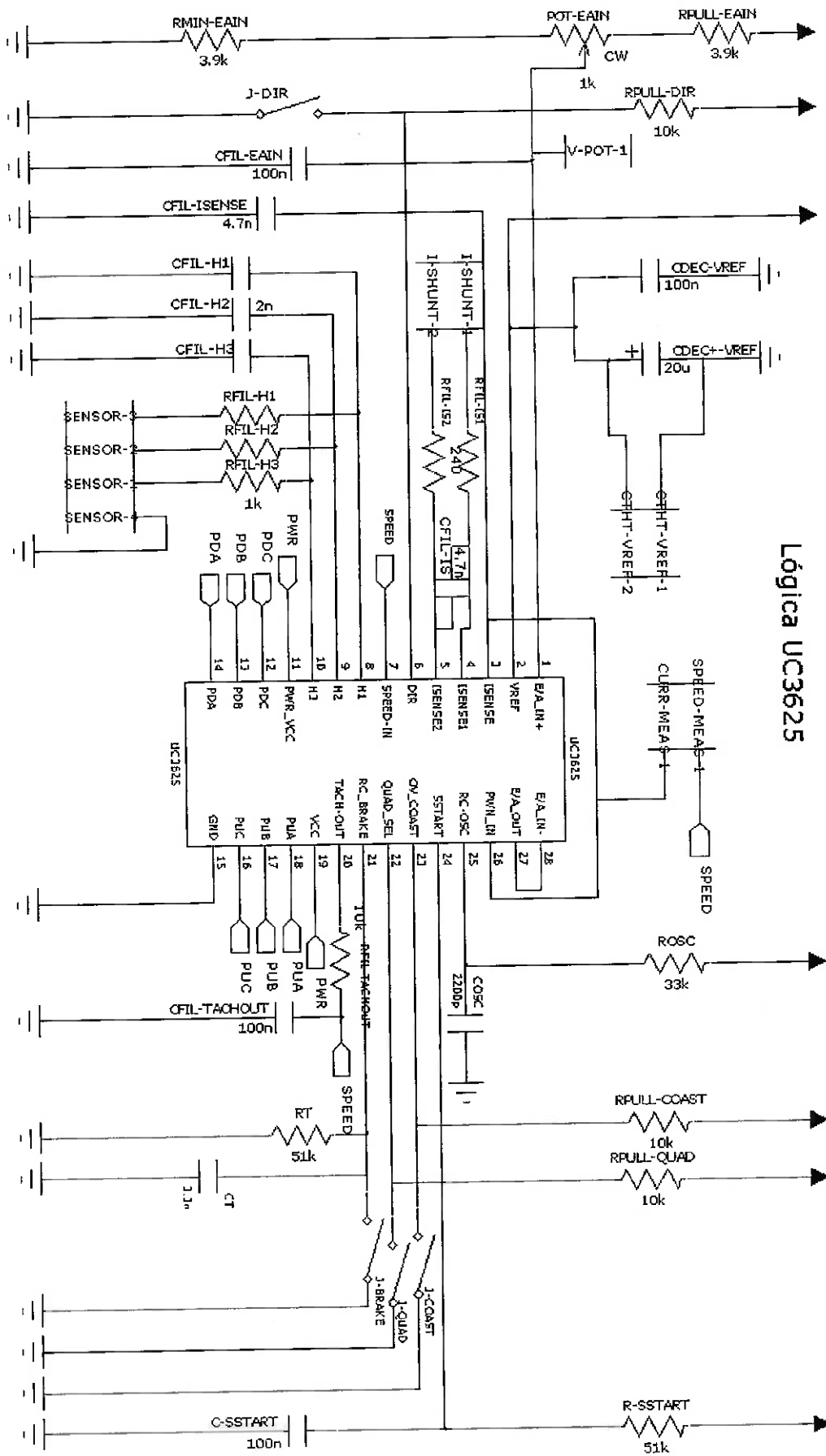
$$(14) N_p = \frac{N_f}{2 \cdot p} = \frac{40,743}{2 \cdot 4} = 5,09 \approx 5$$

Para o cálculo de número de fios por ranhura, vê-se a capacidade de preenchimento na ranhura. Para a estrutura em que se acomodará o enrolamento, a ranhura é de 5 por 6 mm, considerando folga de 1 mm para aplicação de resina isolante.

Portanto, assumindo um fator de preenchimento $k_p = 0,6$:

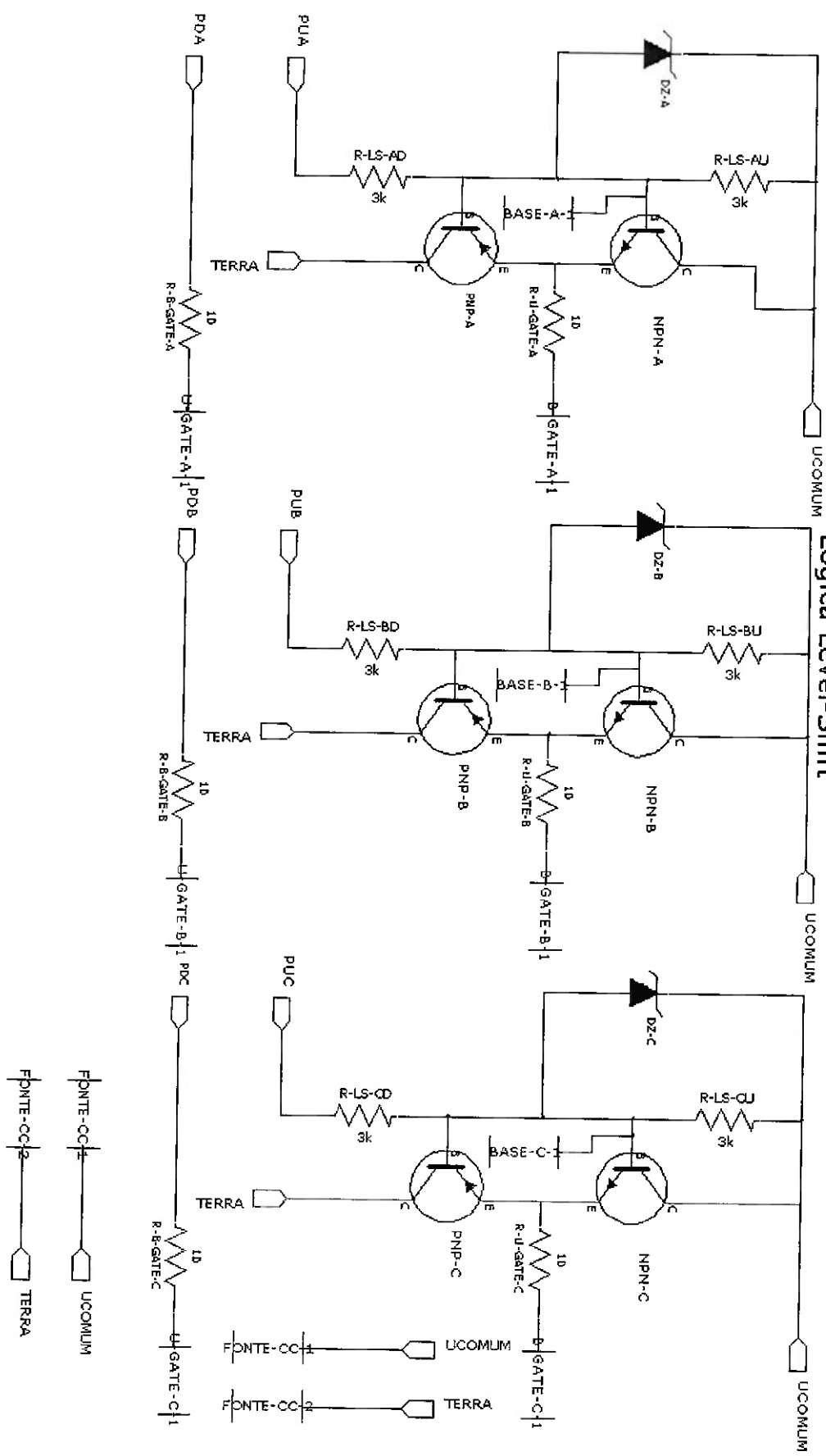
$$n_f = \frac{A_{ranhura} \cdot k_p}{A_{AWG17}} = \frac{h_{ranhura} \cdot l_{ranhura} \cdot k_p}{\frac{\pi}{4} \cdot D_{AWG17}^2} = \frac{6 \cdot 5 \cdot 0,6}{\frac{\pi}{4} \cdot 1,15^2} = 17 \rightarrow 15$$

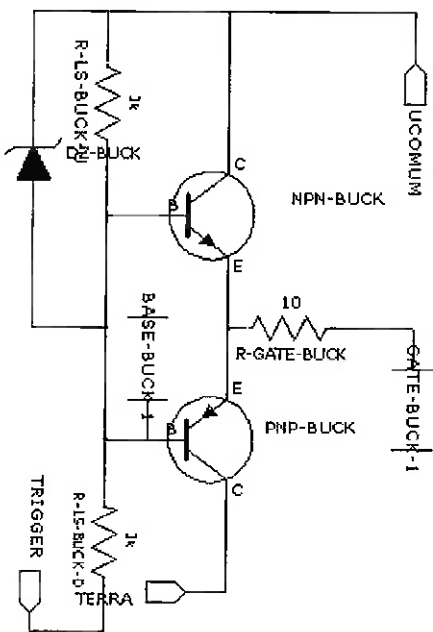
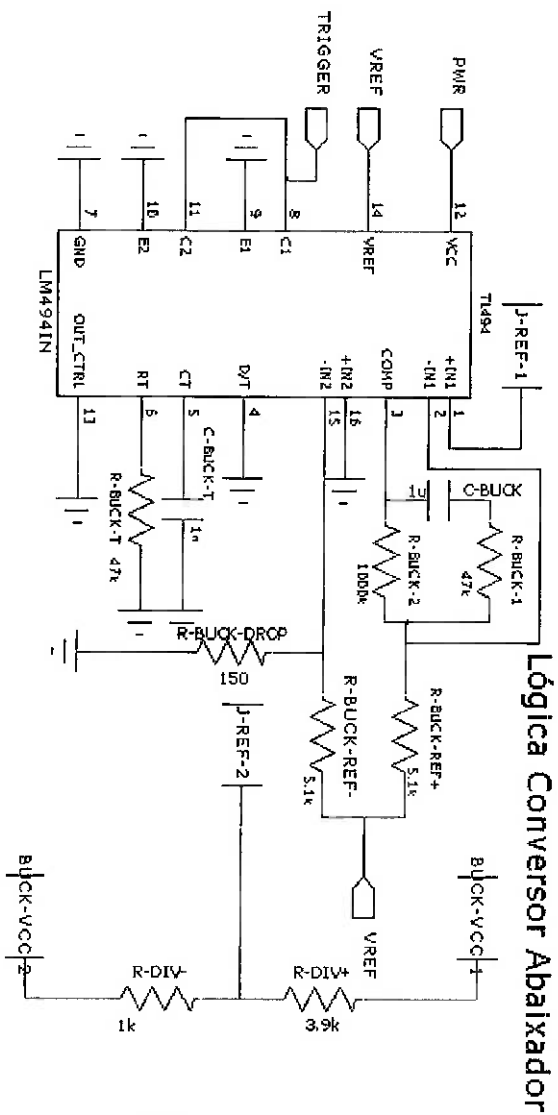
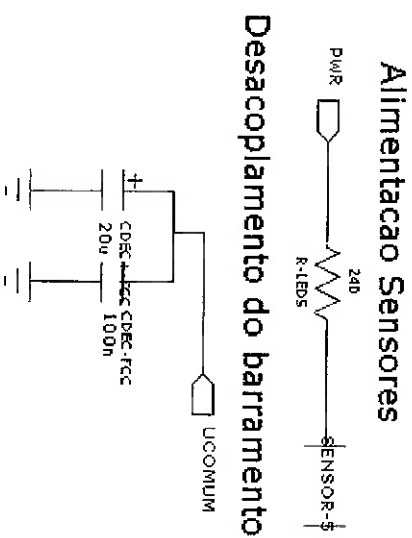
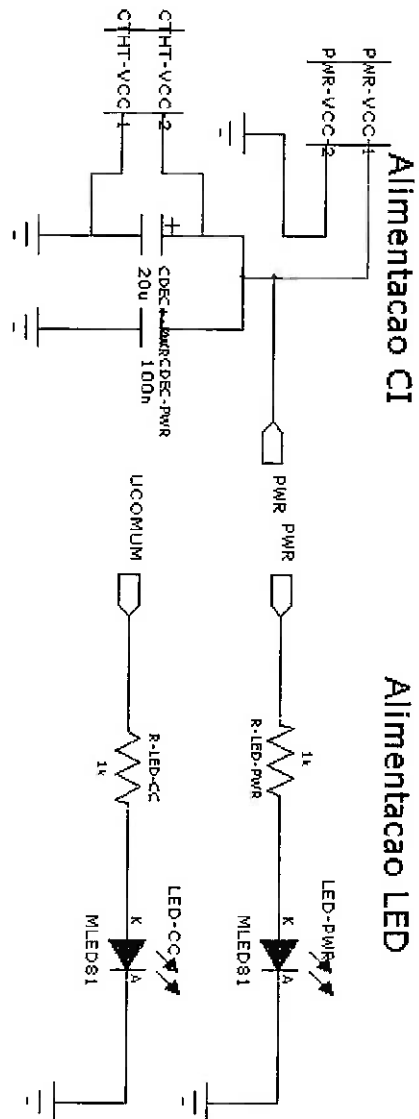
15.3 Desenhos esquemáticos da lógica de controle e acionamento



Lógica UC3625

Lógica Level-Shift





15.4 Tabela de componentes utilizados no projeto eletrônico

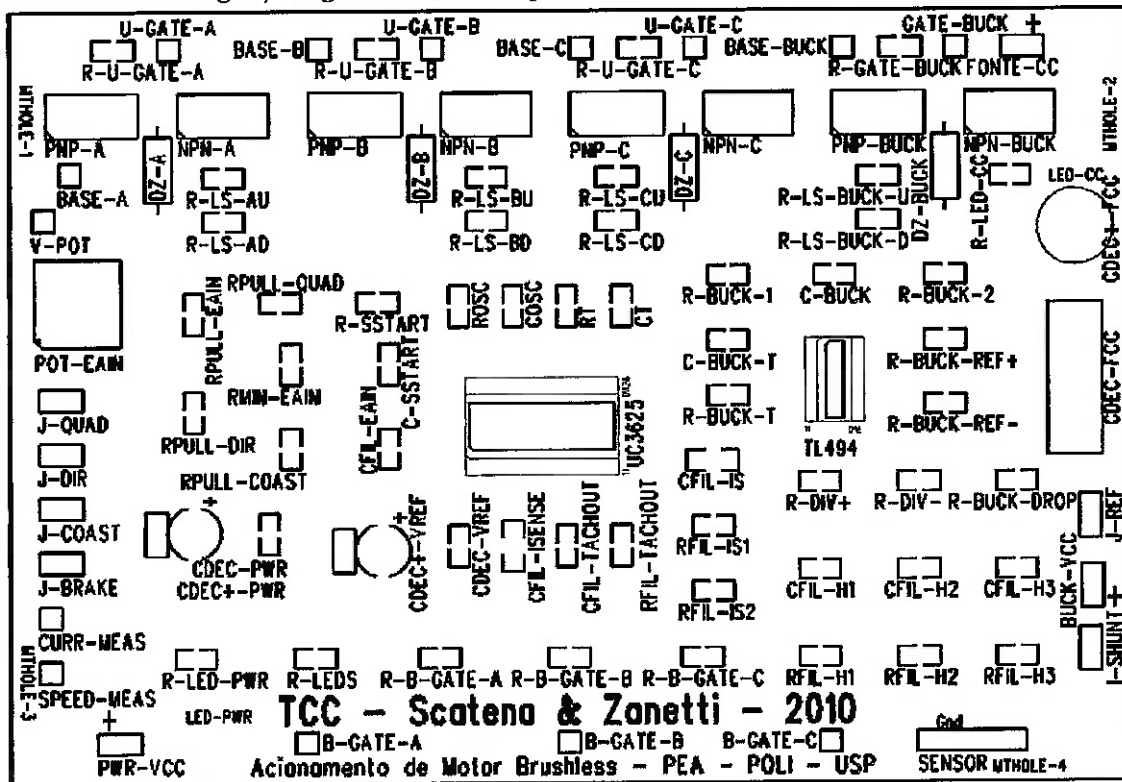
| Nome | Categoria | Especificação | Descrição |
|--|--------------------|---------------|---|
| Componentes instalados na placa de circuito impresso | | | |
| C-BUCK | Capacitor | 1uF | Uso no comparador do TL494 |
| C-BUCK-T | Capacitor | 1nF | Oscilatório - PWM <i>buck</i> |
| CDEC-FCC | Capacitor | 100nF | Desacoplamento - barramento |
| CDEC-PWR | Capacitor | 100nF | Desacoplamento - alimentacao |
| CDEC-VREF | Capacitor | 100nF | Desacoplamento - tensão interna de referência |
| CFIL-EAIN | Capacitor | 100nF | Filtragem - entrada do amplificador diferencial |
| CFIL-H1 | Capacitor | 2.2nF | Filtragem - sinal do sensor de posição |
| CFIL-H2 | Capacitor | 2.2nF | Filtragem - sinal do sensor de posição |
| CFIL-H3 | Capacitor | 2.2nF | Filtragem - sinal do sensor de posição |
| CFIL-IS | Capacitor | 4.7nF | Filtragem - sensor diferencial de corrente |
| CFIL-ISENSE | Capacitor | 4.7nF | Filtragem - sinal de corrente medida |
| CFIL-TACHOUT | Capacitor | 100nF | Filtragem - sinal de tacômetro |
| COSC | Capacitor | 2.2nF | Oscilatório - PWM inversor |
| C-SSTART | Capacitor | 100nF | Controle de partida lenta |
| CT | Capacitor | 3.3nF | Controle - tacômetro e de comutação cruzada |
| CDEC+-FCC | Cap. Eletrolítico | 20uF | Desacoplamento - barramento |
| CDEC+-PWR | Cap. Eletrolítico | 20uF | Desacoplamento - alimentacao |
| CDEC+-VREF | Cap. Eletrolítico | 20uF | Desacoplamento - tensão interna de referência |
| TL494 | Circuito Integrado | TL494CD | Controlador PWM para regulação de tensão |
| UC3625 | Circuito Integrado | UC3625DW | Controlador de motor <i>brushless DC</i> |
| BASE-A | Conector - 1 Pino | - | Leitura |
| BASE-B | Conector - 1 Pino | - | Leitura |
| BASE-BUCK | Conector - 1 Pino | - | Leitura |
| BASE-C | Conector - 1 Pino | - | Leitura |
| B-GATE-A | Conector - 1 Pino | - | Acionamento do chaveamento |
| B-GATE-B | Conector - 1 Pino | - | Acionamento do chaveamento |
| B-GATE-C | Conector - 1 Pino | - | Acionamento do chaveamento |
| CURR-MEAS | Conector - 1 Pino | - | Leitura |
| GATE-BUCK | Conector - 1 Pino | - | Acionamento do chaveamento |
| SPEED-MEA | Conector - 1 Pino | - | Leitura |
| U-GATE-A | Conector - 1 Pino | - | Acionamento do chaveamento |
| U-GATE-B | Conector - 1 Pino | - | Acionamento do chaveamento |
| U-GATE-C | Conector - 1 Pino | - | Acionamento do chaveamento |
| V-POT | Conector - 1 Pino | - | Leitura |
| BUCK-VCC | Conector - 2 Pinos | - | Referência de saída para controle do <i>buck</i> |
| FONTE-CC | Conector - 2 Pinos | - | Referência do barramento CC para <i>level-shift</i> |

| | | | |
|--------------|--------------------|----------------|---|
| I-SHUNT | Conector - 2 Pinos | - | Leitura diferencial sobre resistor <i>shunt</i> |
| PWR-VCC | Conector - 2 Pinos | - | Alimentação da placa |
| SENSOR | Conector - 5 Pinos | - | Alimentação e coleta de sinais dos sensores |
| DZ-A | Diodo Zener | 1N5349BG | Limitador de tensão <i>gate-source</i> do PMOS-A |
| DZ-B | Diodo Zener | 1N5349BG | Limitador de tensão <i>gate-source</i> do PMOS-A |
| DZ-BUCK | Diodo Zener | 1N5349BG | Limitador de tensão <i>gate-source</i> do PMOS-A |
| DZ-C | Diodo Zener | 1N5349BG | Limitador de tensão <i>gate-source</i> do PMOS-A |
| J-BRAKE | <i>Jumper</i> | - | Definição de frenagem |
| J-COAST | <i>Jumper</i> | - | Definição de modo <i>coast</i> (desativa chaveamento) |
| J-DIR | <i>Jumper</i> | - | Definição de direção de acionamento |
| J-QUAD | <i>Jumper</i> | - | Definição de operação em 2 ou 4 quadrantes |
| J-REF | <i>Jumper</i> | - | Acionamento de realimentação no <i>buck</i> |
| LED-CC | LED | - | Indicador de tensão presente no barramento |
| LED-PWR | LED | - | Indicador de tensão de alimentação na placa |
| R-B-GATE-A | Resistor | 10 Ω | Estabilização de sinal de <i>gate</i> |
| R-B-GATE-B | Resistor | 10 Ω | Estabilização de sinal de <i>gate</i> |
| R-B-GATE-C | Resistor | 10 Ω | Estabilização de sinal de <i>gate</i> |
| R-BUCK-1 | Resistor | 47k Ω | Uso no comparador do TL494 |
| R-BUCK-2 | Resistor | 1000k Ω | Uso no comparador do TL494 |
| R-BUCK-DROP | Resistor | 150 Ω | Uso no comparador do TL494 |
| R-BUCK-REF- | Resistor | 5.1k Ω | Uso no comparador do TL494 |
| R-BUCK-REF+ | Resistor | 5.1k Ω | Uso no comparador do TL494 |
| R-BUCK-T | Resistor | 47k Ω | Oscilatório - PWM buck |
| R-DIV- | Resistor | 1k Ω | Divisor de tensão para comparador do TL494 |
| R-DIV+ | Resistor | 3.9k Ω | Divisor de tensão para comparador do TL494 |
| RFIL-H1 | Resistor | 1k Ω | Filtragem - sinal do sensor de posição |
| RFIL-H2 | Resistor | 1k Ω | Filtragem - sinal do sensor de posição |
| RFIL-H3 | Resistor | 1k Ω | Filtragem - sinal do sensor de posição |
| RFIL-IS1 | Resistor | 240 Ω | Filtragem - sensor diferencial de corrente |
| RFIL-IS2 | Resistor | 240 Ω | Filtragem - sensor diferencial de corrente |
| RFIL-TACHOUT | Resistor | 10k Ω | Filtragem - sinal de tacômetro |
| R-GATE-BUCK | Resistor | 10 Ω | Estabilização de sinal de <i>gate</i> |
| R-LED-CC | Resistor | 1k Ω | Limitador de corrente no LED-CC |
| R-LED-PWR | Resistor | 1k Ω | Limitador de corrente no LED-PWR |
| R-LEDS | Resistor | 240 Ω | Limitador de corrente nos LEDs dos sensores |
| R-LS-AD | Resistor | 3k Ω | Limitador de corrente no circuito de <i>level-shift</i> |
| R-LS-AU | Resistor | 3k Ω | Limitador de corrente no circuito de <i>level-shift</i> |
| R-LS-BD | Resistor | 3k Ω | Limitador de corrente no circuito de <i>level-shift</i> |
| R-LS-BU | Resistor | 3k Ω | Limitador de corrente no circuito de <i>level-shift</i> |
| R-LS-CD | Resistor | 3k Ω | Limitador de corrente no circuito de <i>level-shift</i> |

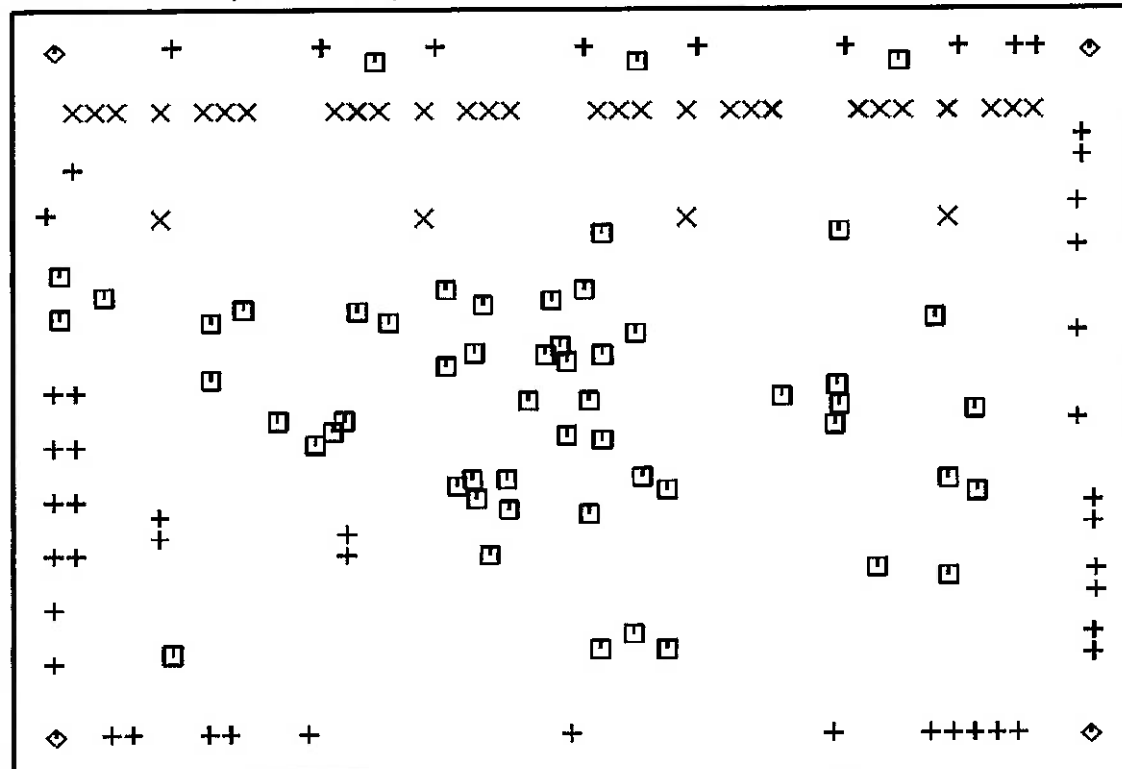
| | | | |
|---|-------------------|---------------|---|
| R-LS-CU | Resistor | 3k Ω | Limitador de corrente no circuito de <i>level-shift</i> |
| R-LS-BUCK-D | Resistor | 3k Ω | Limitador de corrente no circuito de <i>level-shift</i> |
| R-LS-BUCK-U | Resistor | 3k Ω | Limitador de corrente no circuito de <i>level-shift</i> |
| RMIN-EAIN | Resistor | 3.9k Ω | Entrada do amplificador diferencial |
| ROSC | Resistor | 33k Ω | Oscilatório - PWM inversor |
| RPULL-COAST | Resistor | 10k Ω | <i>Pull-up</i> |
| RPULL-DIR | Resistor | 10k Ω | <i>Pull-up</i> |
| RPULL-EAIN | Resistor | 3.9k Ω | <i>Pull-up</i> |
| RPULL-QUAD | Resistor | 10k Ω | <i>Pull-up</i> |
| R-SSTART | Resistor | 51k Ω | Controle de partida lenta |
| RT | Resistor | 51k Ω | Oscilatório - PWM <i>buck</i> |
| R-U-GATE-A | Resistor | 10 Ω | Estabilização de sinal de <i>gate</i> |
| R-U-GATE-B | Resistor | 10 Ω | Estabilização de sinal de <i>gate</i> |
| R-U-GATE-C | Resistor | 10 Ω | Estabilização de sinal de <i>gate</i> |
| POT-EAIN | Resistor Variável | 1k Ω | Controle manual do PWM |
| NPN-A | BJT NPN | MJE15032 | Transistor de <i>level-shift</i> |
| NPN-B | BJT NPN | MJE15032 | Transistor de <i>level-shift</i> |
| NPN-BUCK | BJT NPN | MJE15032 | Transistor de <i>level-shift</i> |
| NPN-C | BJT NPN | MJE15032 | Transistor de <i>level-shift</i> |
| PNP-A | BJT PNP | MJE15033 | Transistor de <i>level-shift</i> |
| PNP-B | BJT PNP | MJE15033 | Transistor de <i>level-shift</i> |
| PNP-C | BJT PNP | MJE15033 | Transistor de <i>level-shift</i> |
| PNP-BUCK | BJT PNP | MJE15033 | Transistor de <i>level-shift</i> |
| Componentes externos à placa de circuito impresso | | | |
| CAPFIL-BUCK | Capacitor | 470uF | Capacitor do conversor abaixador |
| D-BUCK | Diodo | RURG3060 | Diodo de retorno do conversor abaixador |
| INDFIL-BUCK | Indutor | 700mH | Indutor do conversor abaixador |
| H1 | Sensor Refletivo | OPB708 | Leitura de posição do rotor |
| H2 | Sensor Refletivo | OPB708 | Leitura de posição do rotor |
| H3 | Sensor Refletivo | OPB708 | Leitura de posição do rotor |
| NMOS-A | MOSFET Canal N | IRFB260N | Chaveamento de potência - inversor |
| NMOS-B | MOSFET Canal N | IRFB260N | Chaveamento de potência - inversor |
| NMOS-C | MOSFET Canal N | IRFB260N | Chaveamento de potência - inversor |
| PMOS-A | MOSFET Canal P | IRF6218PBF | Chaveamento de potência - inversor |
| PMOS-B | MOSFET Canal P | IRF6218PBF | Chaveamento de potência - inversor |
| PMOS-C | MOSFET Canal P | IRF6218PBF | Chaveamento de potência - inversor |
| PMOS-BUCK | MOSFET Canal P | IRF6218PBF | Chaveamento de potência - <i>buck</i> |

15.5 Layout final para fabricação da placa de circuito impresso

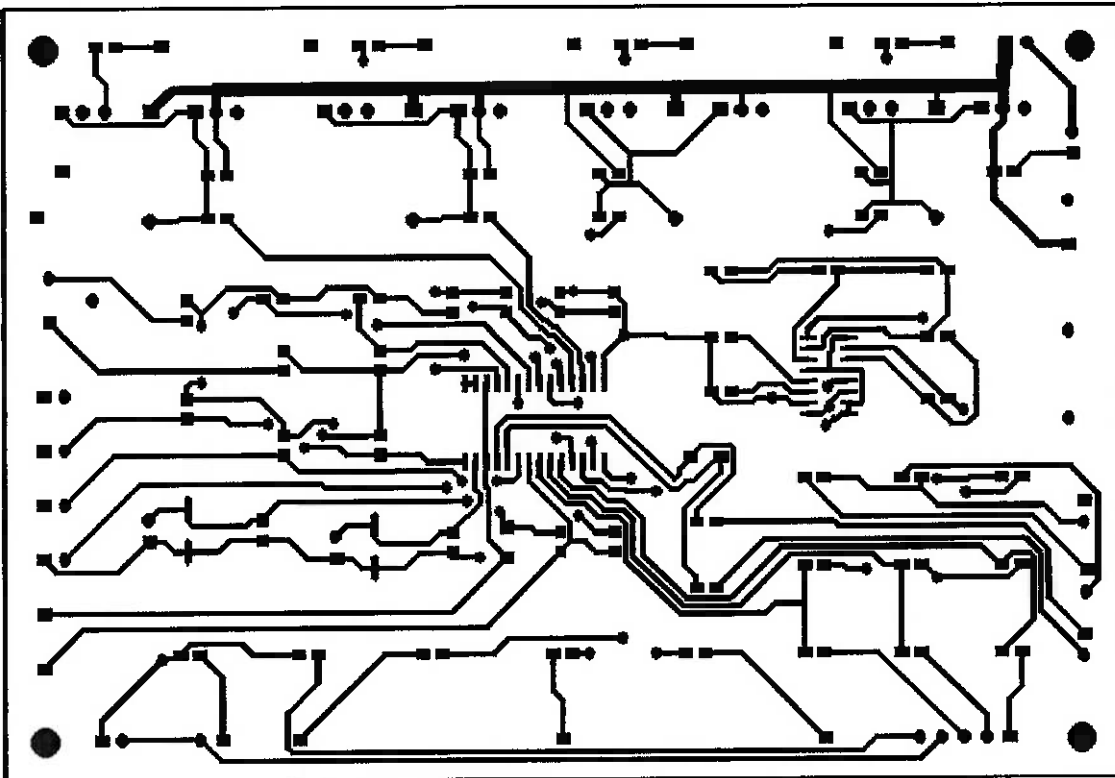
15.5.1 Simbologia / Legenda dos Componentes



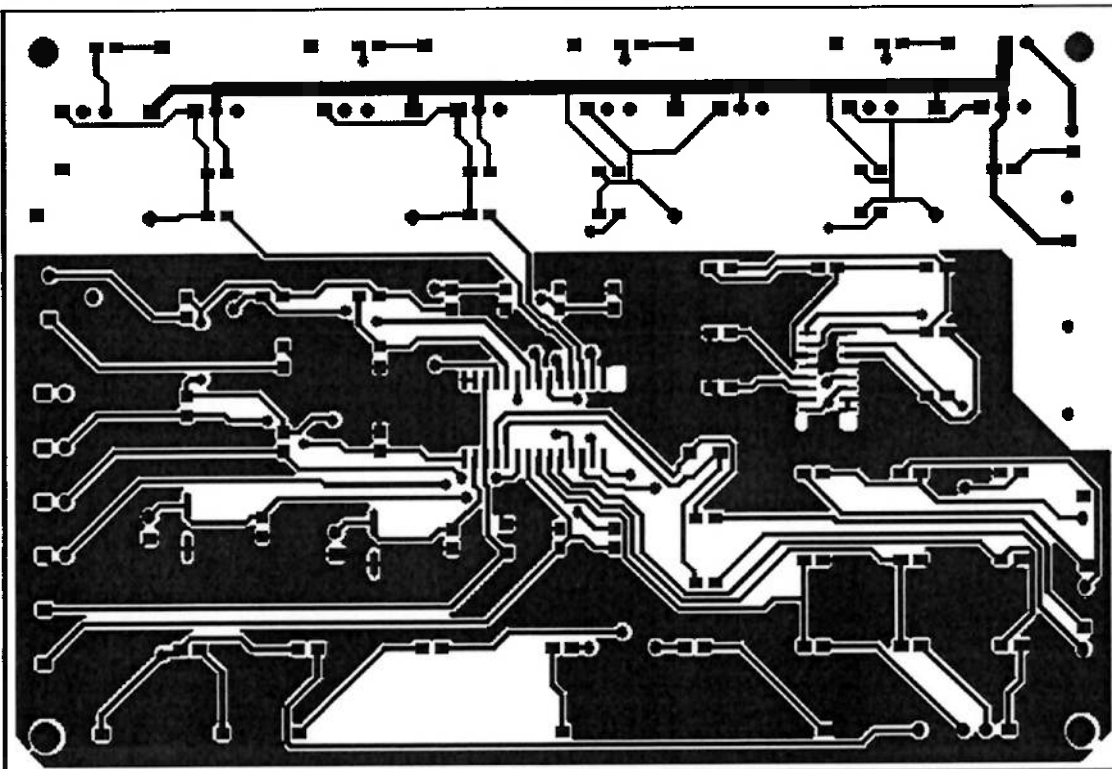
15.5.2 Demarcação da Furação



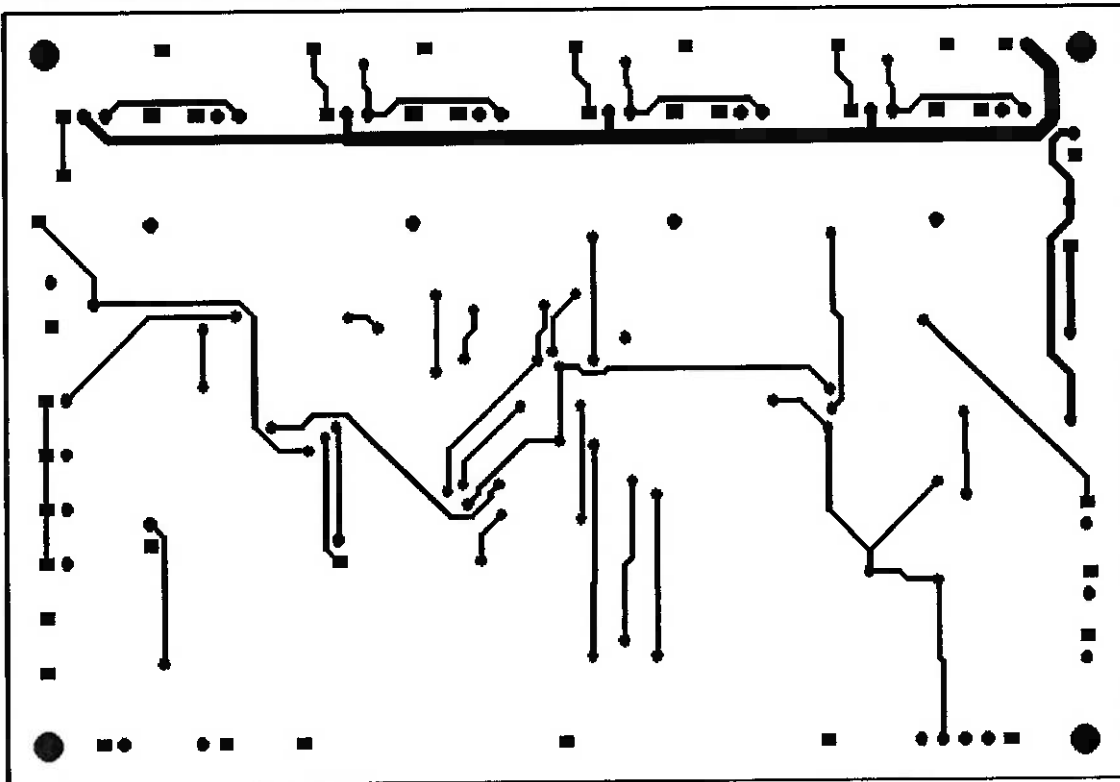
15.5.3 Trilhas da camada superior



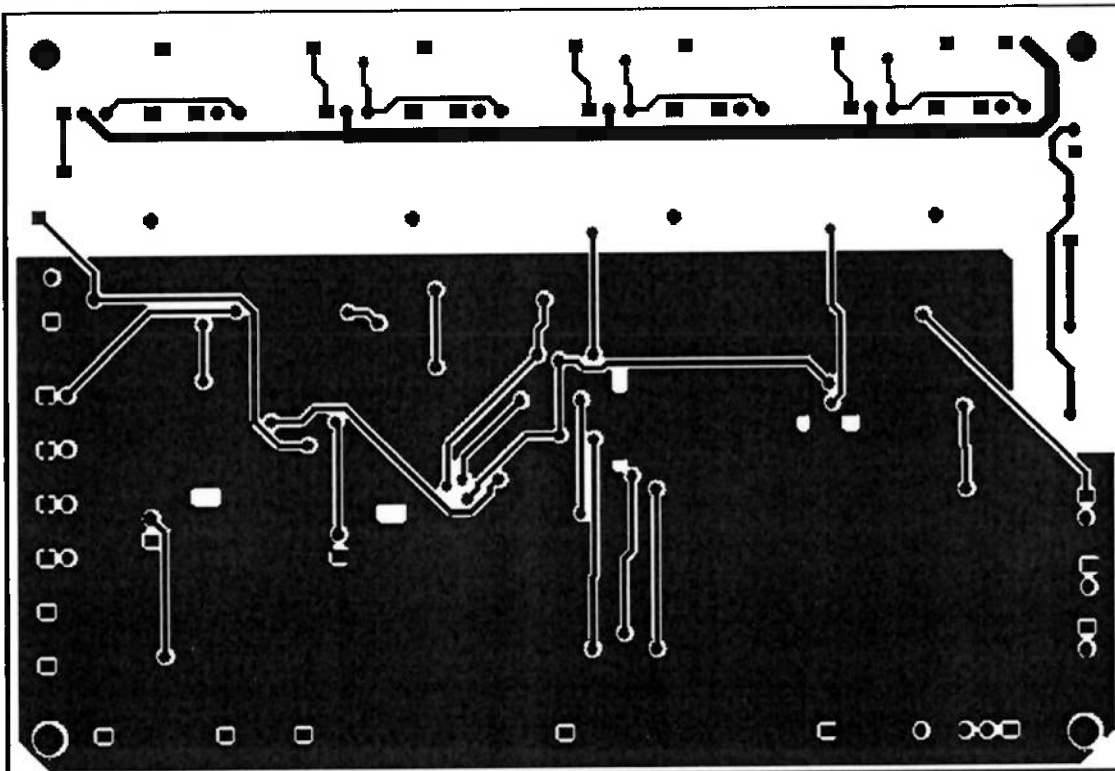
15.5.4 Trilhas da camada superior - com preenchimento de cobre



15.5.5 Trilhas da camada inferior



15.5.6 Trilhas da camada inferior - com preenchimento de cobre



15.6 Análise das perdas previstas

Uma análise sucinta de perdas permite a estimativa inicial do rendimento da máquina. Perdas de difícil caracterização serão simplificadas ou inicialmente desprezadas.

15.6.1 Atrito com o ar

Desprezando-se as perdas nas superfícies superiores e inferiores dos cilindros, tem-se apenas as devido a sua casca. O número de Reynolds neste caso é dado por:

$$Re = \rho \cdot \frac{R \cdot v}{\mu} = \rho \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot n}{\mu}$$

Sendo $v = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot n$ a velocidade tangencial na casca do cilindro, R seu raio, ρ a densidade do meio, n a velocidade rotacional (rps) e μ a viscosidade dinâmica do fluido. Tendo como meio fluido o ar, tem-se $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ e $\mu = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Pa.s}$.

O coeficiente de arrasto é dado por:

$$c_f = \frac{3,87}{\sqrt{Re}}$$

A perda devido à resistência aerodinâmica será dada por:

$$P_{ar} = \frac{1}{2} \cdot c_f \cdot \rho \cdot (2 \cdot \pi \cdot n)^3 \cdot (R^5 - R_{exo}^5)$$

Para a rotação de 20 000 RPM, ter-se-á:

$$P_{ar} \approx 94 \text{ W}$$

15.6.2 Perdas por efeito Joule nos condutores

Cada fase da máquina é composta por dois ramos em paralelo de aproximadamente 4,5 metros de fio AWG17. A resistência equivalente por fase, portanto, é:

$$R_f = \frac{l_{fase}}{a_p \cdot \sigma \cdot A_{AWG17}}$$

Sendo a_p o número de ramos em paralelo, A_{AWG17} a área da seção do condutor utilizado e σ sua condutividade elétrica ($\sigma \approx 57 \cdot 10^6 \text{ S/m}$ a 20°C e $\sigma \approx 57 \cdot 10^6 \text{ S/m}$ a 75°C).

$$R_{f20^\circ} = \frac{4,5}{2 \cdot 1,039 \cdot 57} = 38 \text{ m}\Omega; \quad R_{f75^\circ} = \frac{4,7}{2 \cdot 1,039 \cdot 47} = 46 \text{ m}\Omega$$

Desprezando o efeito pelicular, e assumindo o caso de maior potência transferida para o enrolamento:

$$P_J = R_{f75^\circ} \cdot I_{\max}^2 \approx 46 \text{ m} \cdot 20^2 = 18,4 \text{ W}$$

15.6.3 Perdas Foucault (ou por correntes parasitas)

A definição da máquina com estator sem núcleo ferromagnético provoca virtualmente total eliminação de perdas como as perdas no núcleo do rotor e nas pastilhas de ímãs permanente devido à variação de fluxo causado pelas ranhuras. Entretanto, na ausência de um caminho de baixa relutância para o fluxo magnético, o efeito de correntes parasitas induzidas no enrolamento não pode ser desprezado. Estima-se:

$$P_F = \frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{\sigma}{\rho} \cdot f^2 \cdot d^2 \cdot m_{con} \cdot B_{mz}^2 \cdot \eta_d^2$$

Sendo d o diâmetro do condutor, σ a condutividade elétrica, ρ a massa específica, m_{con} a massa total do enrolamento, f a frequência da corrente no estator, B_{mz} o valores de pico do campo magnético axial, e η_d um coeficiente de distorção, unitário para campo senoidal.

Assim se nota que o uso de múltiplos condutores finos em paralelo, em substituição a um condutor grosso unitário, promoveria redução nas perdas parasitas. Entretanto se os ramos paralelos não estiverem adequadamente balanceados, pode haver circulação de corrente parasita.

Para o caso em estudo, com acionamento a 10000 RPM, tem-se:

$$P_F \approx \frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{57 \cdot 10^6}{8920 \text{kg/m}^3} \cdot (667 \text{Hz})^2 \cdot (1,15 \cdot 10^{-3})^2 \cdot (0,250 \text{kg}) \cdot (0,27 \text{T})^2 \cdot 1$$

$$P_F \approx 167 \text{W}$$

15.6.4 Perdas nas chaves de estado sólido

O uso de transistores para o inversor de potência implica potência dissipada em sua condução e principalmente em sua comutação.

Estima-se:

$$P_{MOSFET} = I^2 \cdot R_{DS(on)} \cdot D + \frac{1}{2} \cdot V \cdot I \cdot (t_r + t_f) \cdot f_s + Q_{Gate} \cdot V_{GS} \cdot f_s$$

Em que D é o *duty cycle*, f_s a frequência de chaveamento, e t_r e t_f os tempos de subida e descida do chaveamento, respectivamente.

Para os dispositivos adquiridos, tem-se.

MOSFETs de canal P: $R_{DS} = 150 \text{m}\Omega$; $Q = 2 \mu\text{F}$

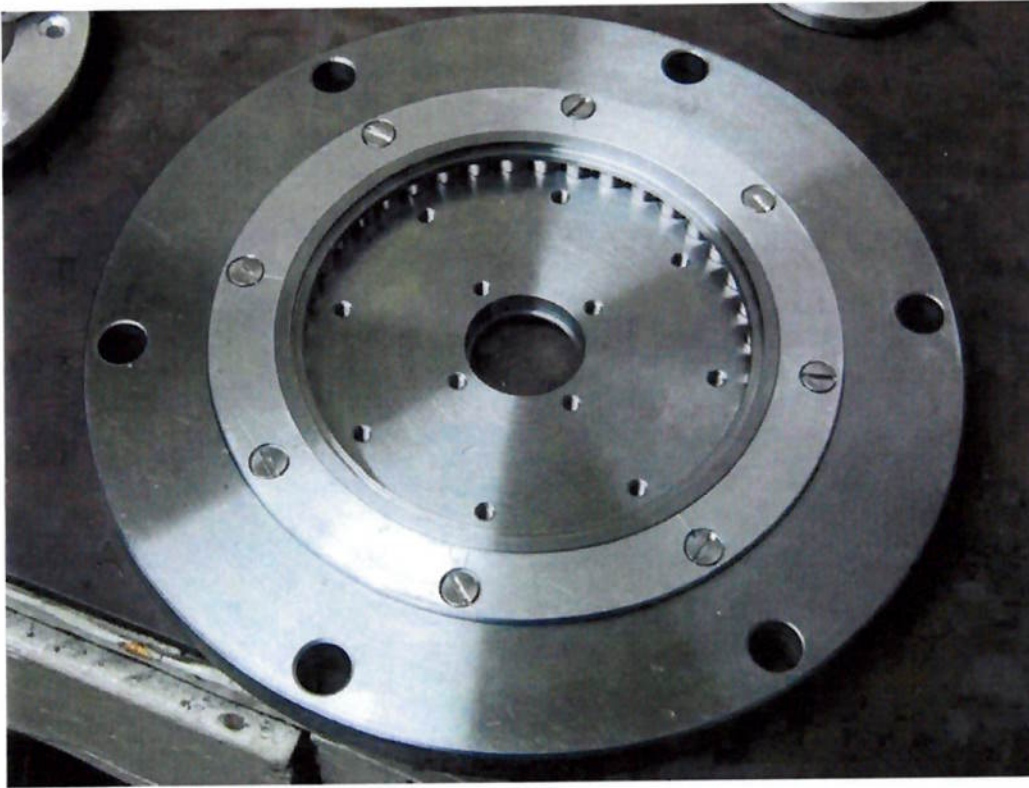
MOSFETs de canal N: $R_{DS} = 40 \text{m}\Omega$; $Q = 4 \mu\text{F}$

Estimam-se, em um cenário pessimista, tempos de subida e descida de 150 e 100ns, respectivamente.

Para o caso em questão, na rotação de 10000RPM, assumindo acionamento a 15A:

15.7 Fotos do protótipo e sua produção

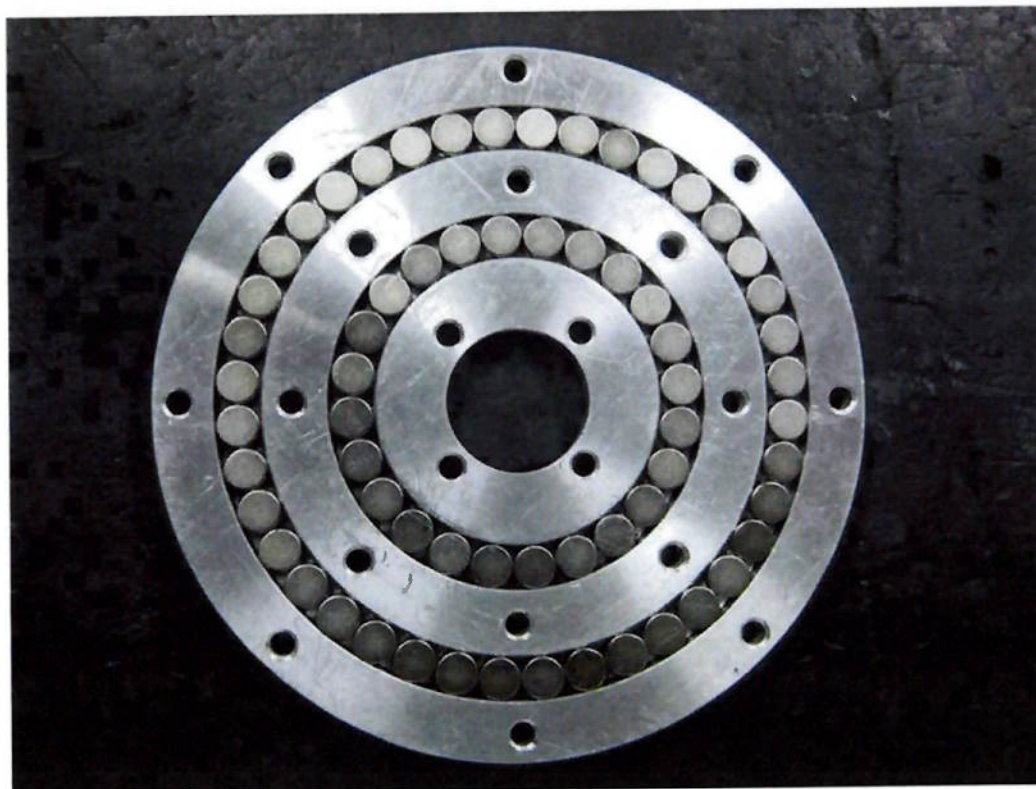
15.7.1 Montagem de um módulo do mancal magnético



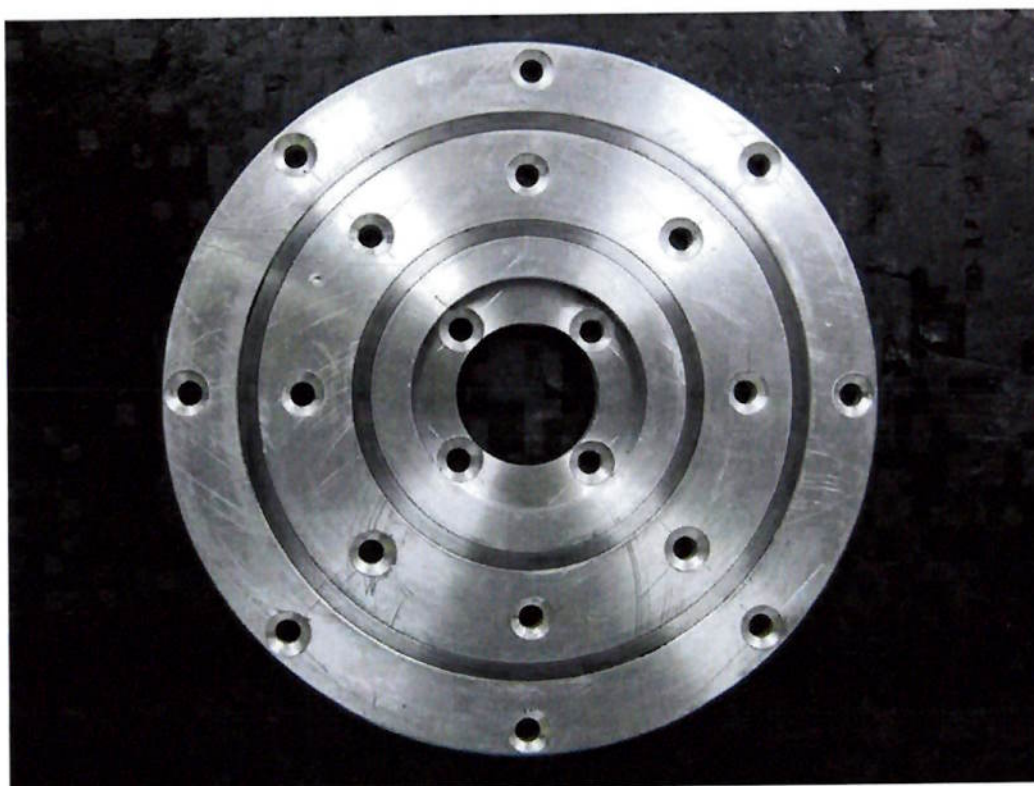
15.7.2 Mancal magnético - Detalhe do anel para concentração de fluxo magnético



15.7.3 Módulo isolado do mancal magnético

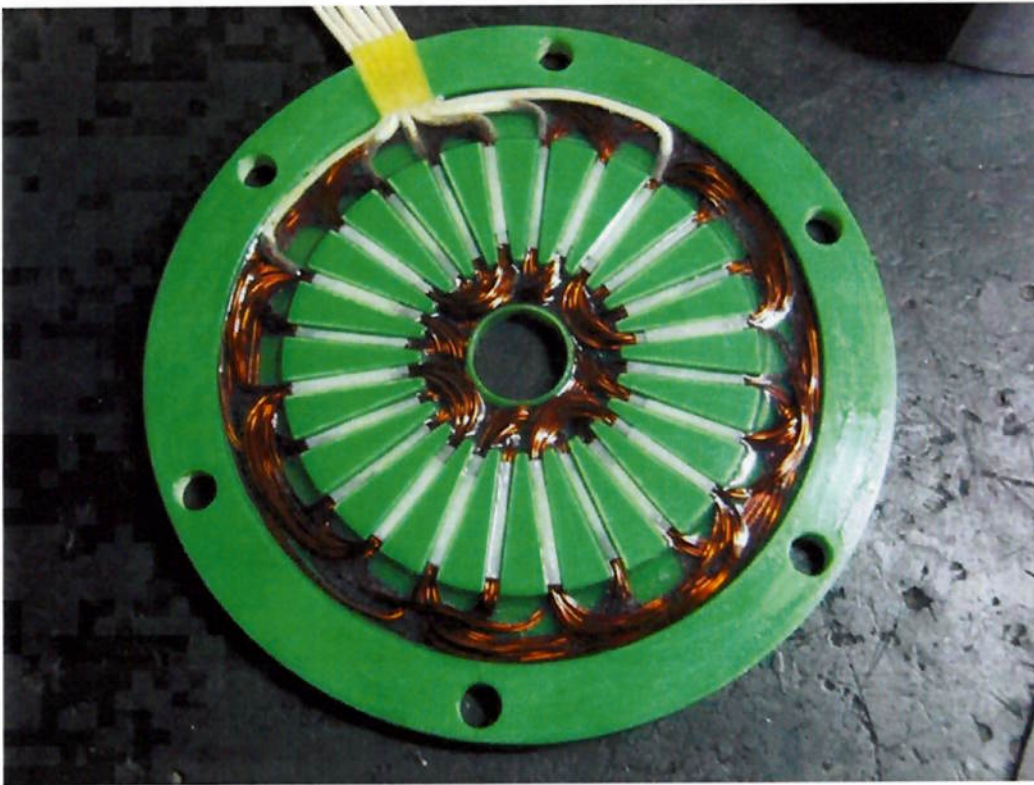


FACE VOLTADA PARA O MATERIAL FERROMAGNÉTICO

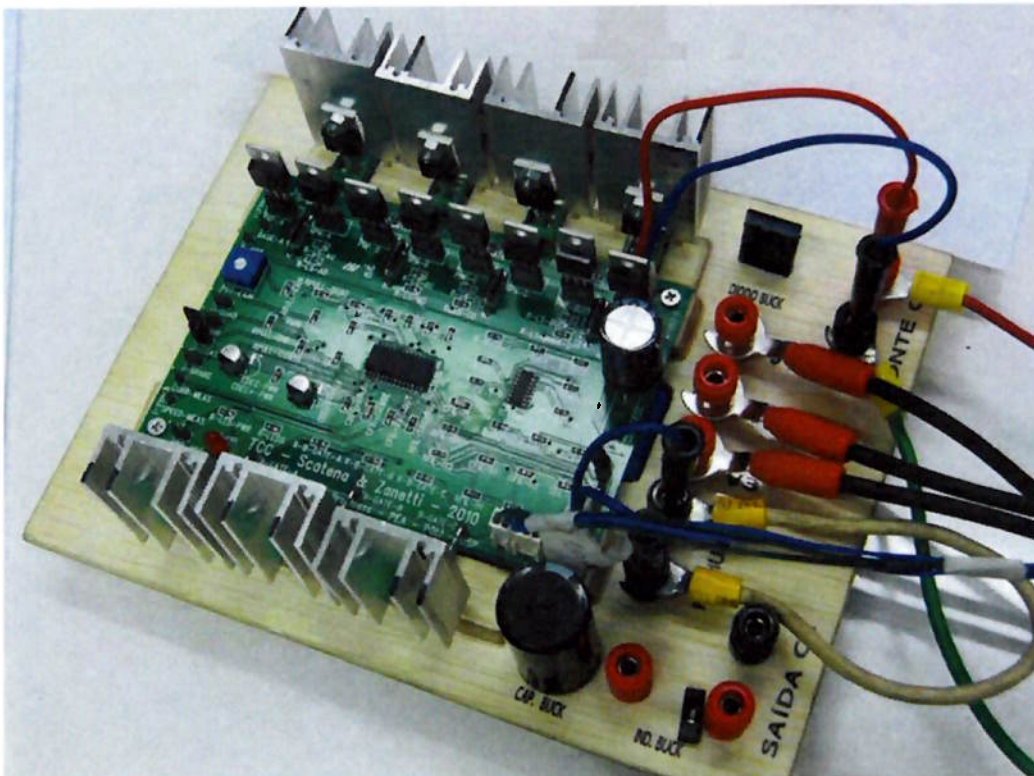


FACE VOLTADA PARA O ENTREFERRO

15.7.4 Enrolamento do estator

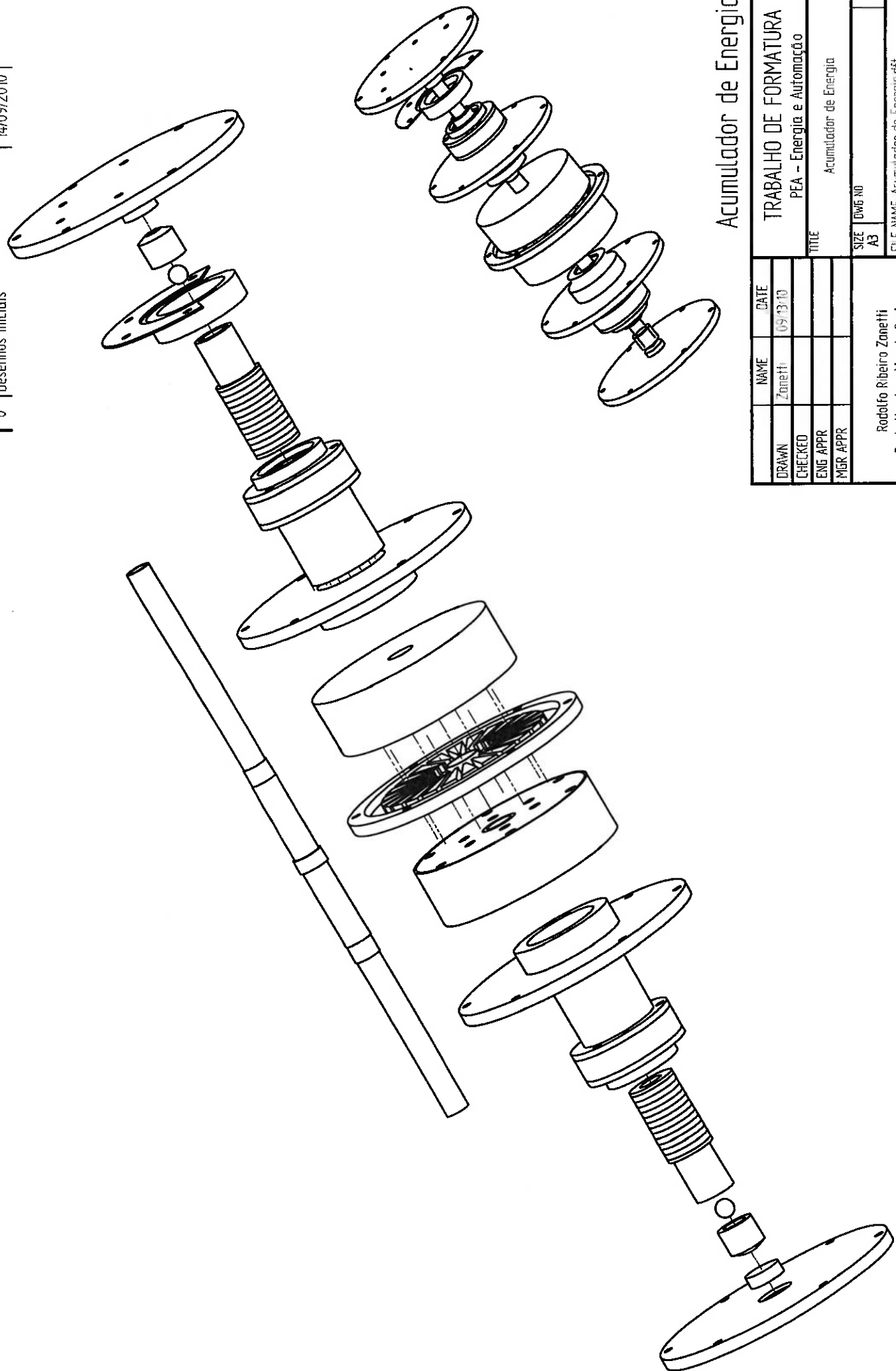


15.7.5 Placa de acionamento



15.8 Desenhos técnicos do primeiro projeto

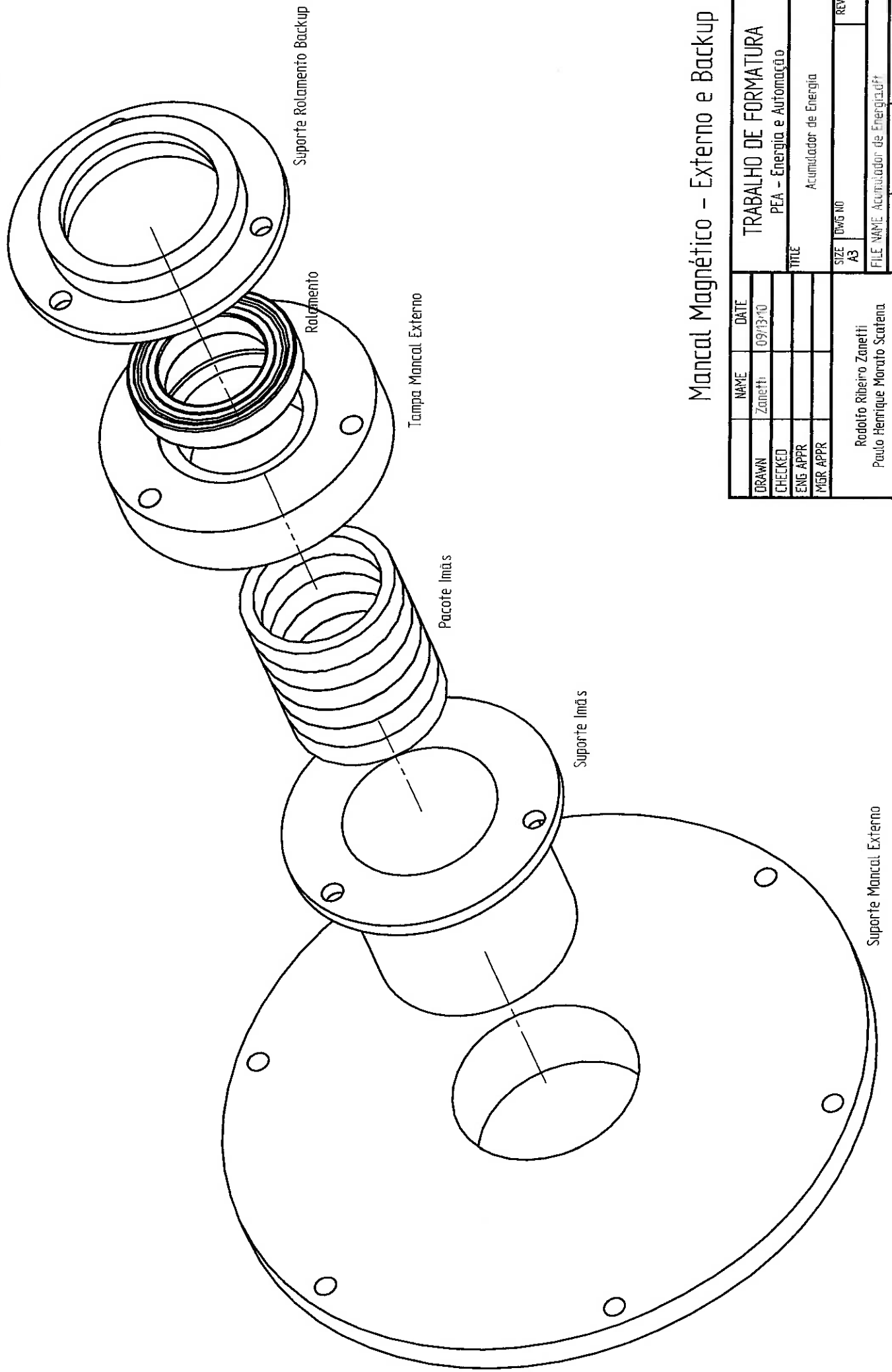
| | | | | | | |
|-----|---|-------------|-------------------|------|------------|----------|
| KEY | 0 | DESCRIPTION | Desenhos Iniciais | DATE | 14/09/2010 | APPROVED |
|-----|---|-------------|-------------------|------|------------|----------|



Acumulador de Energia

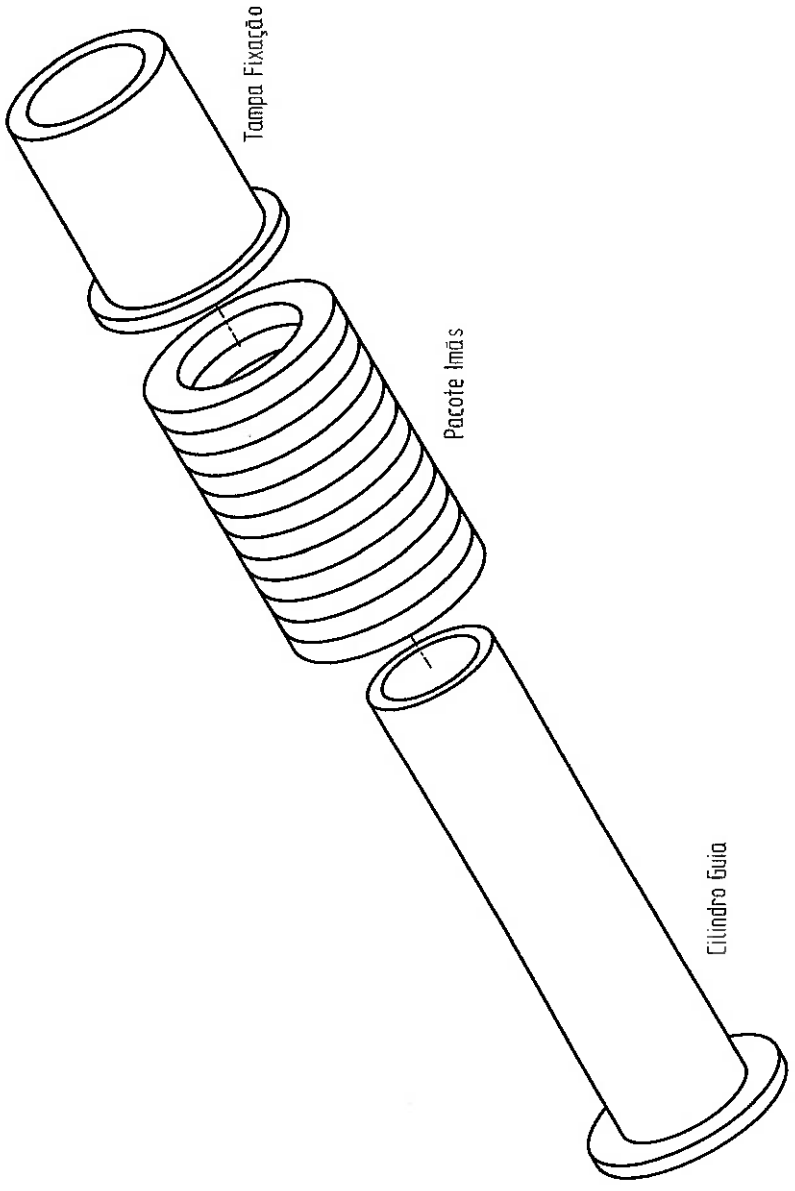
| | | | |
|--------------------------------------|--------|---------|----------|
| DRAWN | | NAME | DATE |
| CHECKED | | Zanetti | 09/13/10 |
| ENG APPR | | | |
| MGR APPR | | | |
| TITLE | | | |
| TRABALHO DE FORMATURA | | | |
| PEA - Energia e Automação | | | |
| Acumulador de Energia | | | |
| SIZE | DWG NO | REV | |
| A3 | | | |
| FILE NAME: Acumulador de Energia.dwg | | | |
| SCALE | | | |
| WEIGHT | | | |
| SHEET 1 OF 16 | | | |
| Rodolfo Ribeiro Zanetti | | | |
| Paulo Henrique Morato Scatena | | | |

| | | | |
|-----|-------------------|------------|----------|
| REV | DESCRIPTION | DATE | APPROVED |
| 0 | Desenhos Iniciais | 14/09/2010 | |



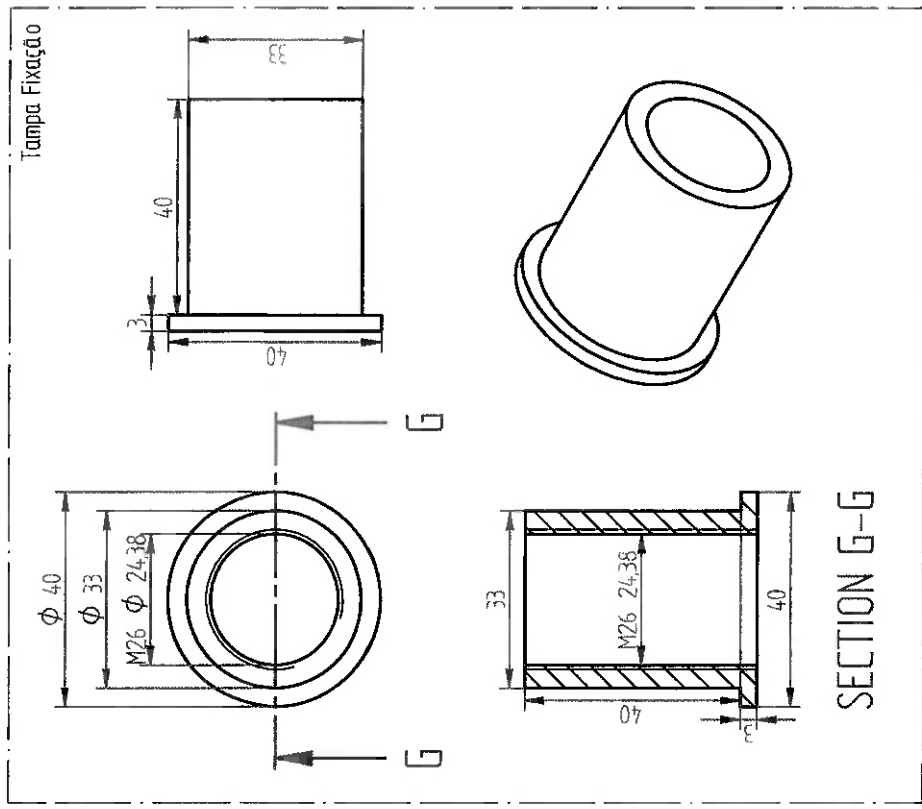
Mancal Magnético - Externo e Backup

| | | | |
|-------------------------------|---------|---------------|---------------------------|
| DRAWN | NAME | DATE | TRABALHO DE FORMATURA |
| CHECKED | Zanetti | 09/13/10 | PEA - Energia e Automação |
| ENG APPR | | | TITLE |
| MGR APPR | | | Acumulador de Energia |
| Rodolfo Ribeiro Zanetti | | SIZE | DWG NO |
| Paulo Henrique Morato Scatena | | A3 | REV |
| | | FILE NAME | Acumulador de Energia.dwg |
| | | SCALE | WEIGHT |
| | | SHEET 2 OF 16 | |



Mancal Magnético - Interno

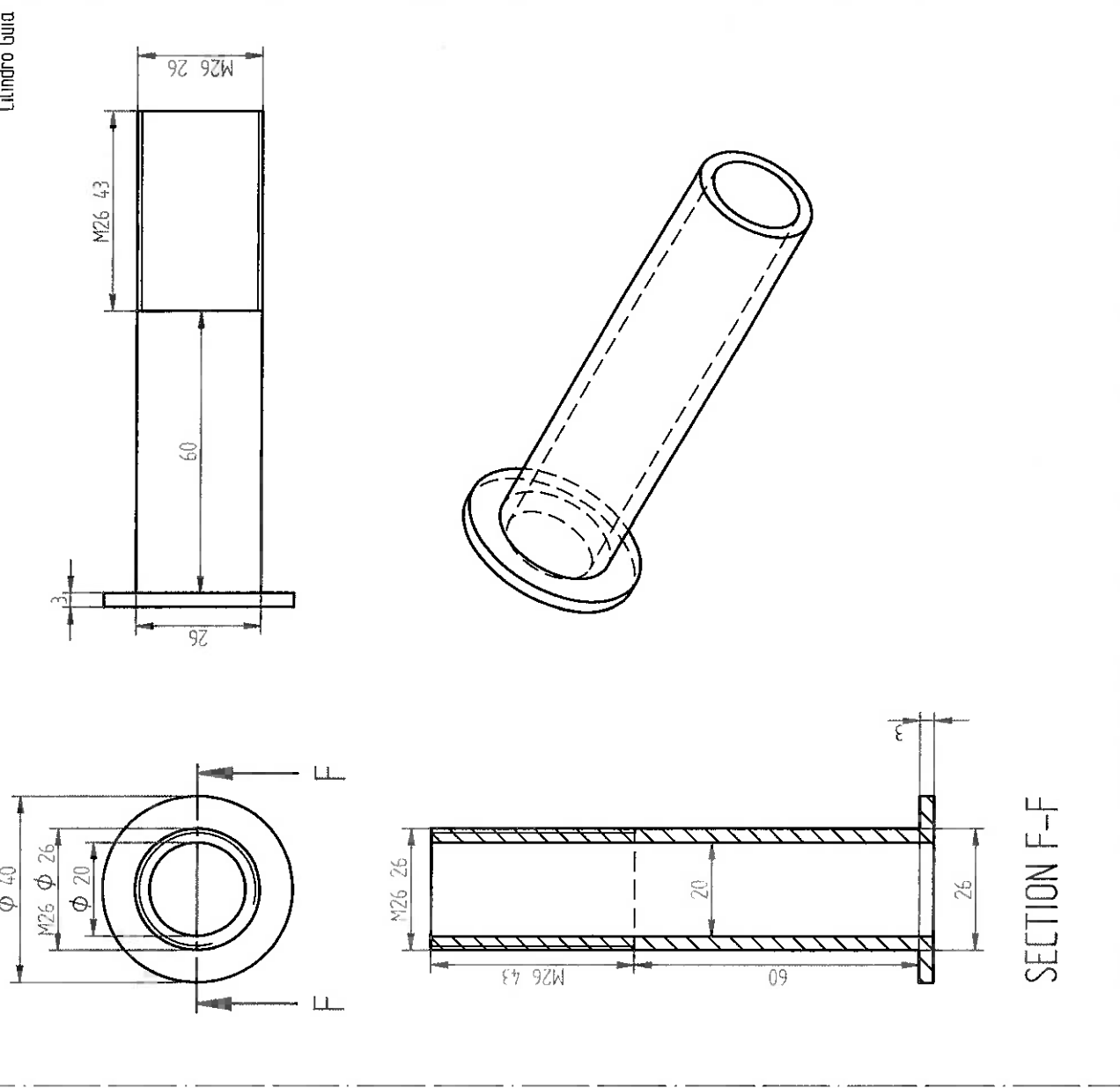
| | |
|---|---------------|
| NAME | DATE |
| Zanetti | 09/13/10 |
| TRABALHO DE FORMATURA PEA - Energia e Automação | |
| TITLE | |
| Acumulador de Energia | |
| SIZE | DWG NO |
| A3 | |
| REV | |
| Radolfo Ribeiro Zanetti Paulo Henrique Morato Scatena | |
| FILE NAME: Acumulador de Energia.dwg | |
| SCALE | WEIGHT: |
| | SHEET 4 OF 16 |



Mancal Magnético - Interno

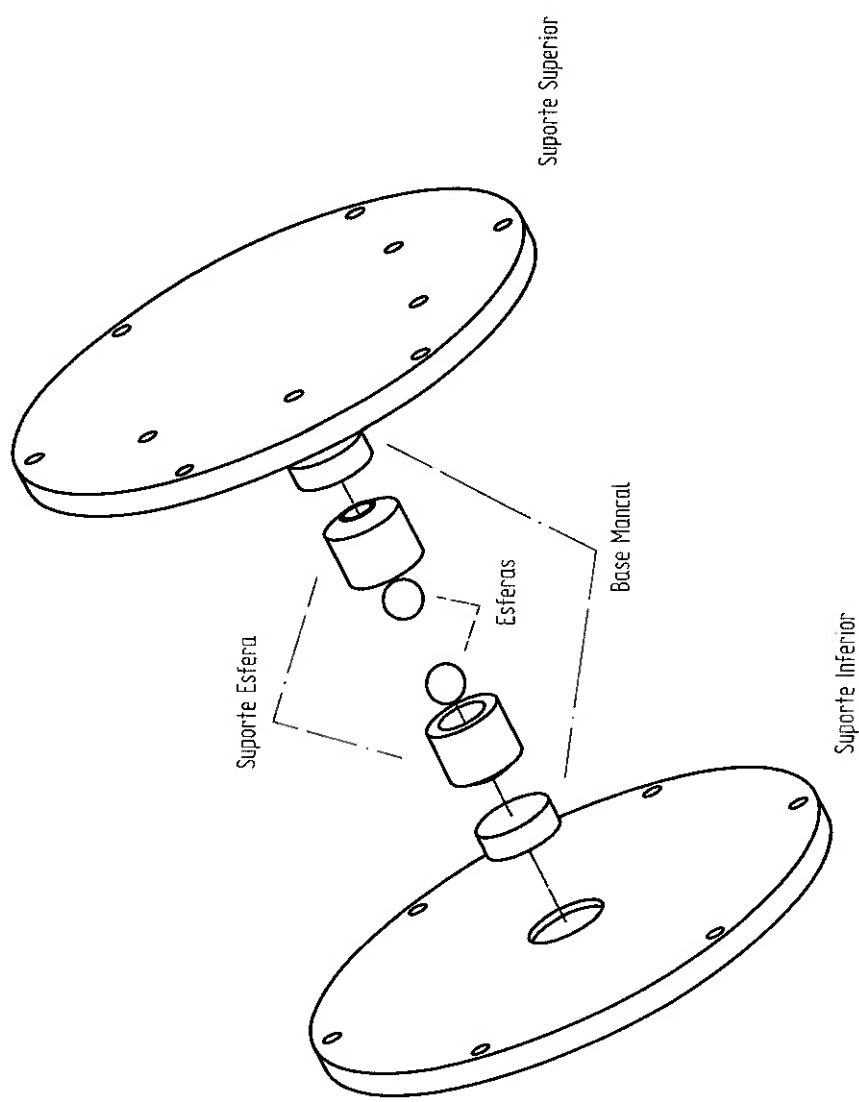
| | |
|---|---------------------------|
| NAME | DATE |
| Zanetti | 09/13/10 |
| TRABALHO DE FORMATURA PEA - Energia e Automação | |
| TITLE | |
| Acumulador de Energia | |
| SIZE | DWG NO |
| A3 | |
| FILE NAME | Acumulador de Energia.dwt |
| SCALE | WEIGHT |
| | SHEET 5 OF 16 |

Cilindro Guia



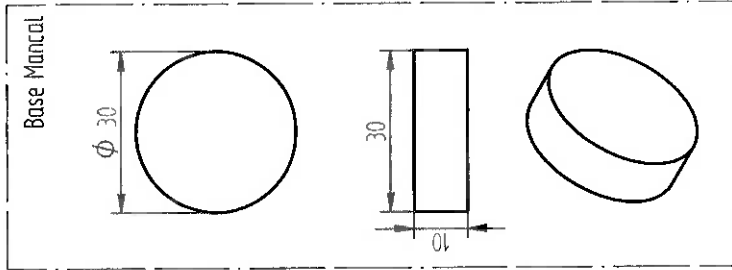
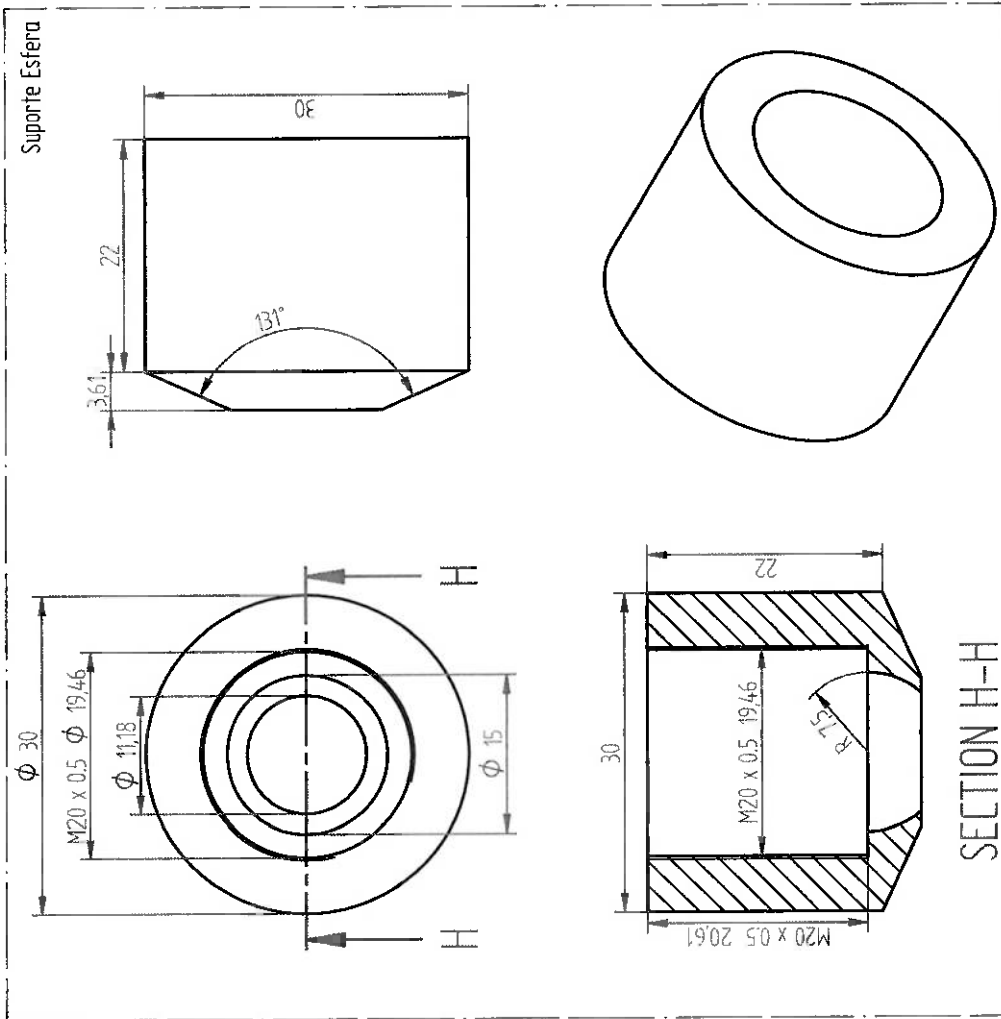
SECTION F-F

| | | | |
|-----|-------------------|------------|----------|
| KEY | DESCRIPTION | DATE | APPROVED |
| 0 | Desenhos Iniciais | 14/09/2010 | |



Mancal Axial

| | | | |
|---|--------|---------------------------|----------|
| DRAWN | | NAME | DATE |
| CHECKED | | Zanetti | 09/03/10 |
| ENG APPR | | | |
| MGR APPR | | | |
| TRABALHO DE FORMATURA PEA - Energia e Automação Acumulador de Energia | | | |
| TITLE | | | |
| SIZE | DWG NO | REV | |
| A3 | | | |
| Rodolfo Ribeiro Zanetti Paulo Henrique Morato Scatena | | | |
| FILE NAME | | Acumulador de Energia.dwg | |
| SCALE | WEIGHT | SHEET 6 OF 16 | |

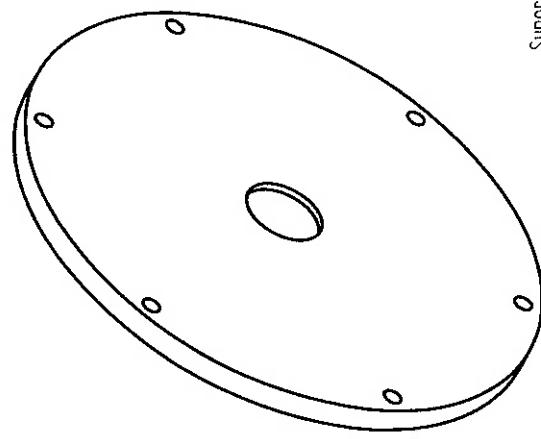
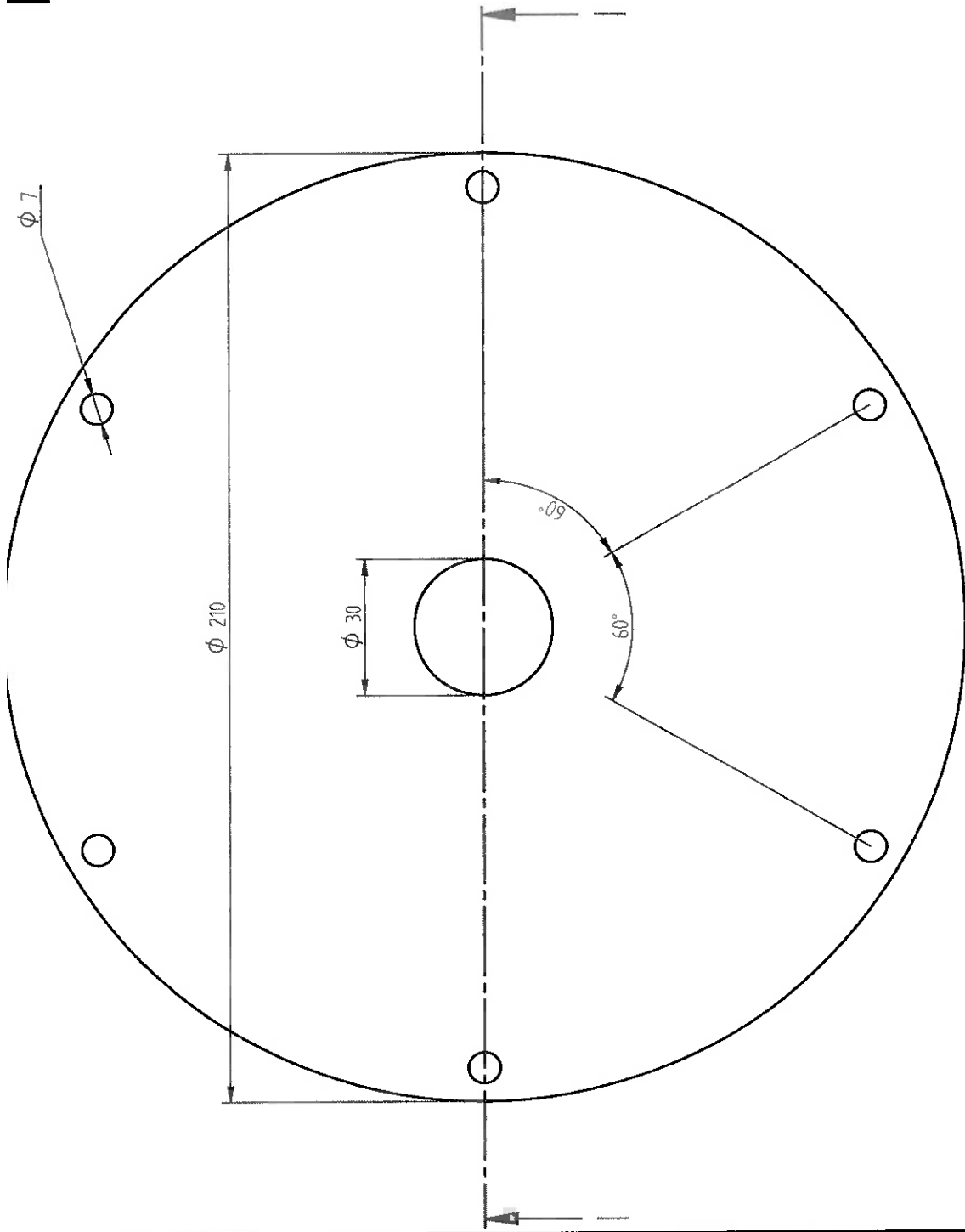


Mancal Axial

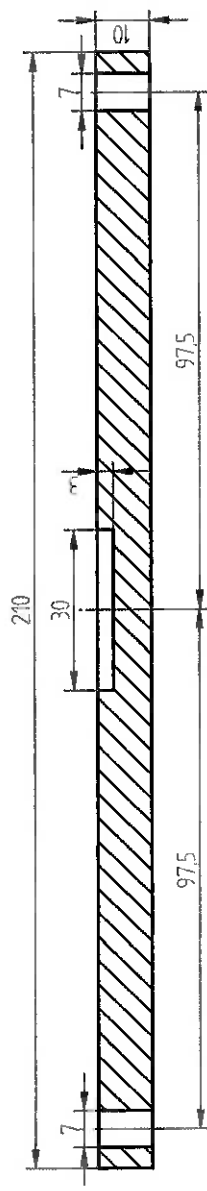
| | |
|--------------------------------------|---------------|
| NAME | DATE |
| Zanetti | 09/03/10 |
| DRAWN | |
| CHECKED | |
| ENG APPR | |
| MGR APPR | |
| TITLE | |
| Acumulador de Energia | |
| SIZE | DWG NO |
| A3 | |
| REV | |
| FILE NAME: Acumulador de Energia.dwt | |
| SCALE | WEIGHT: |
| | SHEET 7 DE 16 |

TRABALHO DE FORMATURA
PEA - Energia e Automação

Rodolfo Ribeiro Zanetti
Paulo Henrique Morato Scatena



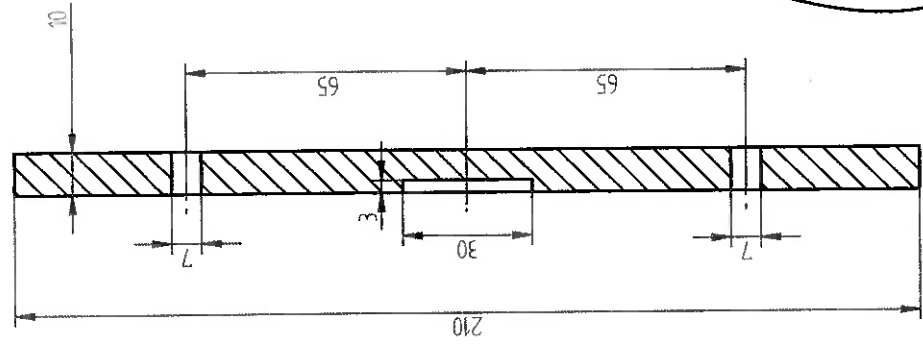
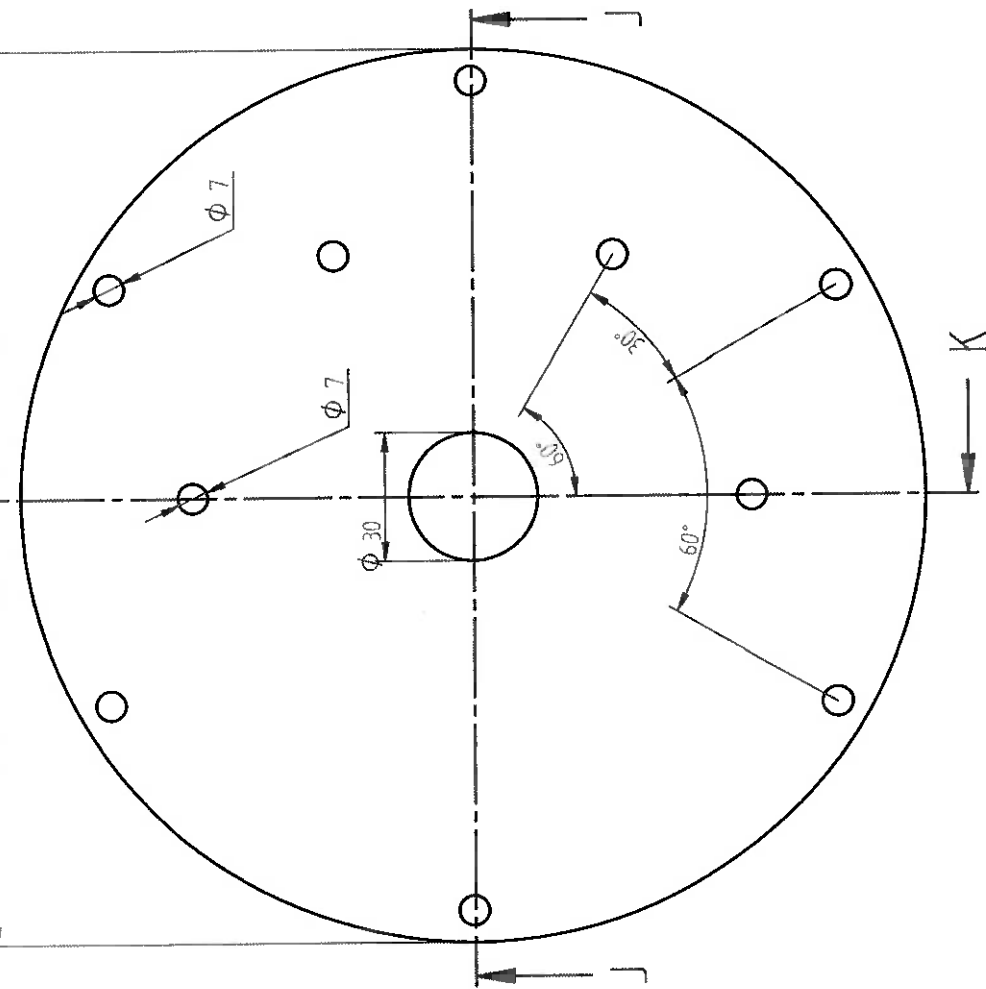
Suporte Inferior
Mancal Axial



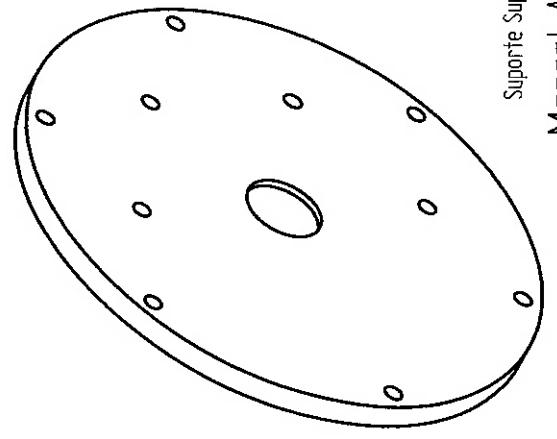
SECTION I-I

| | |
|--------------------------------------|---------------|
| NAME | DATE |
| Zanetti | 09/13/10 |
| DRAWN | |
| CHECKED | |
| ENG APPR | |
| MGR APPR | |
| TITLE | |
| TRABALHO DE FORMATURA | |
| PEA - Energia e Automação | |
| Acumulador de Energia | |
| SIZE | DWG NO |
| A3 | |
| REV | |
| FILE NAME: Acumulador de Energia.dwg | |
| SCALE | WEIGHT |
| | SHEET 8 OF 16 |

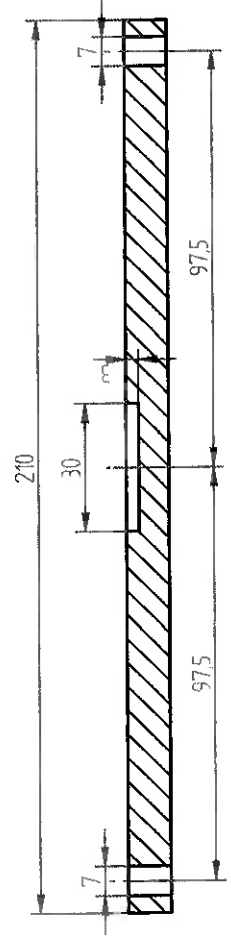
Rodolfo Ribeiro Zanetti
Paulo Henrique Morato Scortena



SECTION K-K

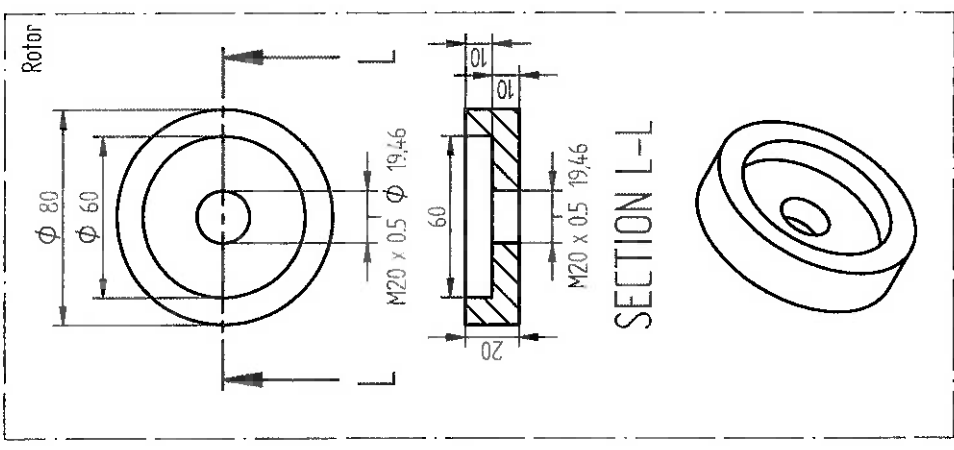


Suporte Superior
Mancal Axial



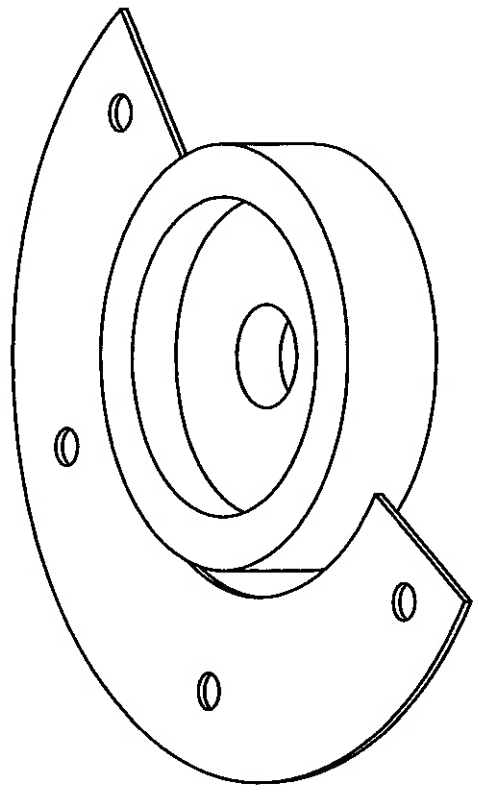
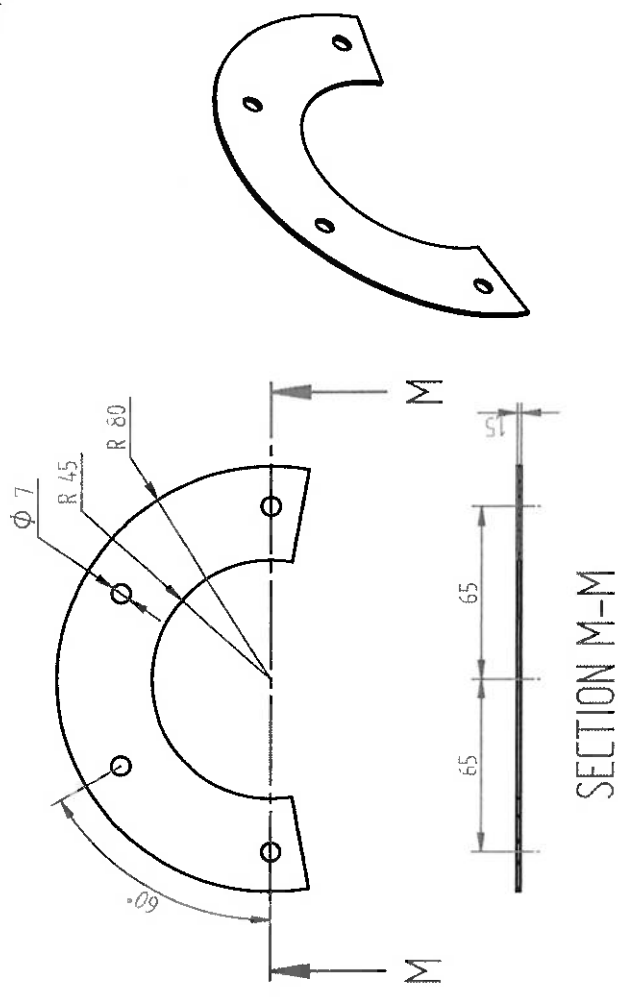
SECTION J-J

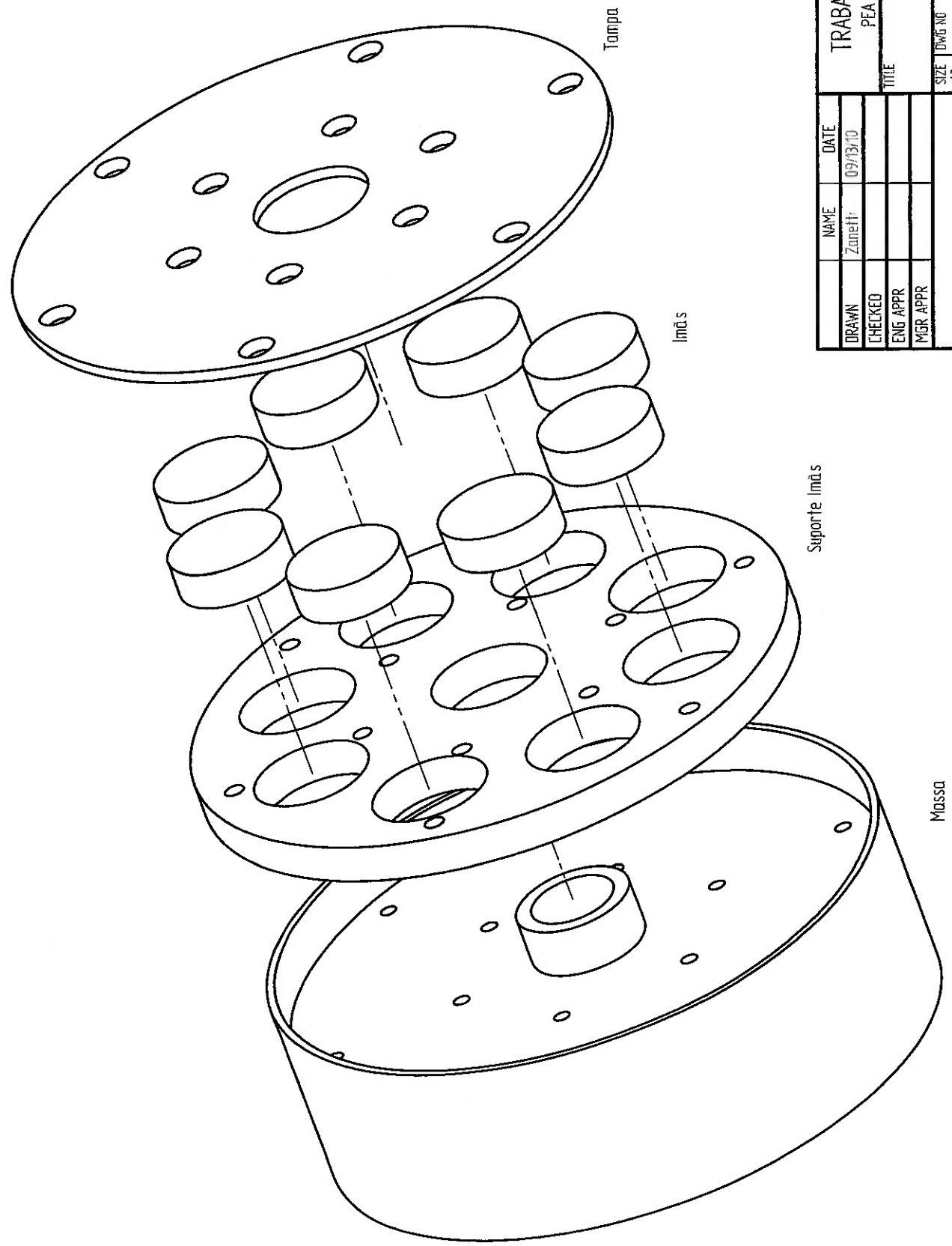
| | | |
|--|----------|--|
| NAME | DATE | TRABALHO DE FORMATURA PEA - Energia e Automação Acumulador de Energia |
| DRAWN | 09/13/10 | |
| CHECKED | | |
| ENG APPR | | |
| MGR APPR | | |
| Rodolfo Ribeiro Zanetti Paulo Henrique Morato Scatena | | TITLE |
| SIZE | DWG NO | REV |
| A3 | | |
| SCALE | WEIGHT | FILE NAME: Acumulador de Energia.dwt |
| | | SHEET 9 OF 16 |



Sensores

| | |
|--|---------------|
| TRABALHO DE FORMATURA | |
| PEA - Energia e Automação | |
| TITLE Acumulador de Energia | |
| SIZE A3 | DWG NO REV |
| FILE NAME Acumulador de Energia.dwt | |
| SCALE | WEIGHT |
| Rodolfo Ribeiro Zanetti | |
| Paulo Henrique Morato Scatena | |
| SHEET 10 OF 16 | |

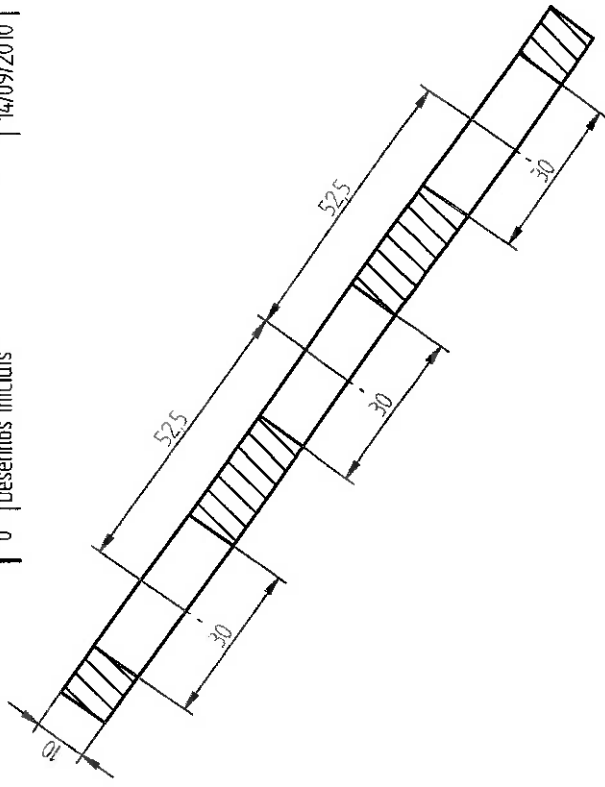




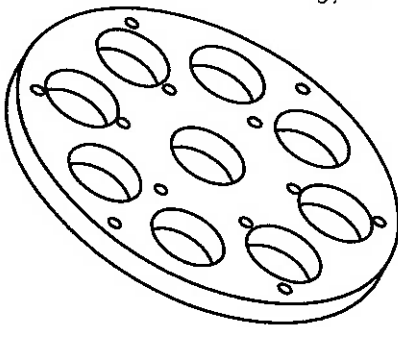
Volante

| | | | |
|--------------------------------------|--|----------------|----------|
| DRAWN | | NAME | DATE |
| CHECKED | | Zanetti | 09/13/10 |
| ENG APPR | | | |
| MGR APPR | | | |
| TITLE | | | |
| TRABALHO DE FORMATURA | | | |
| PEA - Energia e Automação | | | |
| Acumulador de Energia | | | |
| SIZE | | REV | |
| A3 | | | |
| FILE NAME: Acumulador de Energia.dwg | | | |
| SCALE | | WEIGHT | |
| | | SHEET 11 DE 16 | |

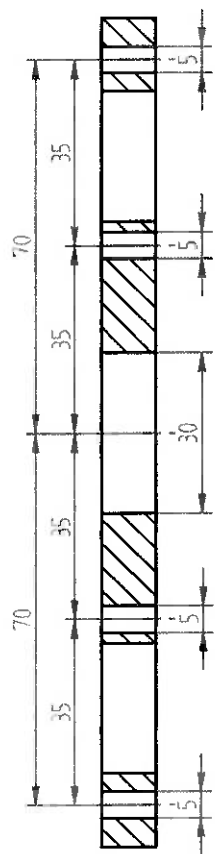
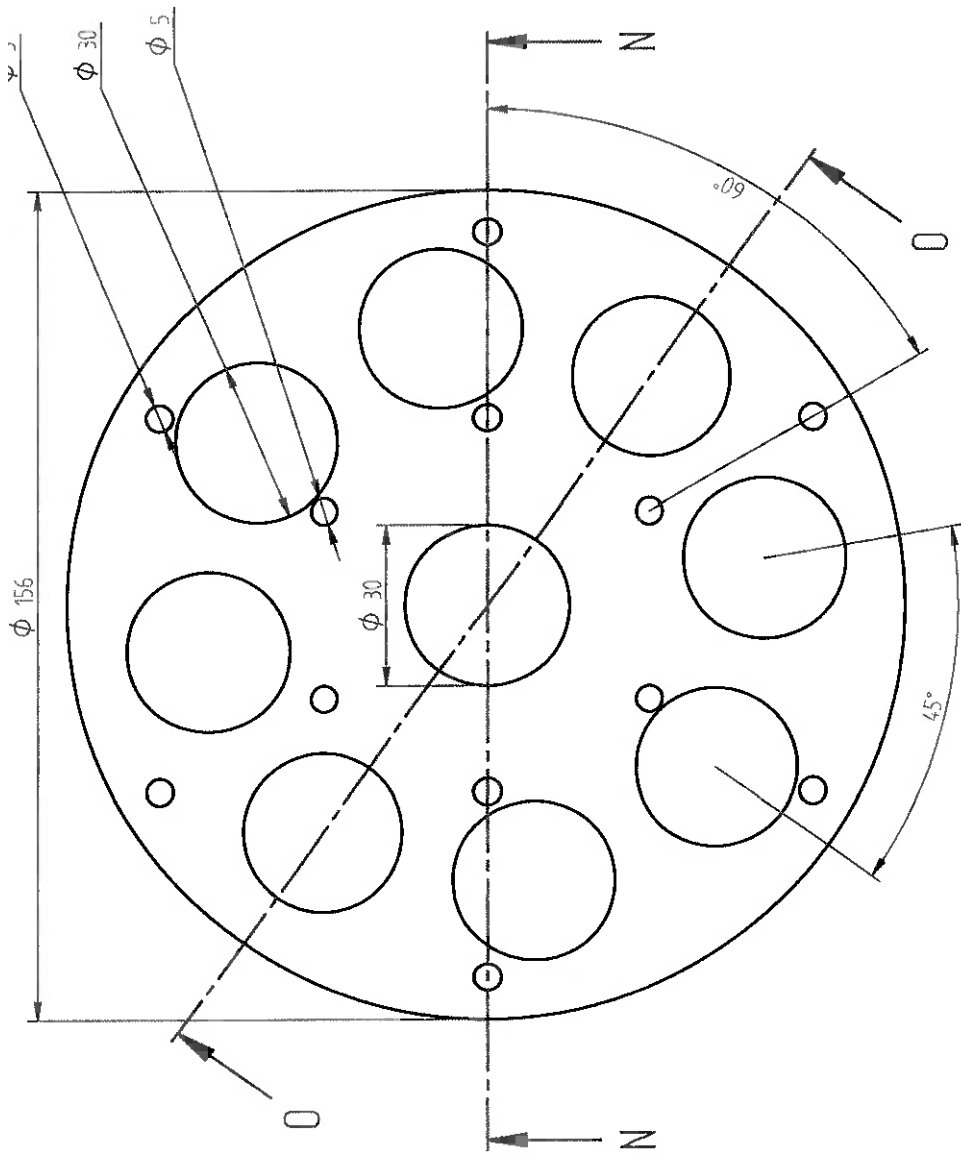
Rodolfo Ribeiro Zanetti
Paulo Henrique Morato Scatena



SECTION O-O



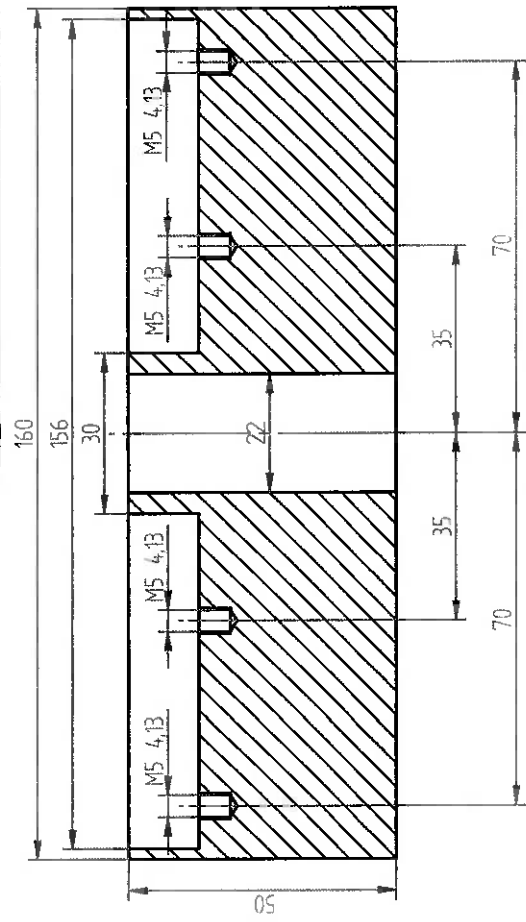
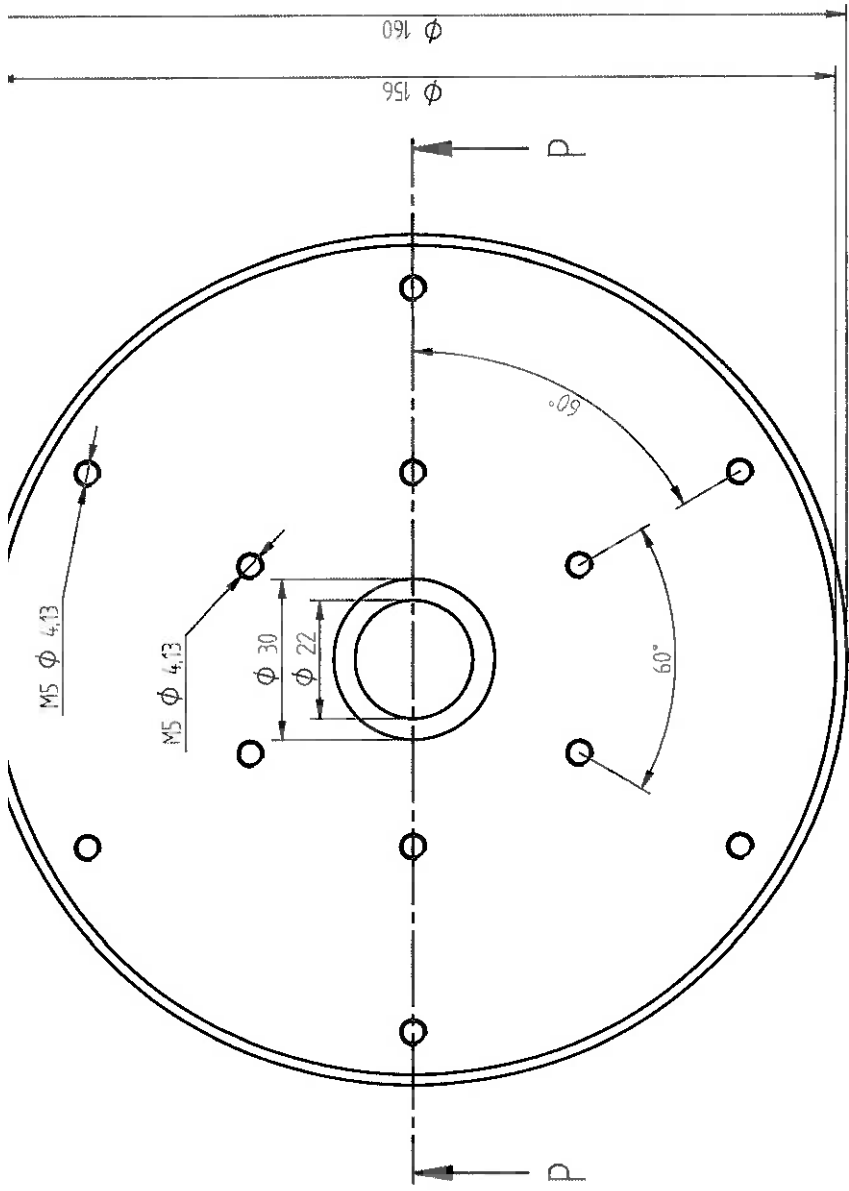
Suporte Imãs
Volante



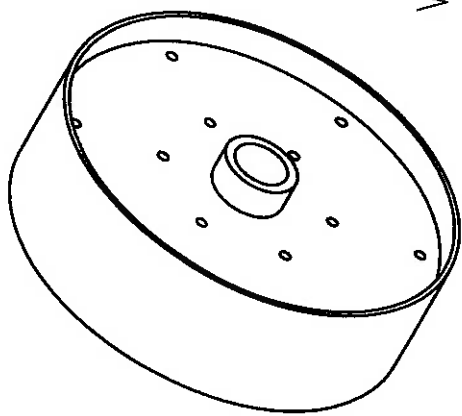
SECTION N-N

| | |
|--|---------------------------|
| NAME | DATE |
| Zanetti | 09/13/10 |
| CHECKED | |
| ENG APPR | |
| MGR APPR | |
| Rodolfo Ribeiro Zanetti Paulo Henrique Morato Scatena | |
| TITLE | |
| SIZE | DWG NO |
| AB | |
| FILE NAME | Acumulador de Energia.dwg |
| SCALE | WEIGHT |
| | SHEET 12 OF 16 |

| | |
|---------------------------|--|
| TRABALHO DE FORMATURA | |
| PEA - Energia e Automação | |
| Acumulador de Energia | |
| REV | |



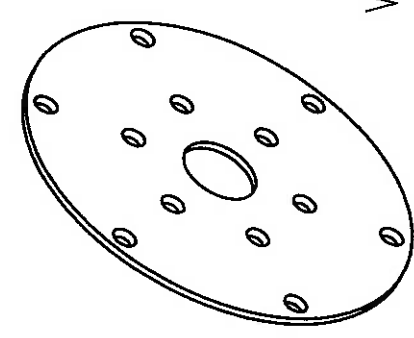
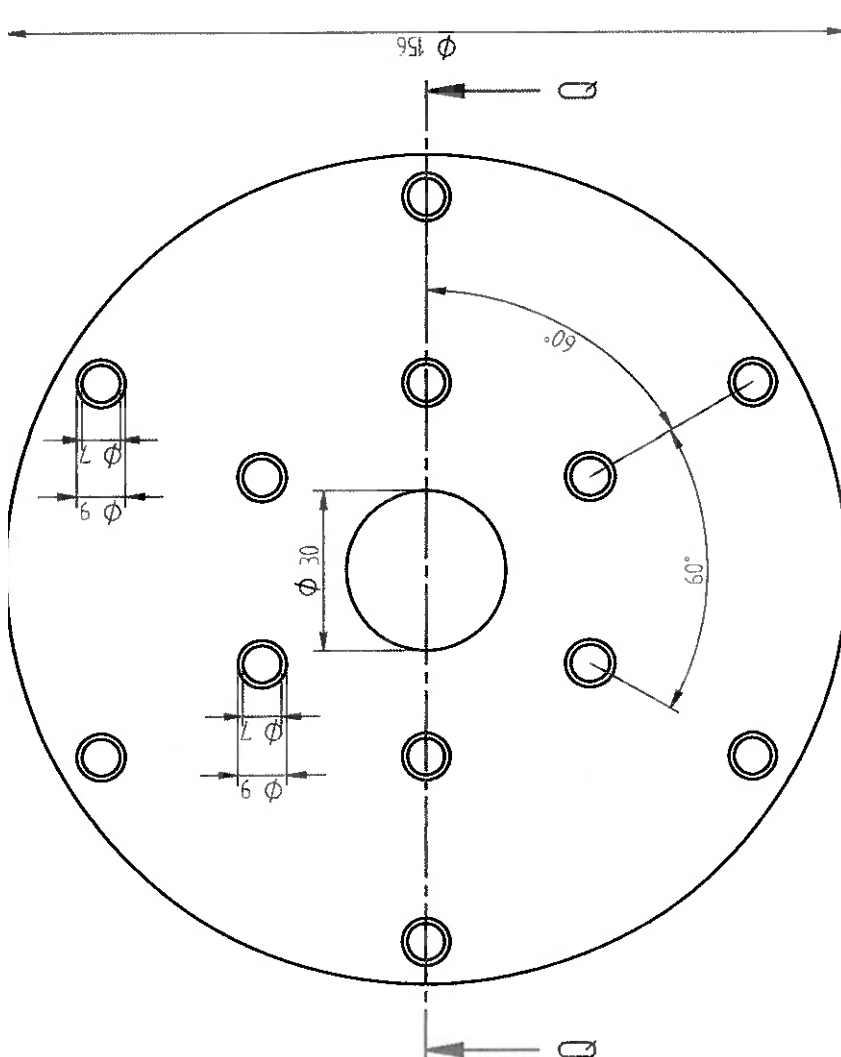
SECTION P-P



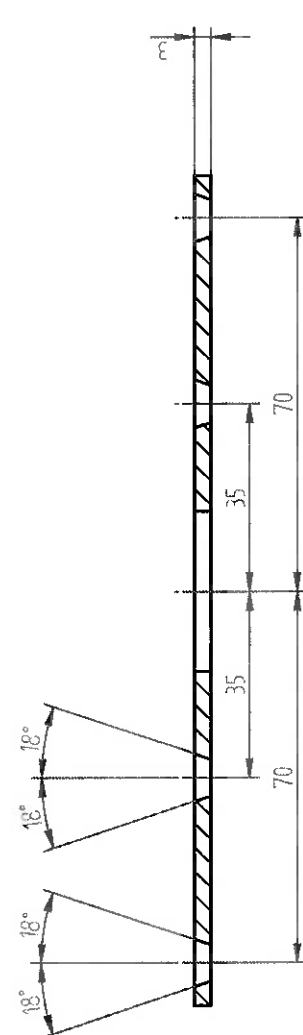
Massa
Volante

| | | | |
|-------------------------------------|--|----------------|----------|
| DRAWN | | NAME | DATE |
| CHECKED | | Zanetti | 09/13/10 |
| ENG APPR | | | |
| MGR APPR | | | |
| TITLE | | | |
| TRABALHO DE FORMATURA | | | |
| PEA - Energia e Automação | | | |
| Acumulador de Energia | | | |
| SIZE DWG NO | | | |
| A3 | | REV | |
| FILE NAME Acumulador de Energia.dwt | | | |
| SCALE | | WEIGHT | |
| | | SHEET 13 DE 15 | |

Rodolfo Ribeiro Zanetti
Paulo Henrique Marato Scarama



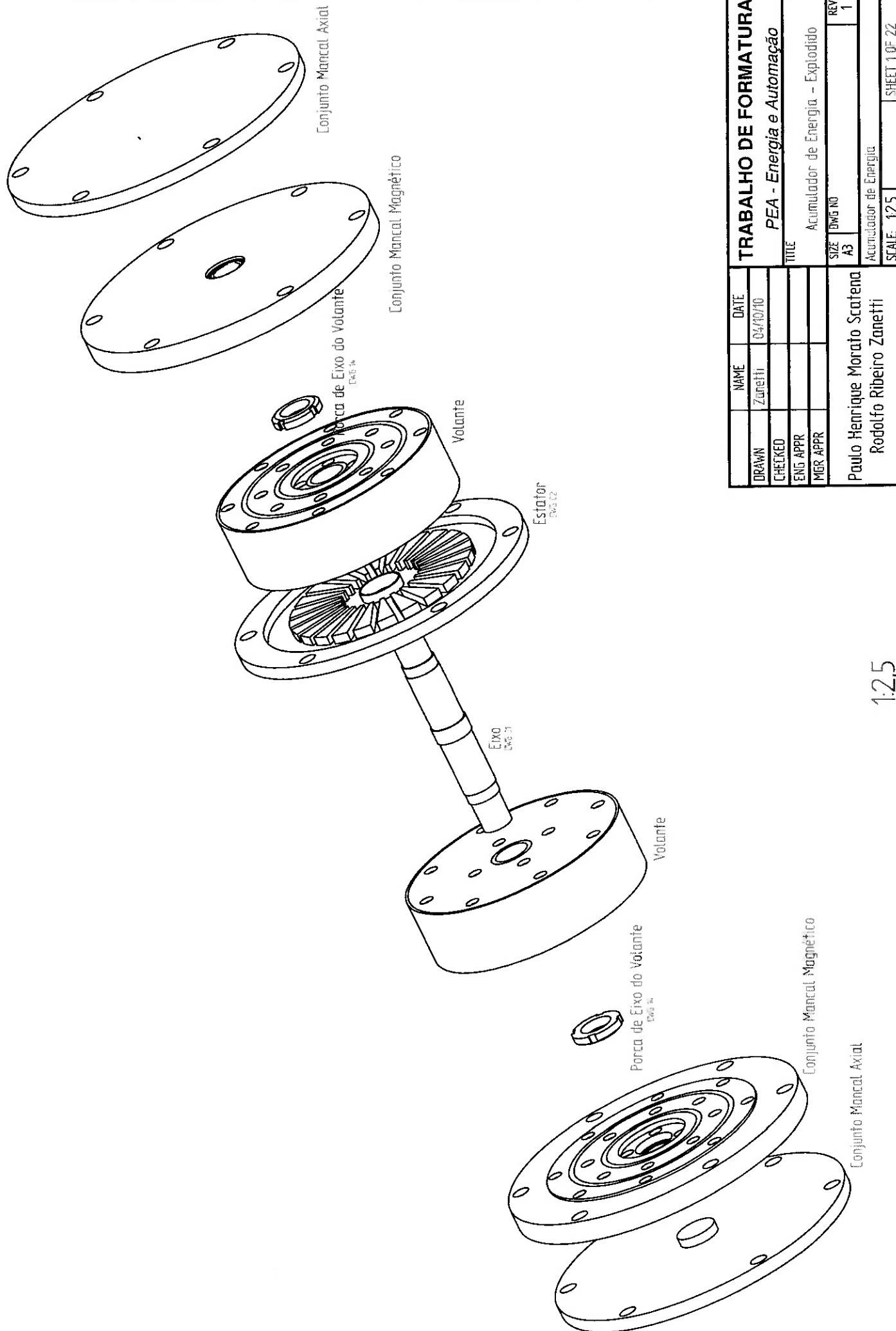
Tampa
Volante



SECTION Q-Q

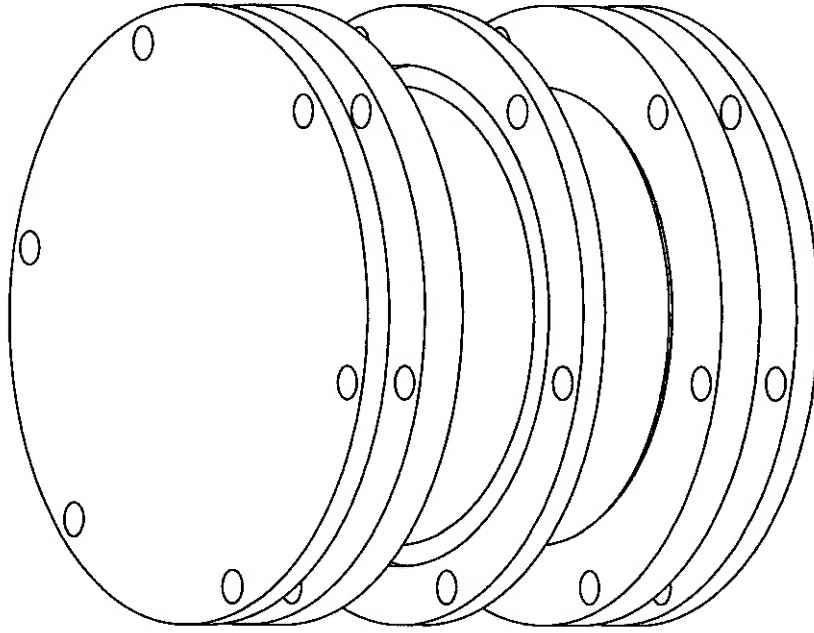
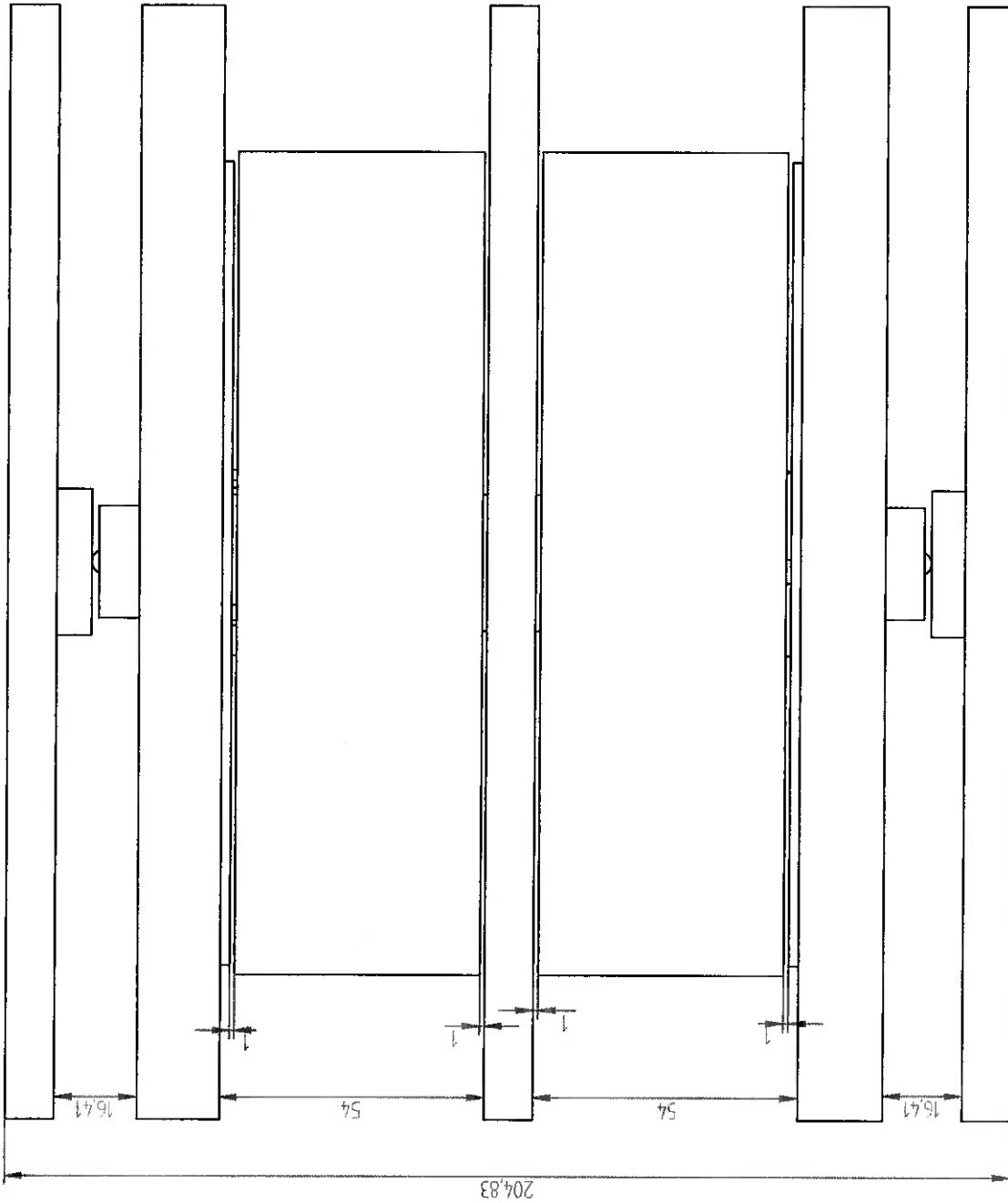
| | |
|---|---------------------------|
| NAME | DATE |
| Zanetti | 09/03/00 |
| TRABALHO DE FORMATURA PEA - Energia e Automação | |
| TITLE | |
| Acumulador de Energia | |
| SIZE | DWG NO |
| A3 | |
| FILE NAME | Acumulador de Energia.dwg |
| SCALE | WEIGHT |
| | SHEET 14-01-16 |
| Rodolfo Ribeiro Zanetti Paulo Henrique Morato Scatena | |

15.9 Desenhos técnicos do segundo projeto



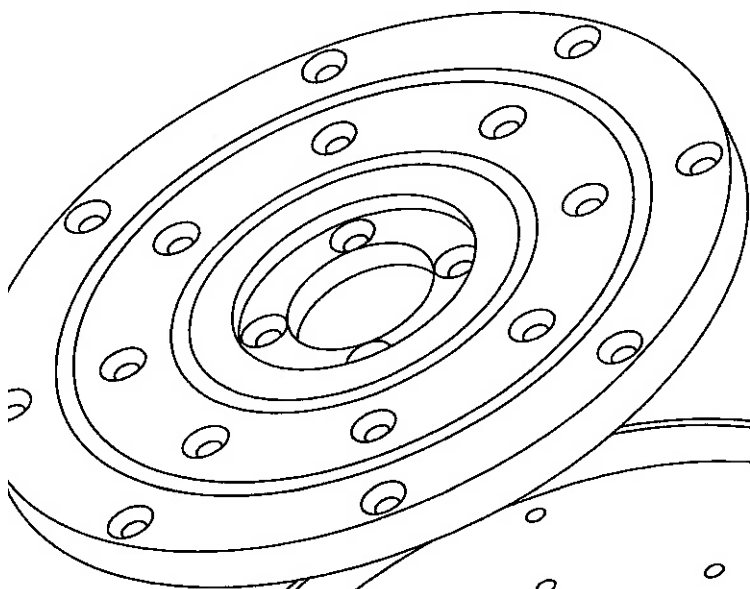
| TRABALHO DE FORMATURA | | NAME | DATE |
|-------------------------|---------|-----------------------------------|----------|
| DRAWN | Zanetti | Zanetti | 04/10/10 |
| CHECKED | | | |
| ENG APPR | | | |
| MGR APPR | | | |
| TITLE | | Acumulador de Energia - Explodido | |
| SIZE | DWG NO | REV | |
| A3 | | 1 | |
| Acumulador de Energia | | Paulo Henrique Morato Scatena | |
| Rodolfo Ribeiro Zanetti | | Rodolfo Ribeiro Zanetti | |
| SCALE | 1:2,5 | SHEET 1 OF 22 | |

1:2,5

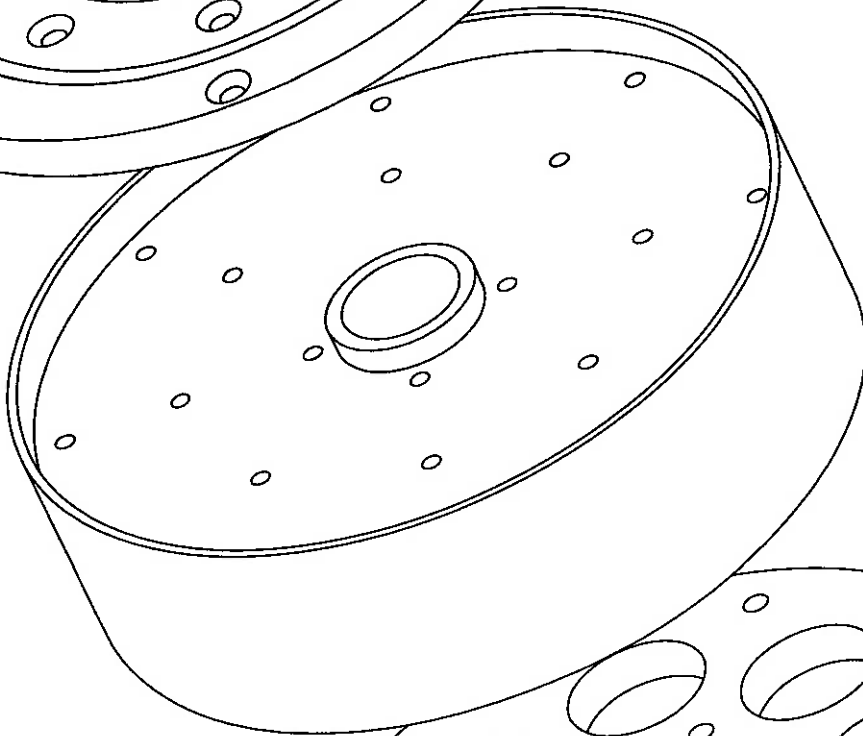


1:2

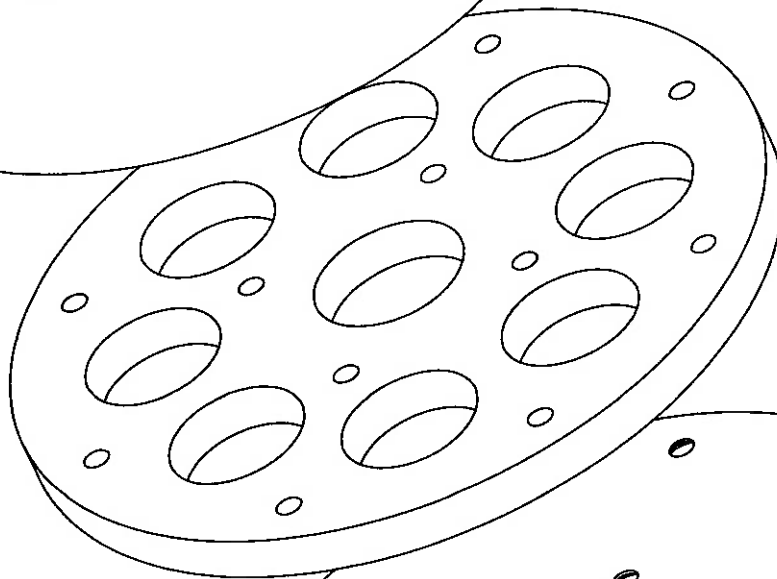
| | | | |
|--|---------|---------------|----------|
| TRABALHO DE FORMATURA | | NAME | DATE |
| DRAWN | Zanetti | Zanetti | 04/10/10 |
| CHECKED | | | |
| ENG APPR | | | |
| MGR APPR | | | |
| TITLE | | SIZE | DWG NO |
| Acumulador de Energia - Montagem | | A3 | |
| Acumulador de Energia | | REV | 1 |
| SCALE: 1:1 | | SHEET 2 OF 22 | |
| Paulo Henrique Morato Scatena Rodolfo Ribeiro Zanetti | | | |



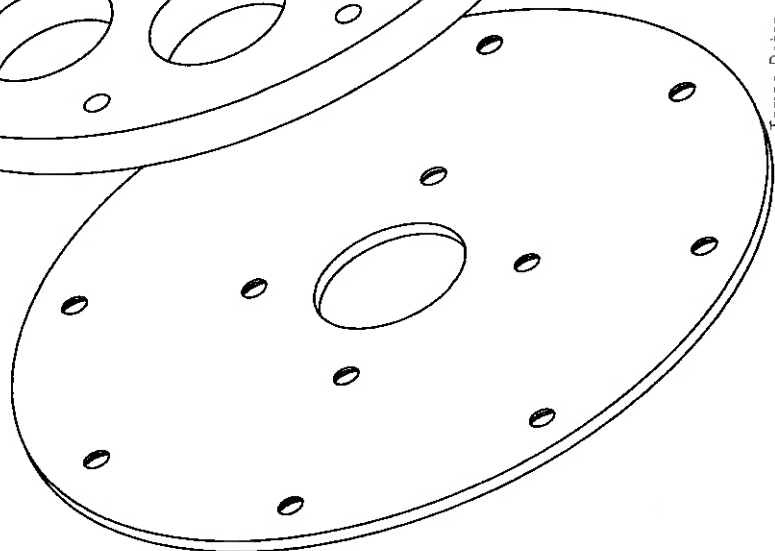
Pacote Mancais Magnético Volante



Massa
DWG 03



Suporte Ímãs Rotor
DWG 04



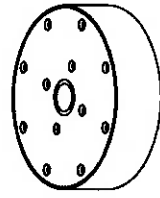
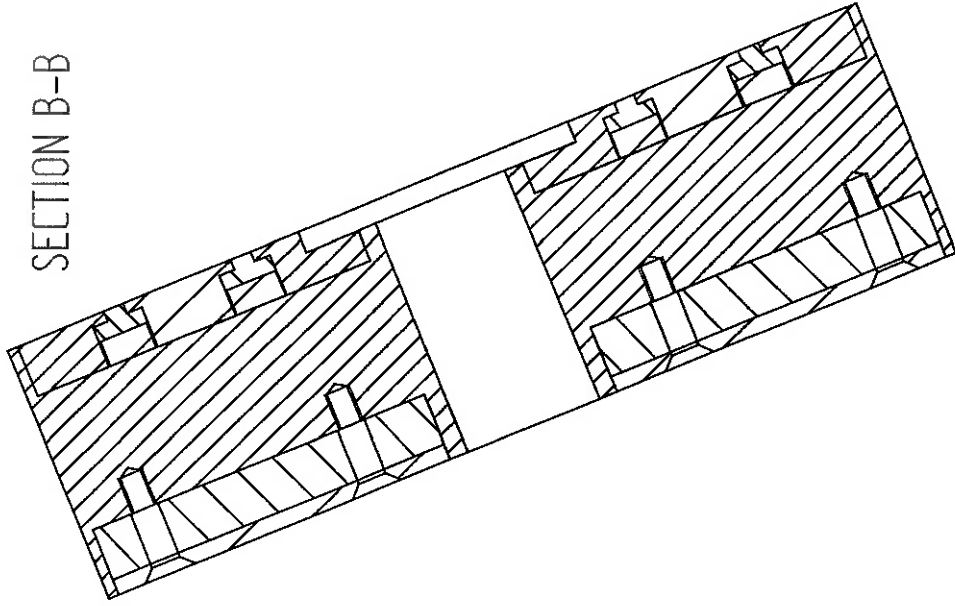
Tampa Rotor
DWG 05

| TRABALHO DE FORMATURA | | NAME | DATE |
|-----------------------|---------|---------------------|----------|
| DRAWN | Zanetti | Zanetti | 04/10/10 |
| CHECKED | | | |
| ENG APPR | | | |
| MGR APPR | | | |
| TITLE | | Volante - Explodido | |
| SIZE | DWG NO | REV | |
| A3 | | 1 | |
| Acumulador de Energia | | | |
| SCALE: | 1:1,11 | SHEET 3 OF 22 | |

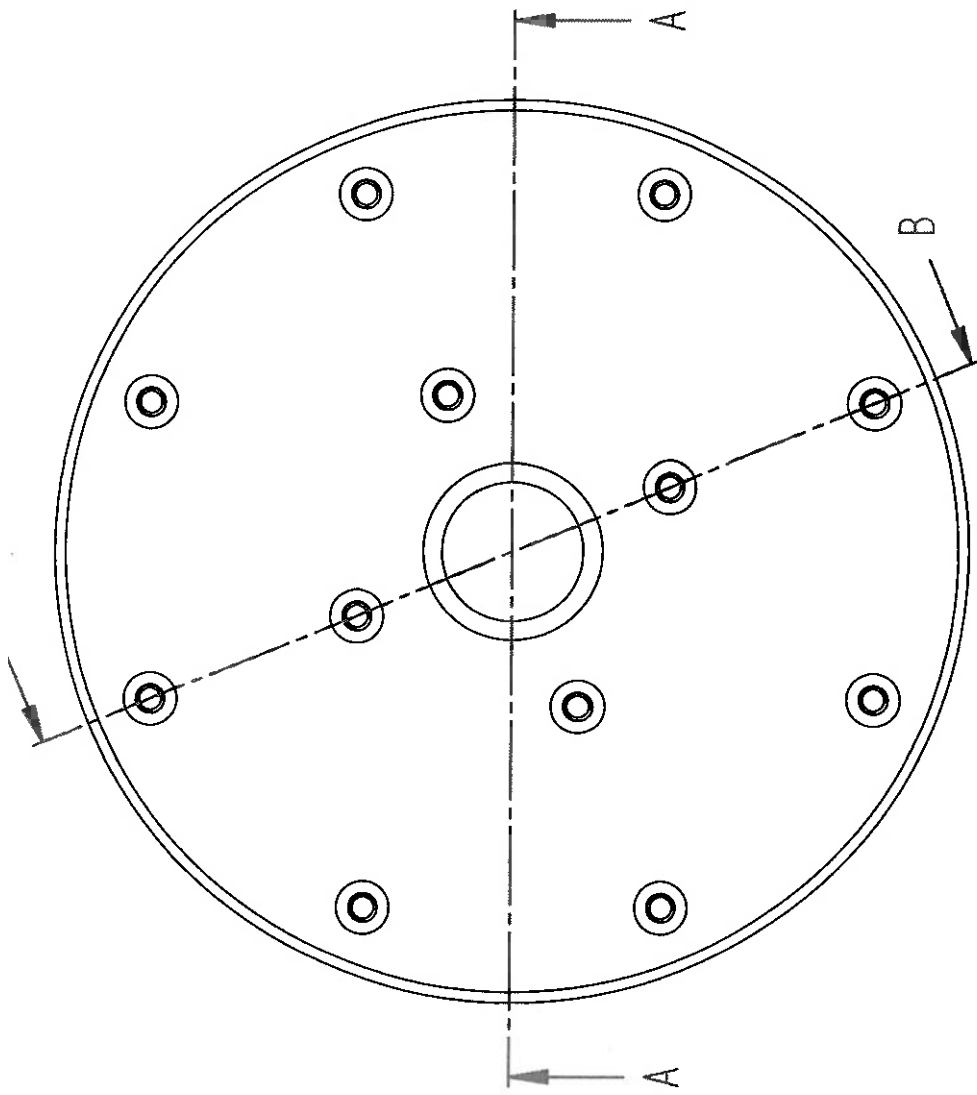
1:1,11

Paulo Henrique Morato Scafena
Rodolfo Ribeiro Zanetti

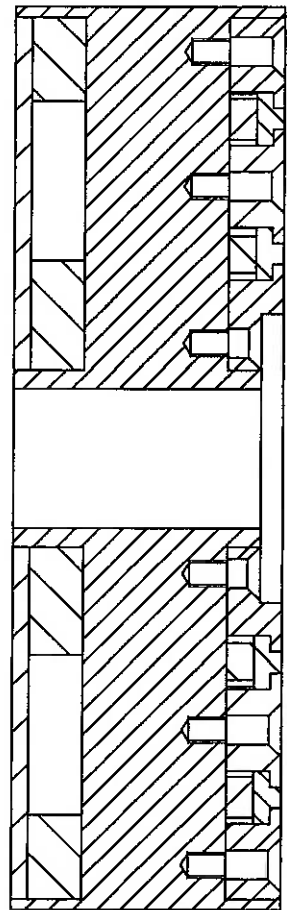
SECTION B-B



1:5



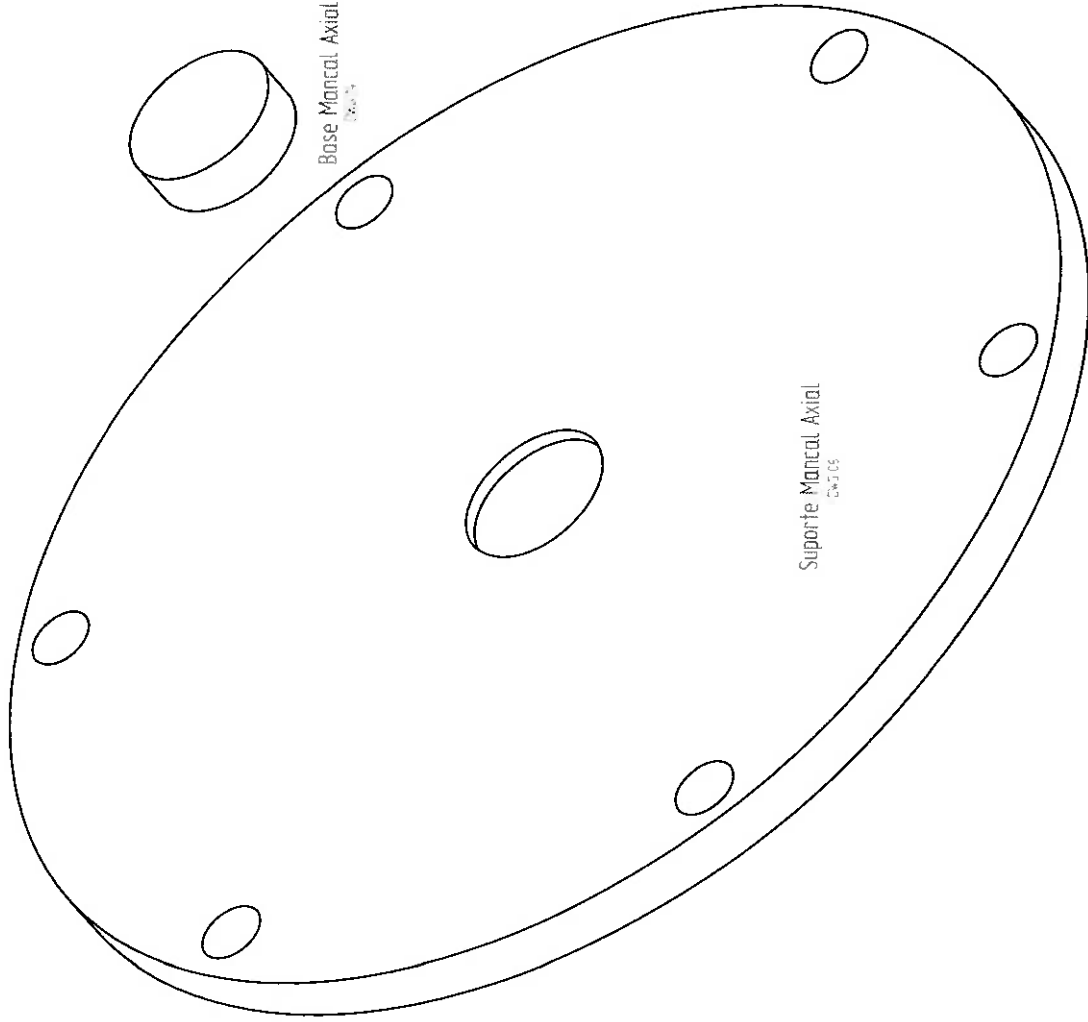
1:1



SECTION A-A

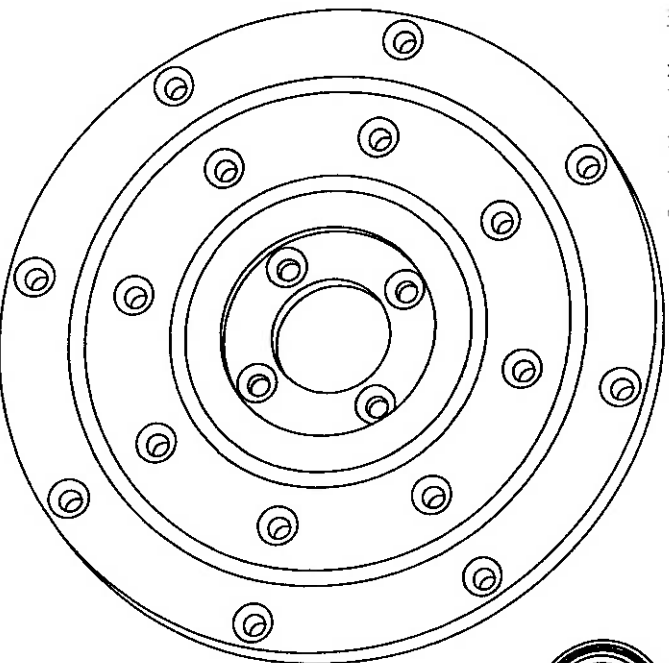
| | | | |
|------------------------------|--------|---------------|----------|
| TRABALHO DE FORMATURA | | NAME | DATE |
| PEA - Energia e Automação | | Zanetti | 04/10/10 |
| TITLE | | | |
| Volante - Montagem | | | |
| SIZE | DWG NO | | REV |
| A3 | | | 1 |
| Acumulador de Energia | | | |
| SCALE | 1:1 | SHEET 4 OF 22 | |

Paulo Henrique Morato Scatena
Rodolfo Ribeiro Zanetti

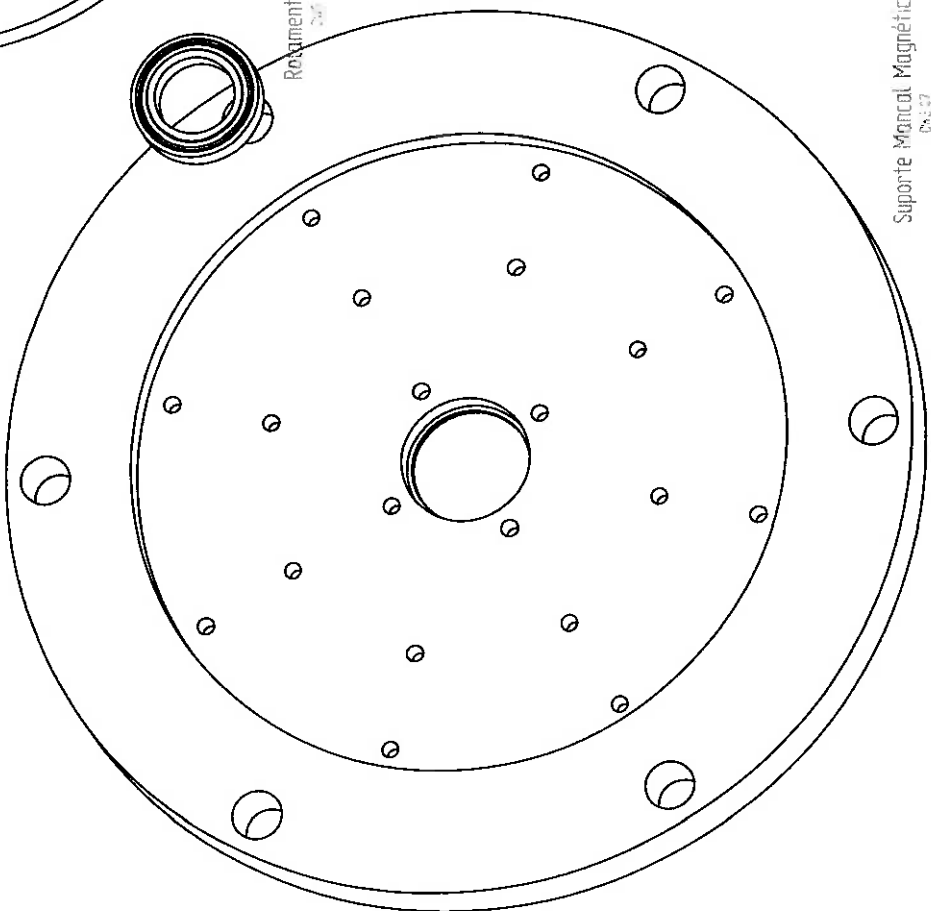


1:1

| | |
|-------------------------------|----------|
| TRABALHO DE FORMATURA | |
| PEA - Energia e Automação | |
| TITLE | |
| Conjunto Mancal Axial | |
| SIZE | DWG NO |
| A3 | 1 |
| Acumulation de Energia | |
| SCALE | 1:1 |
| SHEET 5 OF 22 | |
| NAME | DATE |
| Zanetti | 04/10/10 |
| CHECKED | |
| ENG APPR | |
| MGR APPR | |
| Paulo Henrique Morato Scatena | |
| Rodolfo Ribeiro Zanetti | |



Pacote Mancais Magnético Suporte



Revestimento Backup
2x1.4

Suporte Mancais Magnético
0x3.37

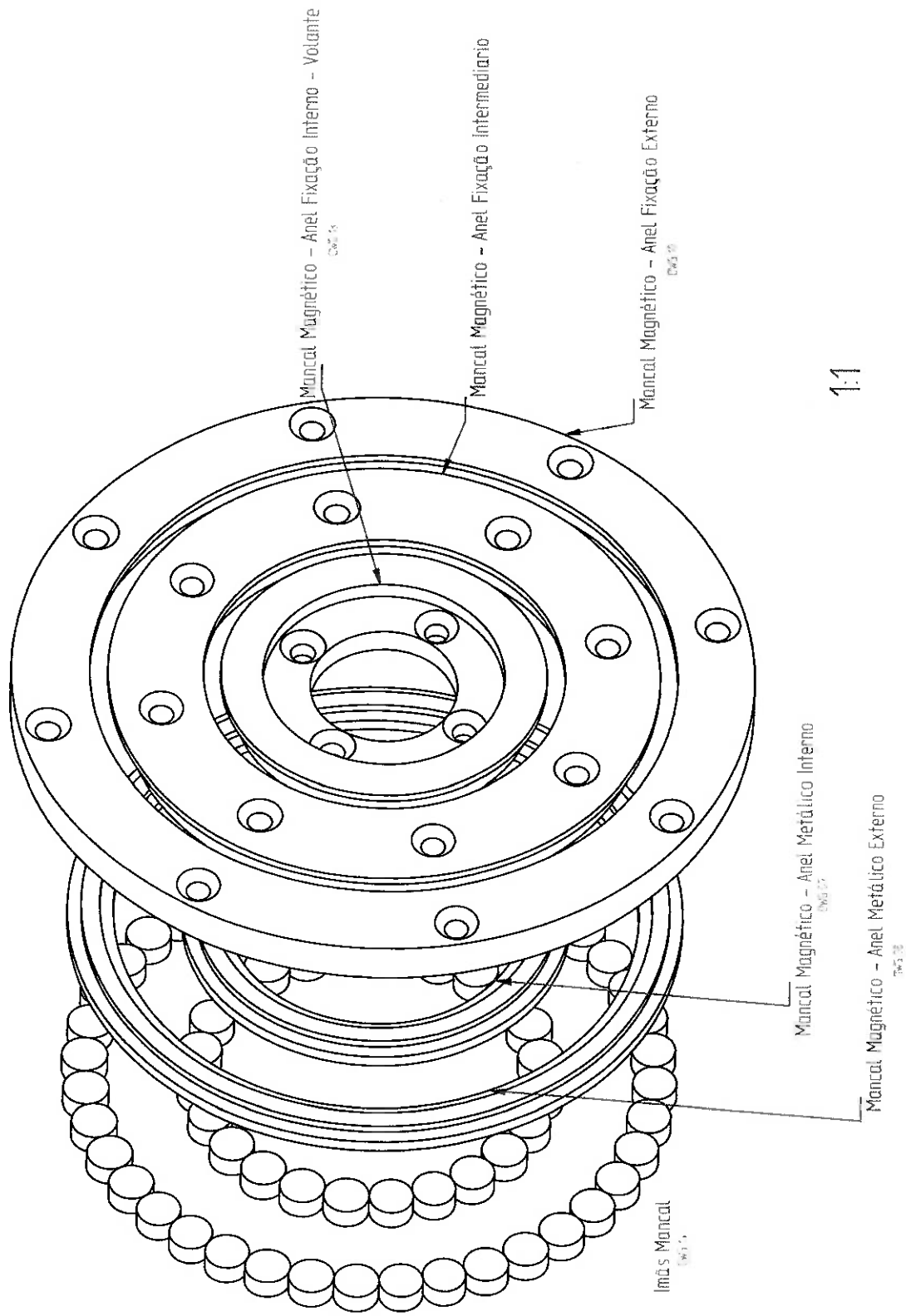
1:1,33

| DRAWN | | NAME | DATE |
|----------------------------|--------|---------------|----------|
| Zanetti | | Zanetti | 04/10/10 |
| CHECKED | | | |
| ENG APPR | | | |
| MGR APPR | | | |
| TITLE | | | |
| Conjunto Mancais Magnético | | | |
| SIZE | DWG NO | REV | |
| A3 | | 1 | |
| Acumulador de Energia | | | |
| SCALE: 1:1,33 | | SHEET 6 OF 22 | |

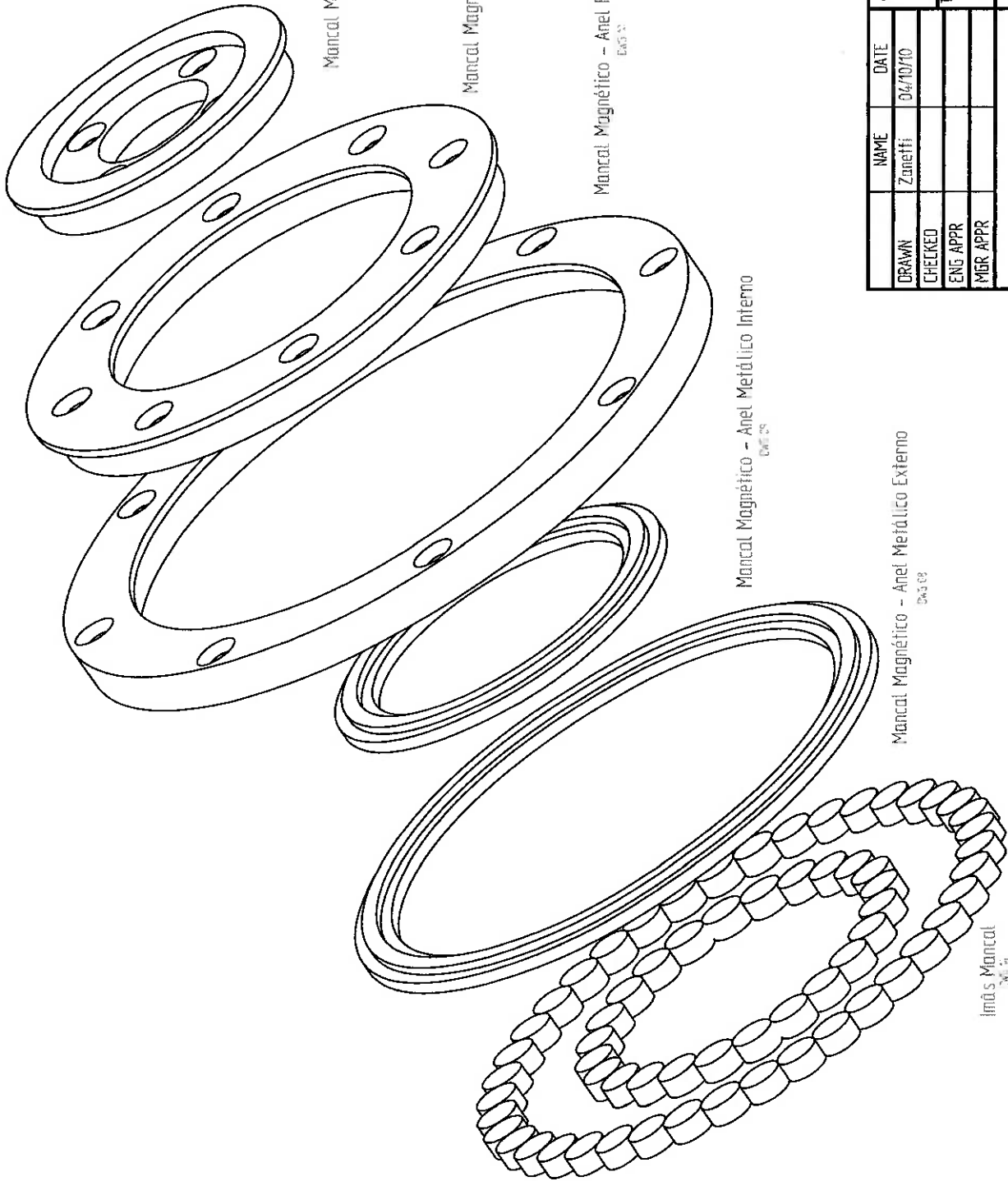
TRABALHO DE FORMATURA

PEA - Energia e Automação

Paulo Henrique Morato Scatena
Rodolfo Ribeiro Zanetti



| | | | |
|--|---------|----------------------------------|--------|
| TRABALHO DE FORMATURA | | NAME | DATE |
| DRAWN | Zanetti | 04/10/10 | |
| CHECKED | | | |
| ENG. APPR | | | |
| MGR. APPR | | | |
| Paulo Henrique Morato Scatena Rodolfo Ribeiro Zanetti | | TITLE | |
| Acumulador de Energia | | SIZE | DWG NO |
| | | A3 | RES |
| | | | 1 |
| | | Pacote Mancais Magnético Volante | |
| | | SCALE | 1:1 |
| | | SHEET 7 OF 22 | |



Mancal Magnético - Anel Fixação Interno - Suporte
Fig. 2

Mancal Magnético - Anel Fixação Intermediário
Fig. 3

Mancal Magnético - Anel Fixação Externo
Fig. 5

Mancal Magnético - Anel Metálico Interno
Fig. 2

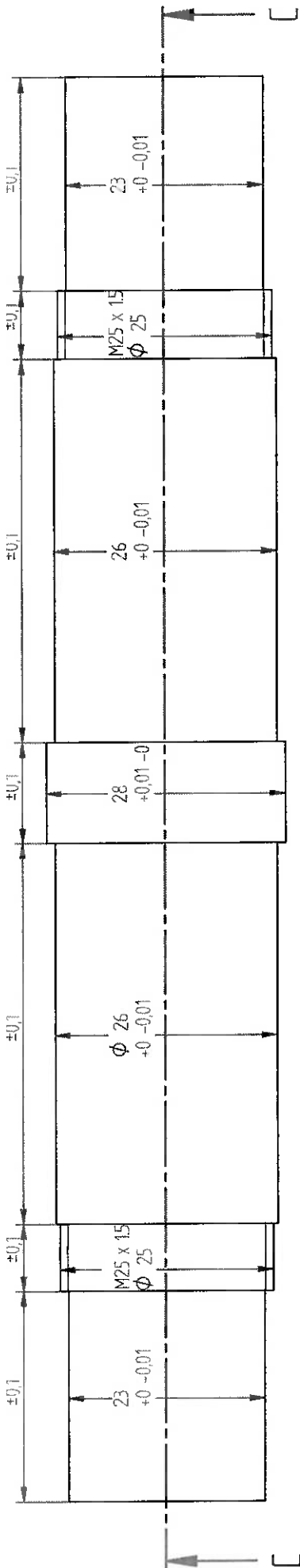
Mancal Magnético - Anel Metálico Externo
Fig. 5

Ímãs Mancal
Fig. 4

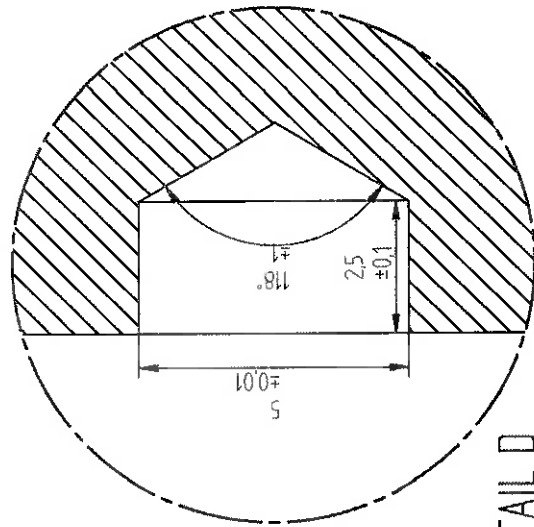
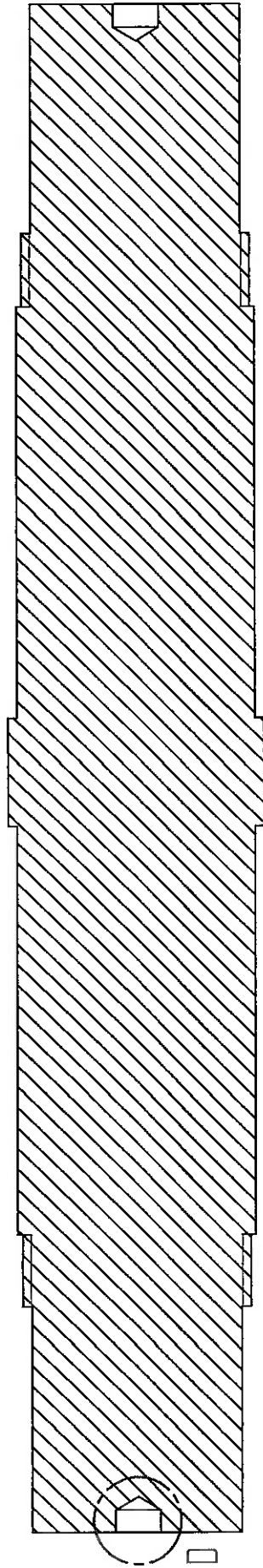
1:1

| TRABALHO DE FORMATURA | |
|---------------------------------|--------|
| PEA - Energia e Automação | |
| TITLE | |
| Pacote Mancal Magnético Suporte | |
| SIZE | DWG NO |
| A3 | |
| REV | 1 |
| Acumulador de Energia | |
| SCALE | 1:1 |
| SHEET 8 OF 22 | |

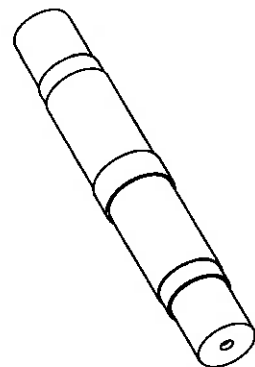
Paulo Henrique Morato Scatena
Rodolfo Ribeiro Zanetti



2:1

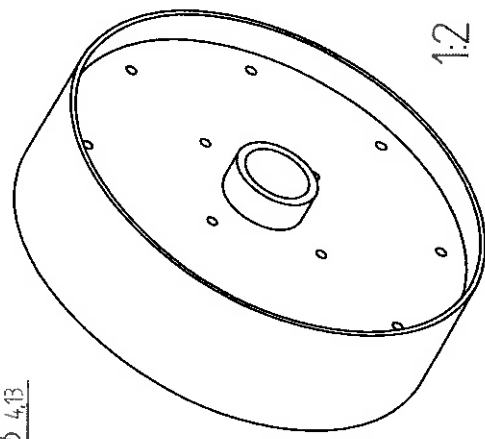
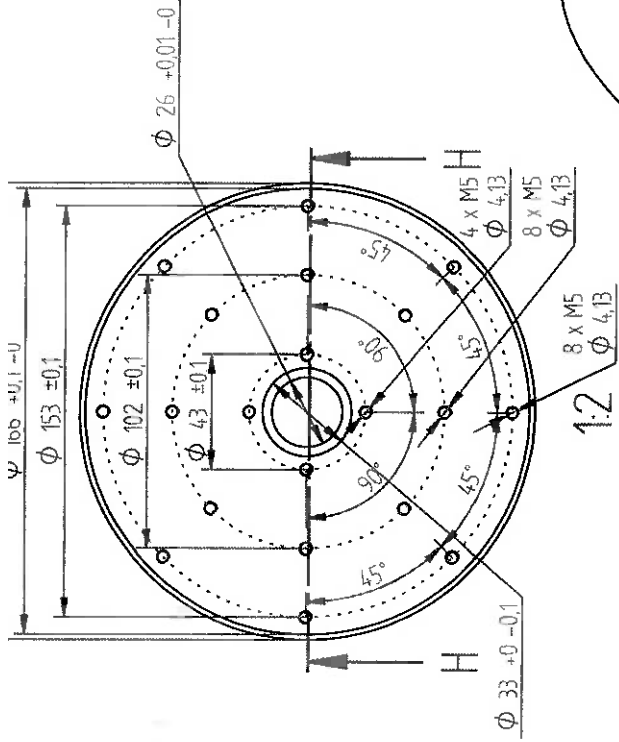


10:1

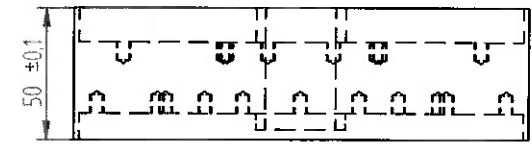


Quantidade 1 Peça
Propriedade Magnética do Material Indiferente

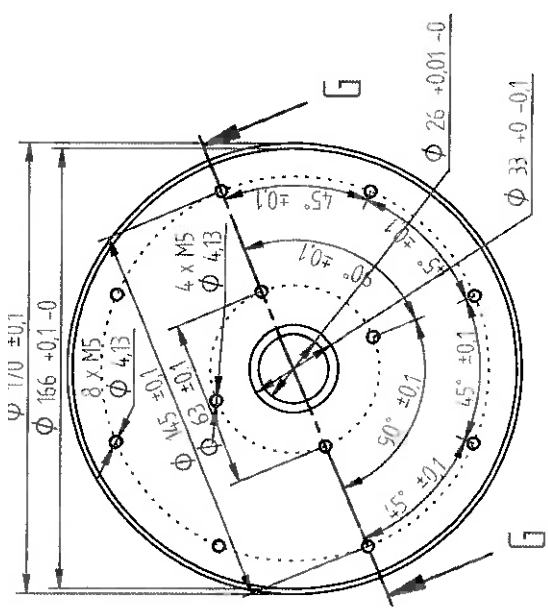
| TRABALHO DE FORMATURA | | EIXO | |
|-------------------------------|----------|-----------------------|--------|
| NAME | DATE | SIZE | DWG NO |
| Zanetti | 04/10/10 | A3 | 01 |
| CHECKED | | REV | 1 |
| ENG APPR | | Acumulador de Energia | |
| MGR APPR | | SCALE | 2:1 |
| Paulo Henrique Morato Scatena | | SHEET 9 OF 22 | |
| Rodolfo Ribeiro Zanetti | | | |



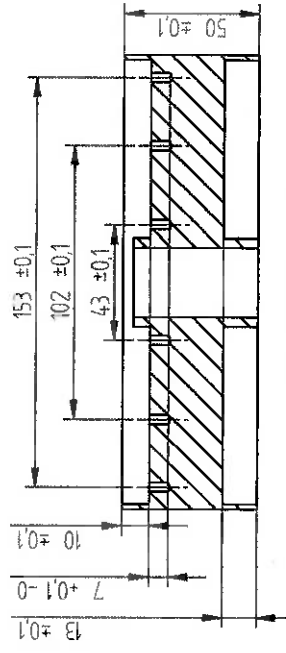
1:2



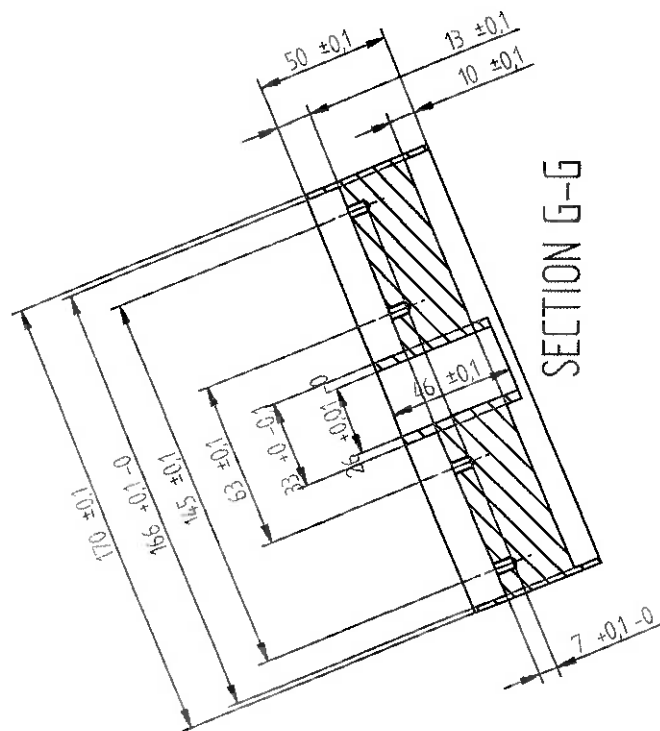
1:2



1:2



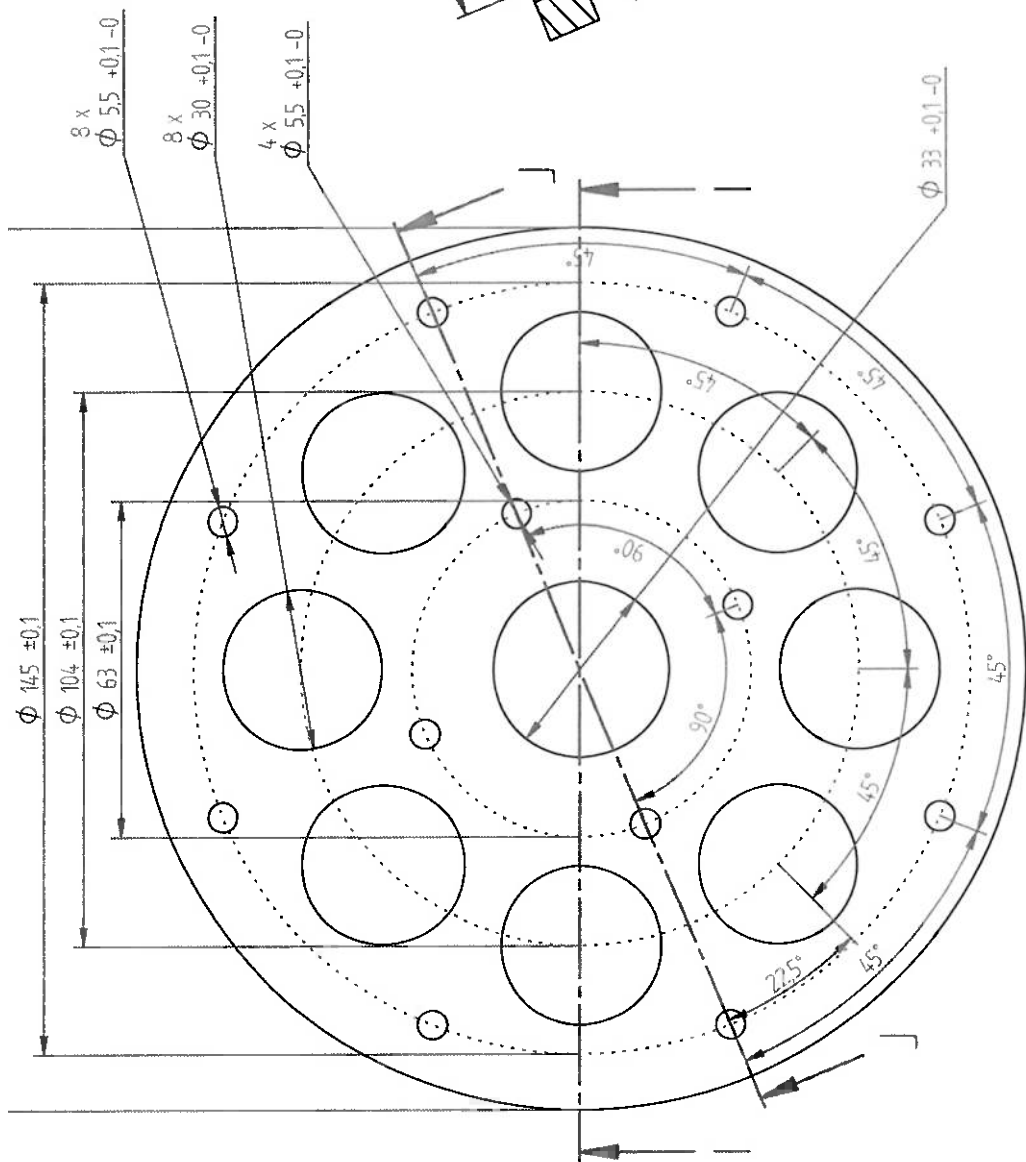
SECTION H-H



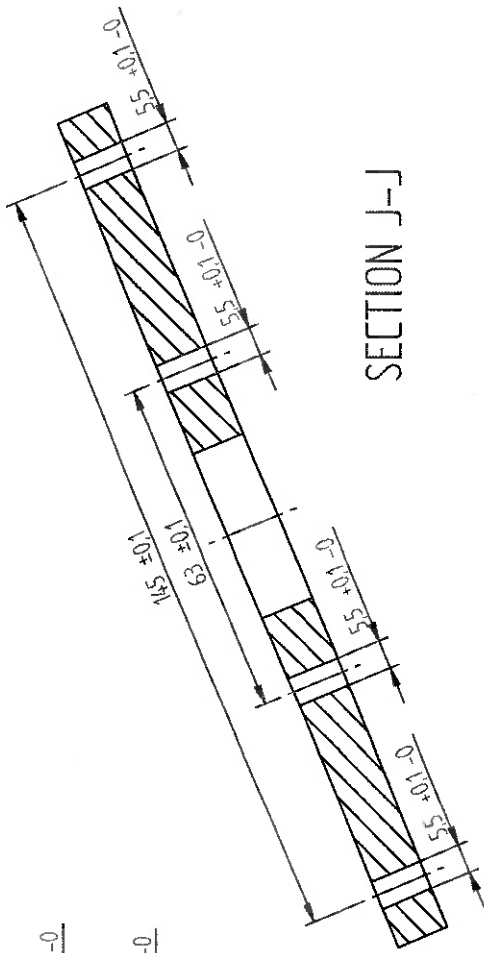
SECTION G-G

Quantidade: 2 Peças
Propriedade Magnética do Material: Magnético

| | |
|--|----------|
| TRABALHO DE FORMATURA | |
| PEA - Energia e Automação | |
| TÍTULO | |
| NAME | DATE |
| DRAWN Zanetti | 04/10/10 |
| CHECKED | |
| ENG APPR | |
| MGR APPR | |
| Paulo Henrique Morato Scatena Rodolfo Ribeiro Zanetti | |
| SIZE | DMG NO |
| A3 | 03 |
| Acumulador de Energia | |
| SEAL | REV |
| 12 | 1 |
| SHEET 11 OF 22 | |

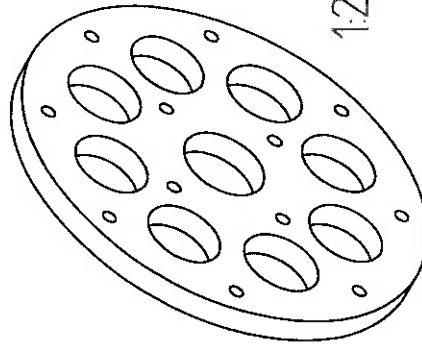


1:1



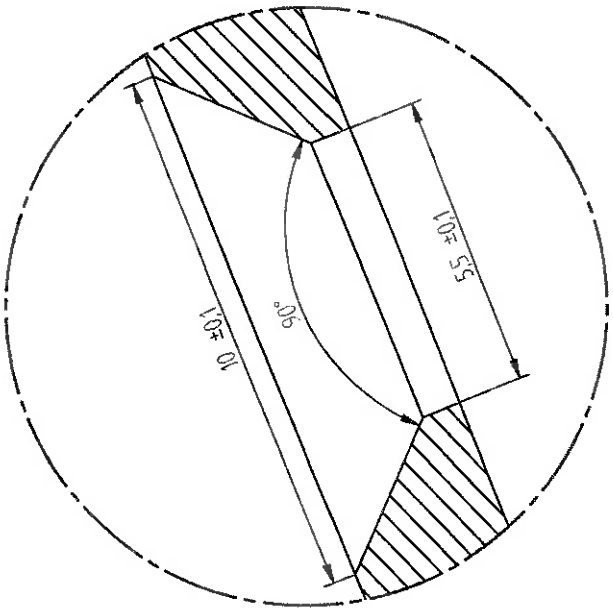
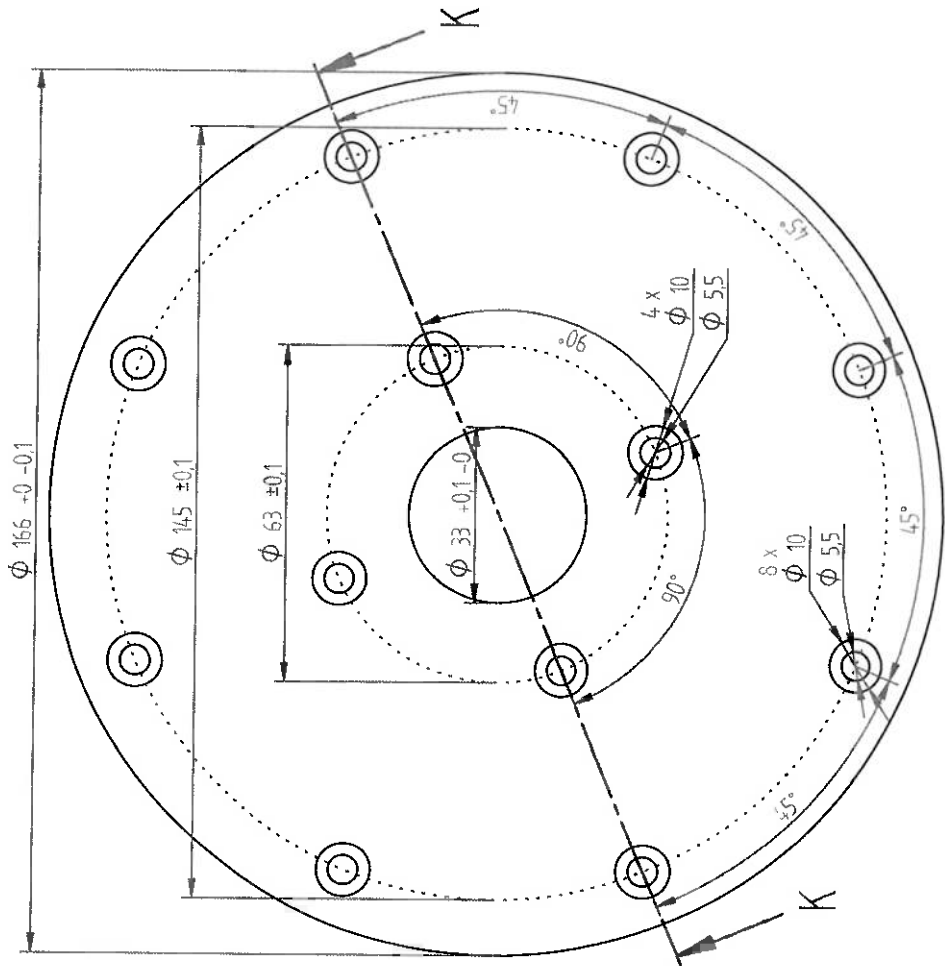
SECTION J-J

1:2

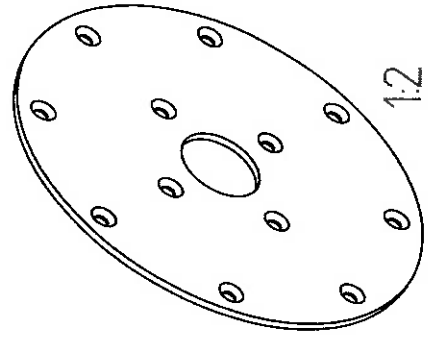


Quantidade 2 Peças
Propriedade Magnética do Material Não Magnético

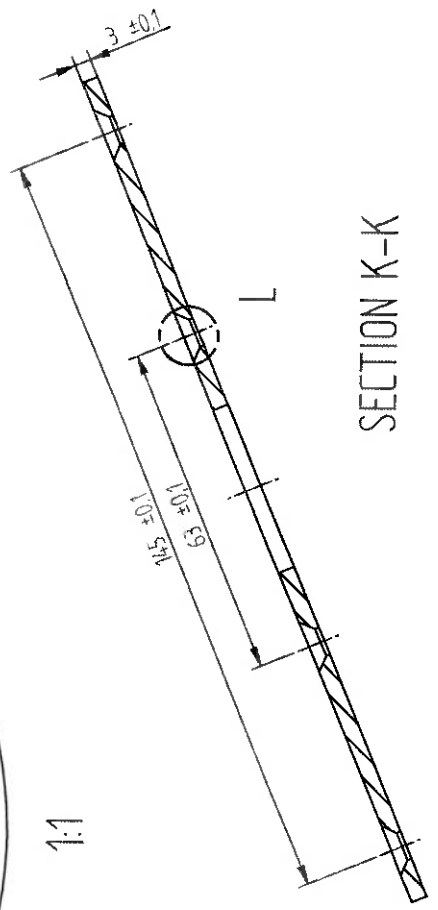
| TRABALHO DE FORMATURA | |
|-------------------------------|----------|
| NAME | DATE |
| Zanetti | 04/10/10 |
| CHECKED | |
| ENG APPR | |
| MGR APPR | |
| TITLE | |
| Suporte Imã's Rotor | |
| SIZE | DMG NO |
| A3 | 04 |
| REV | REV |
| 1 | 1 |
| Paulo Henrique Morato Scatena | |
| Rodolfo Ribeiro Zanetti | |
| Acumulador de Energia | |
| SCALE | SHEET |
| 1:1 | 12 OF 22 |



DETAIL L
10:1



1:2

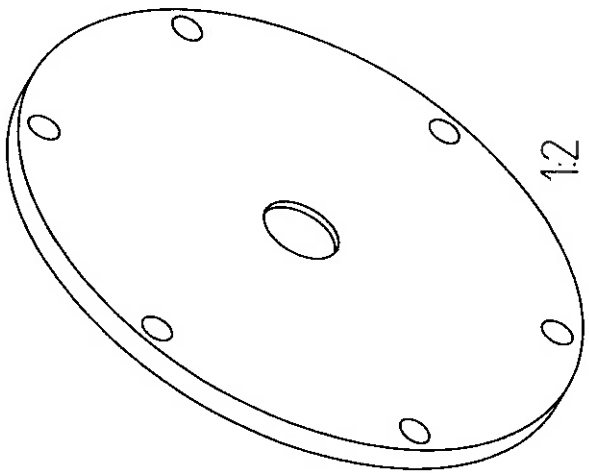
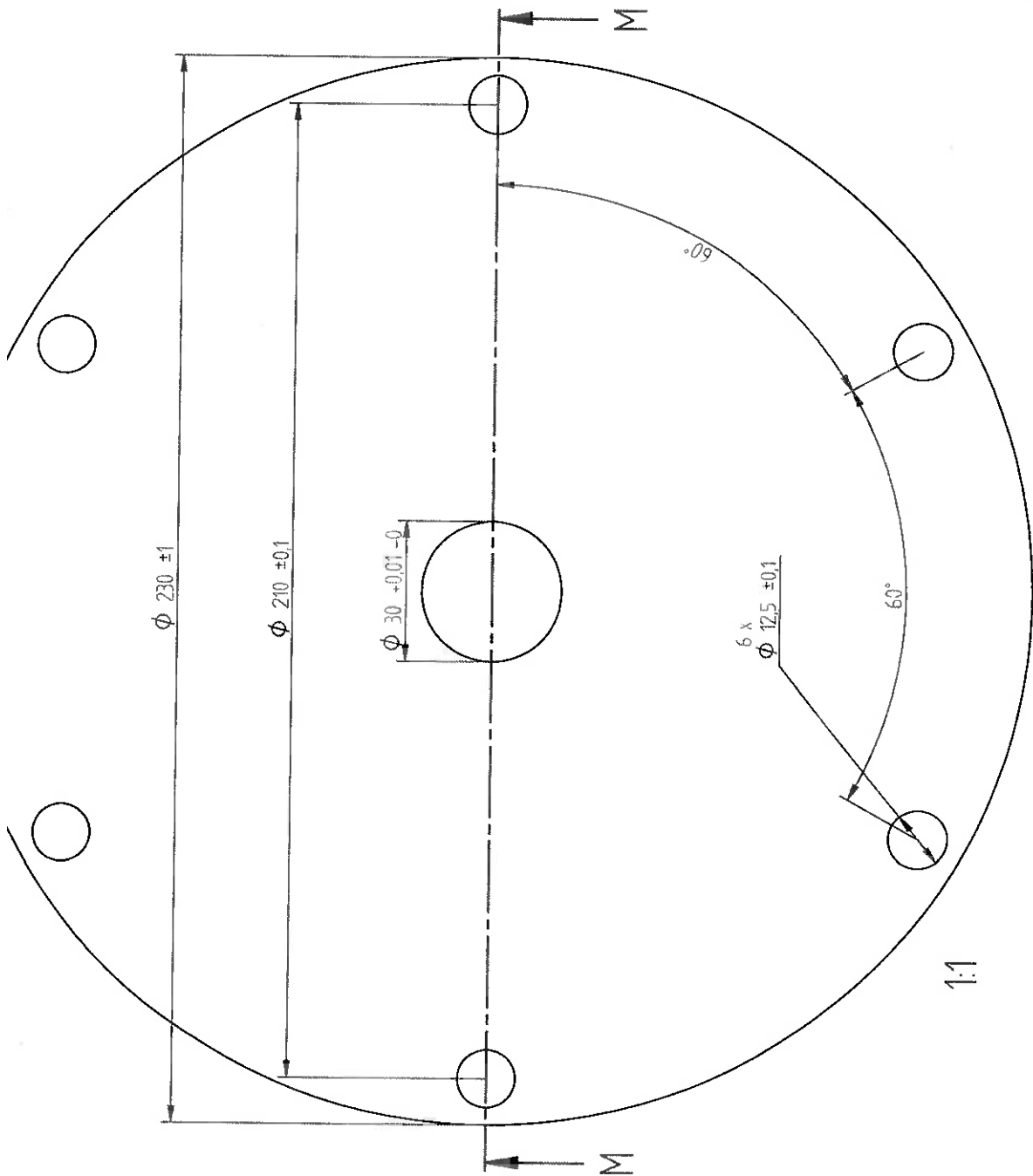


SECTION K-K

1:1

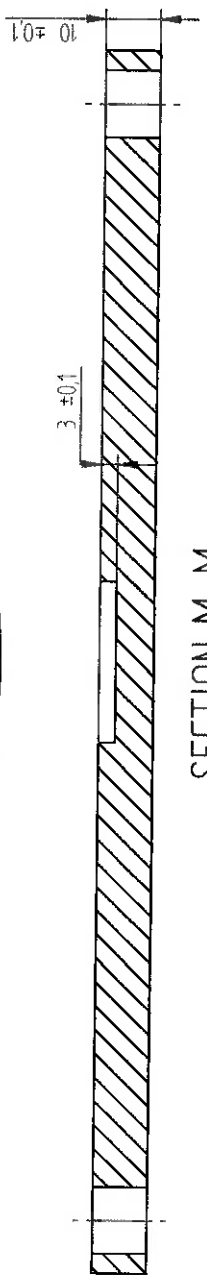
Quantidade 2 Peças
Propriedade Magnética do Material. Não Magnético

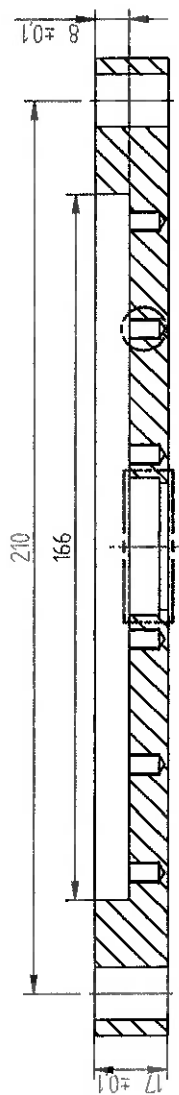
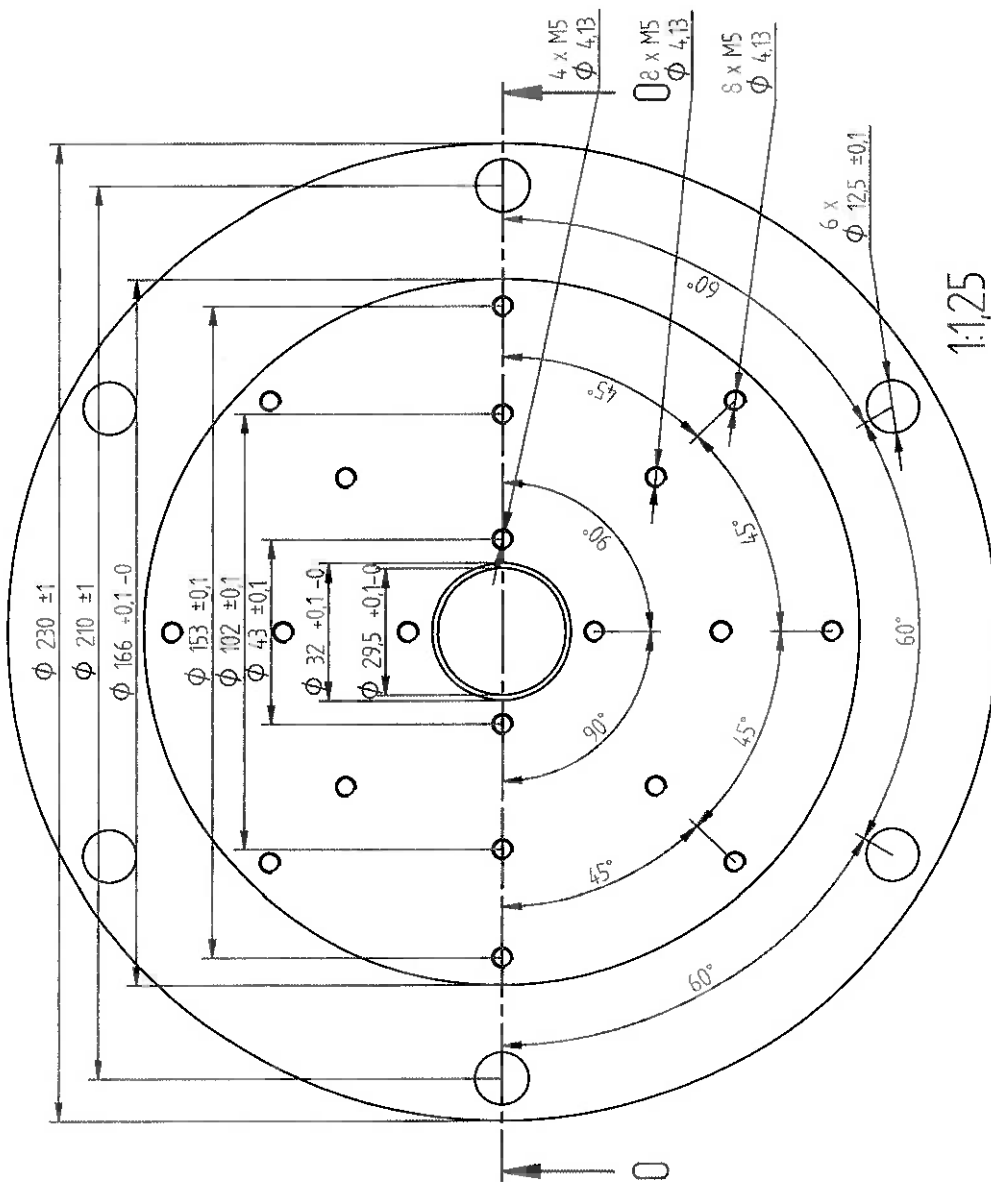
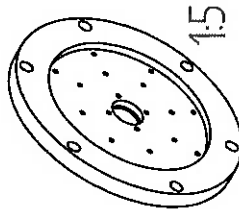
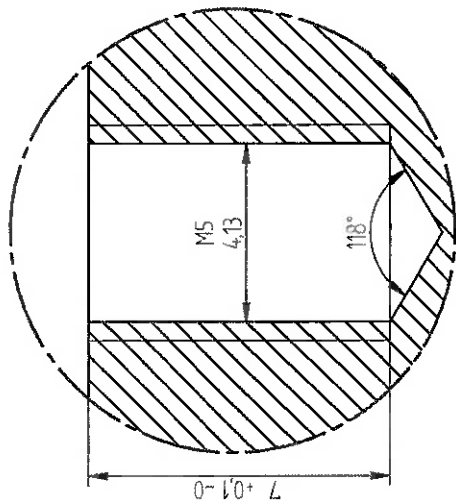
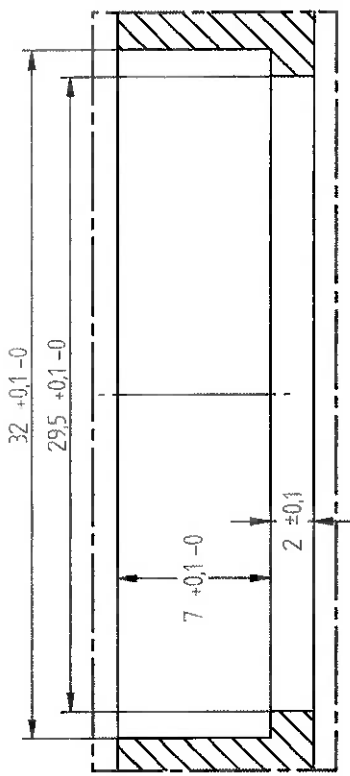
| TRABALHO DE FORMATURA | | Tampa Rotor | |
|-------------------------------|--------|----------------|--|
| PEA - Energia e Automação | | | |
| TITLE | | | |
| SIZE | DWG NO | REV | |
| A3 | 05 | 1 | |
| Acumulador de Energia | | | |
| SCALE | 1:1 | SHEET 13 OF 22 | |
| NAME | | DATE | |
| Zanetti | | 04/07/10 | |
| DRAWN | | | |
| CHECKED | | | |
| ENG APPR | | | |
| MGR APPR | | | |
| Paulo Henrique Morato Scatena | | | |
| Rodolfo Ribeiro Zanetti | | | |



Quantidade 2 Peças
 Propriedade Magnética do Material Indiferente

| DRAWN | | NAME | DATE |
|---|--------|----------------------|----------|
| Zanetti | | Zanetti | 04/10/10 |
| CHECKED | | | |
| ENG APPR | | | |
| MGR APPR | | | |
| Paulo Henrique Morato Scartena Rodolfo Ribeiro Zanetti | | | |
| TITLE | | Suporte Mancal Axial | |
| SIZE | DWG NO | REV | |
| A3 | | 06 | 1 |
| Acumulador de Energia | | | |
| SCALE | 1:1 | SHEET 14 OF 22 | |





P Q

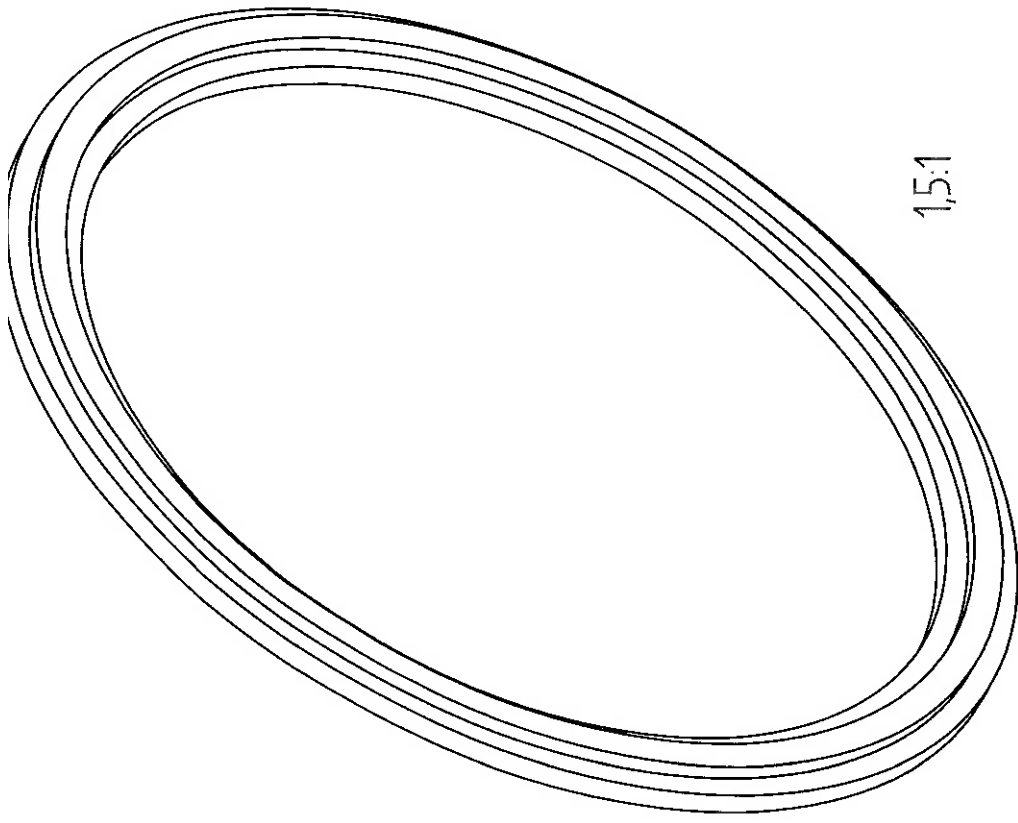
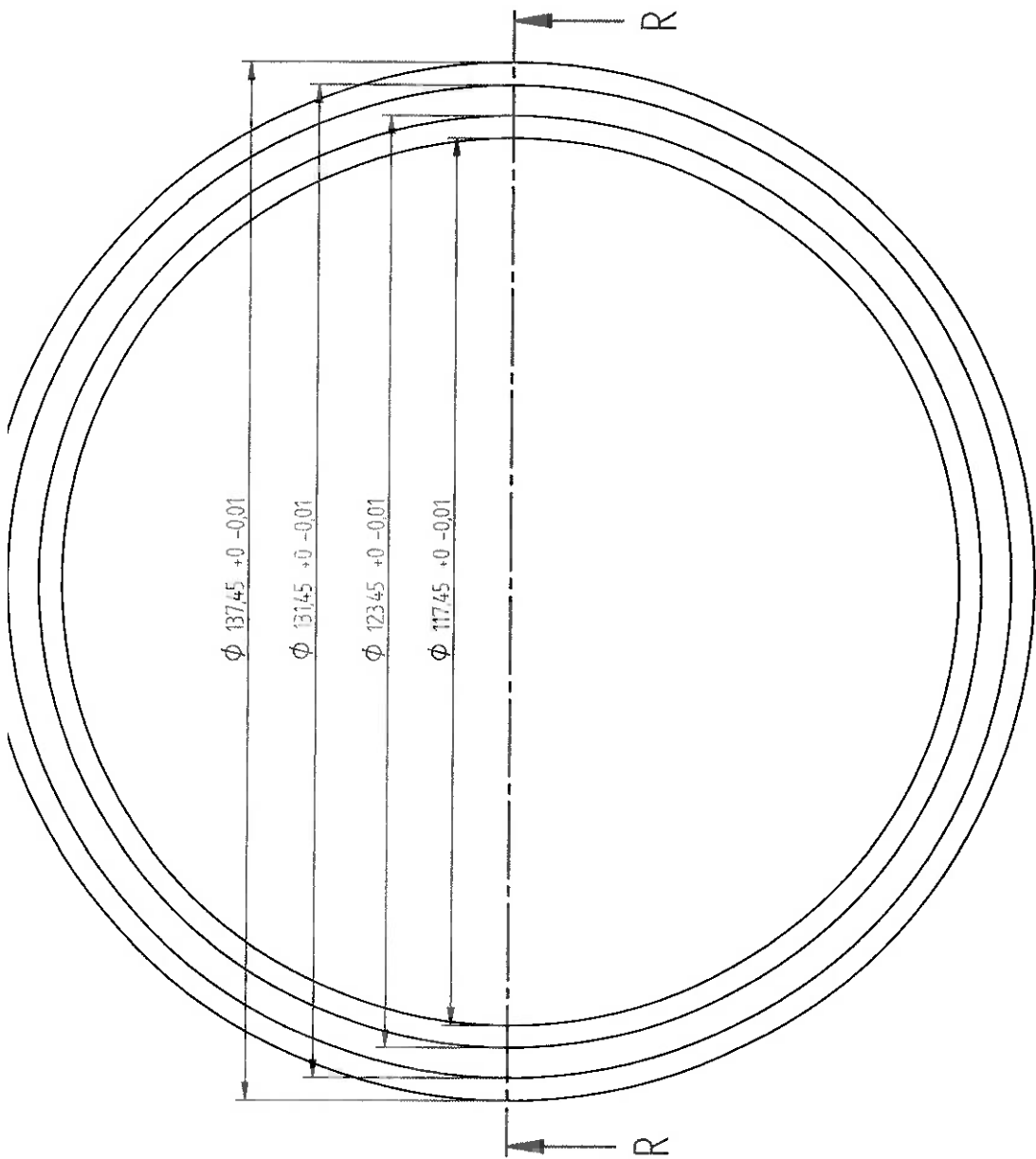
Quantidade 2 Peças
Propriedade Magnética do Material Magnético

| TRABALHO DE FORMATURA | |
|---------------------------|-----|
| PEA - Energia e Automação | |
| TITLE | |
| SIZE | REV |
| A3 | 07 |
| Acumulador de Energia | |
| SCALE: 1:125 | |
| SHEET 15 OF 22 | |

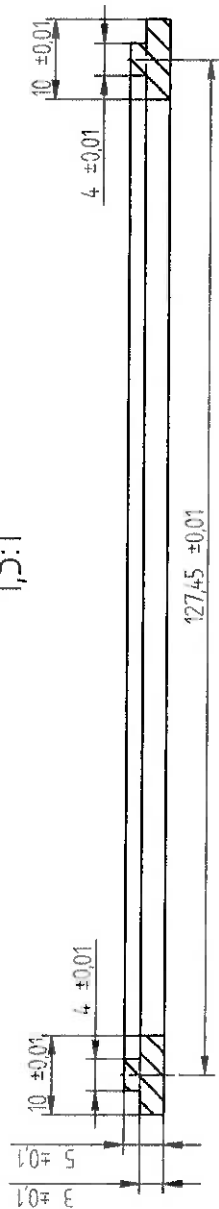
Paulo Henrique Morato Scatena
Rodolfo Ribeiro Zanetti

SupORTE Manual Magnético

| NAME | DATE |
|----------|----------|
| Zanetti | 04/10/10 |
| CHECKED | |
| ENG APPR | |
| MGR APPR | |



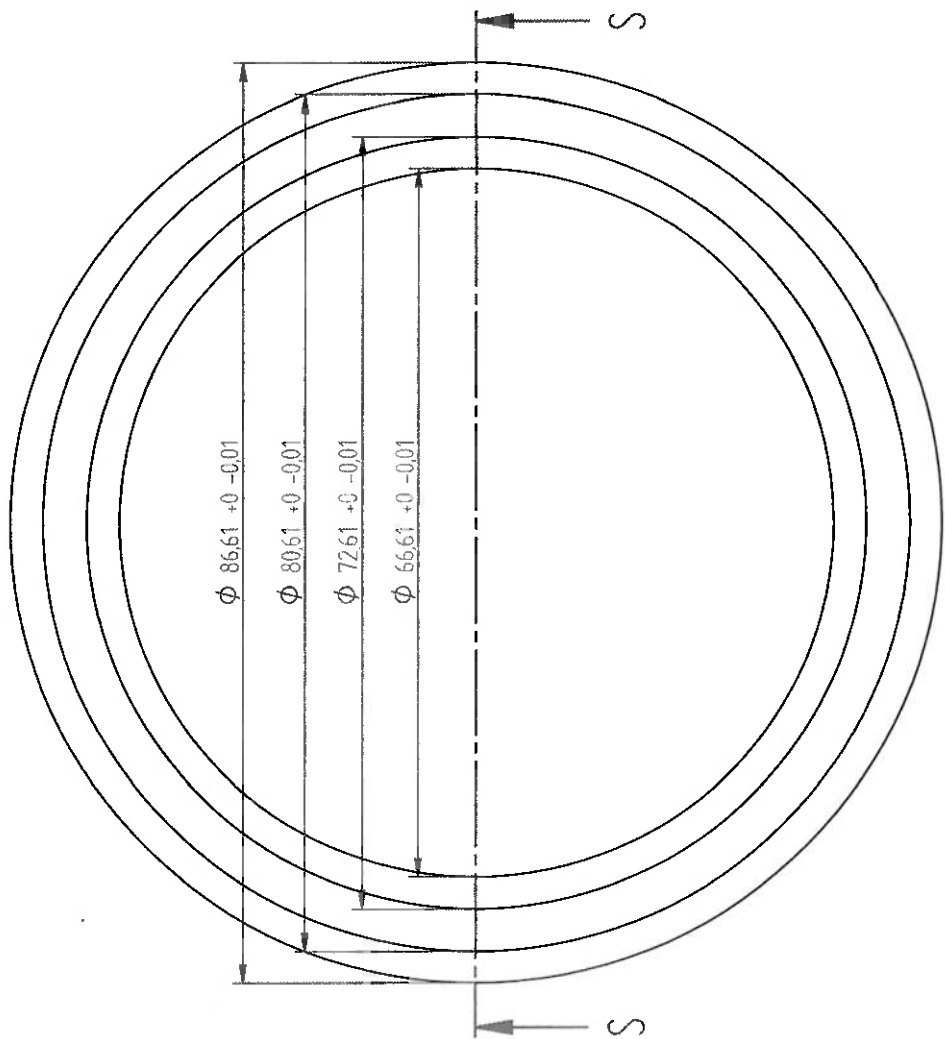
1,5:1



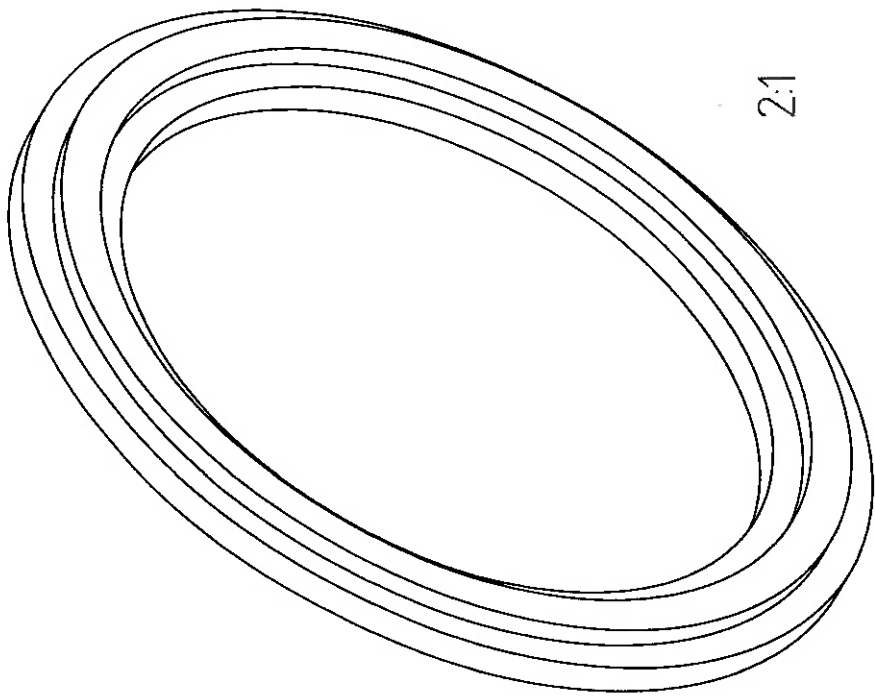
SECTION R-R

Quantidade: 4 Peças
Propriedade Magnética do Material: Magnético

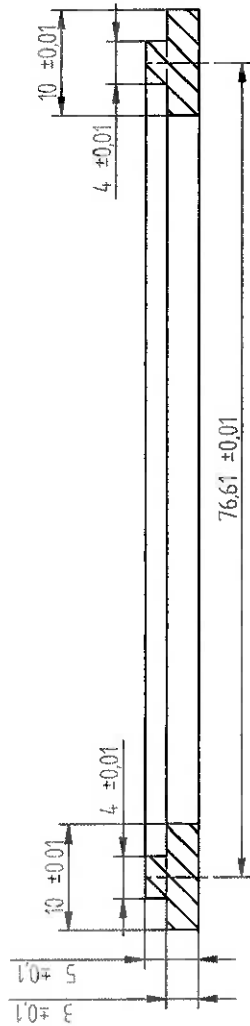
| | | |
|---|---------|----------|
| DRAWN | NAME | DATE |
| CHECKED | Zanetti | 04/10/10 |
| ENG APPR | | |
| MGR APPR | | |
| TRABALHO DE FORMATURA PEA - Energia e Automação TÍTULO Manca: Magnético - Anel Metálico Externo SIZE DWG NO 08 REV 1 A3 Acumulador de Energia SCALE: 1,5:1 SHEET 16 DE 22 | | |
| Paulo Henrique Morato Scatena Rodolfo Ribeiro Zanetti | | |



2:1



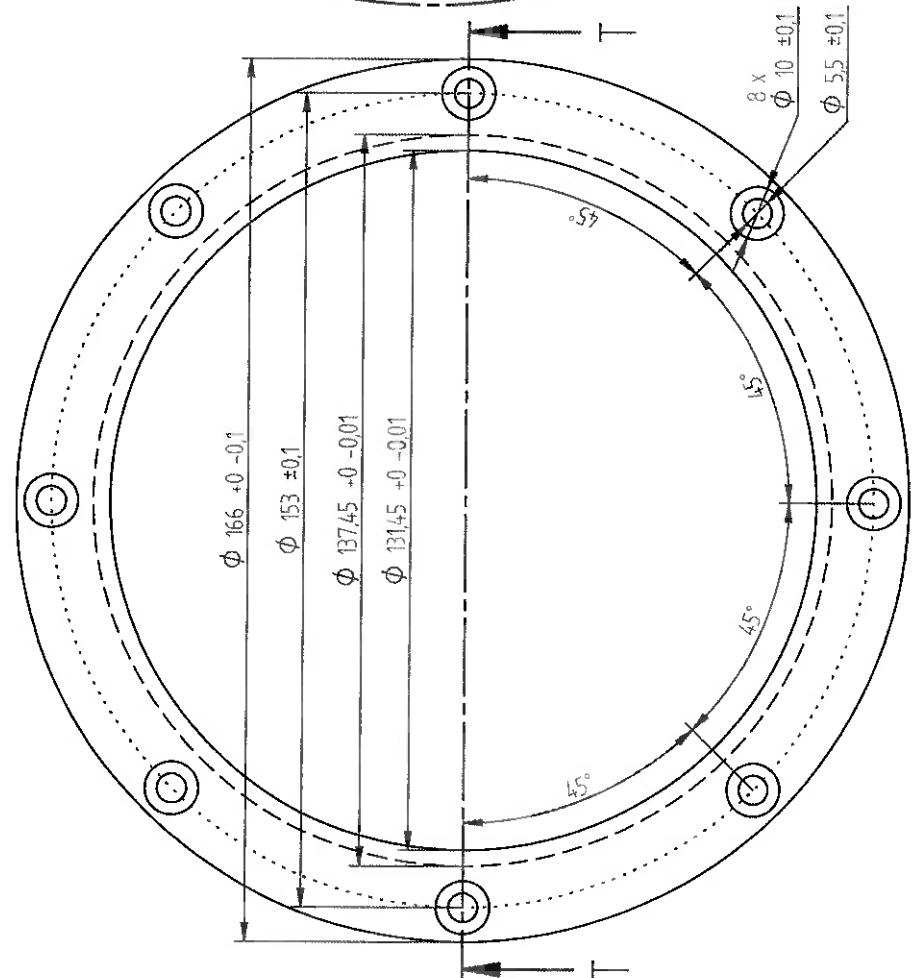
2:1



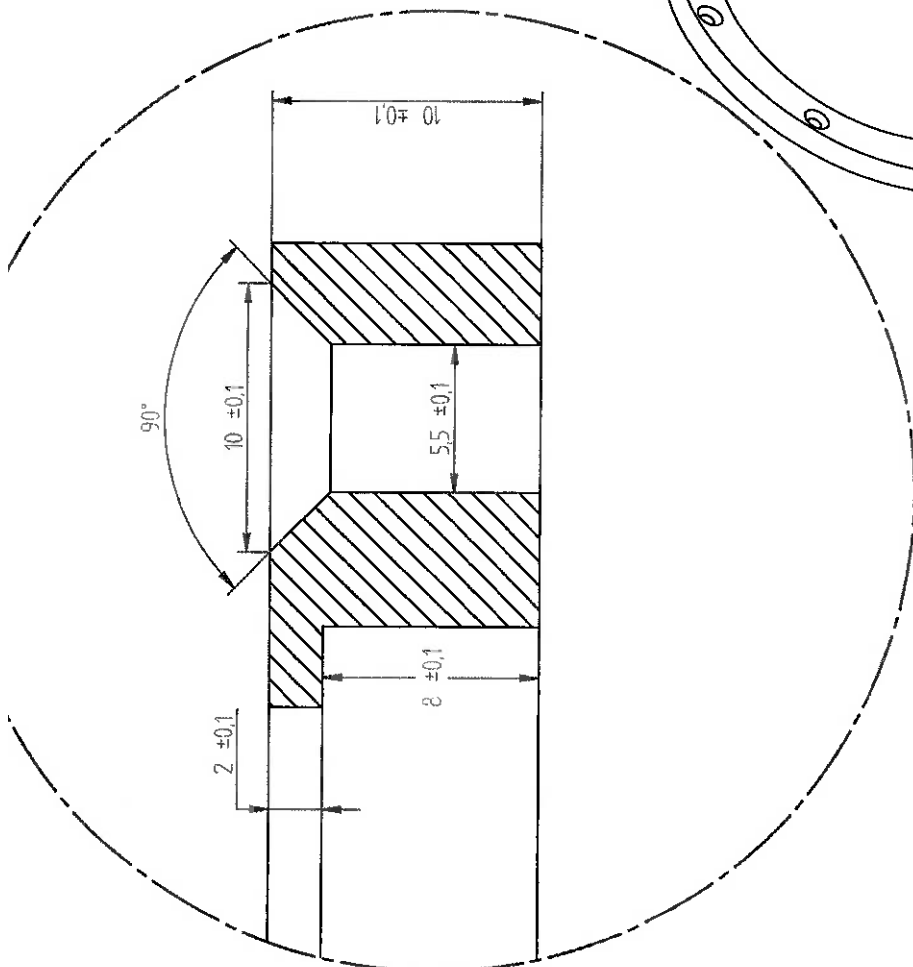
SECTION S-S

Quantidade 4 Peças
Propriedade Magnética do Material Magnético

| | | | | |
|-------------------------------|---------|------------------------|--|----------------|
| DRAWN | NAME | DATE | TRABALHO DE FORMATURA | |
| CHECKED | Zanetti | 04/10/70 | PEA - Energia e Automação | |
| ENG APPR | | | TITLE | |
| MGR APPR | | | Manral Magnético - Anel Metálico Interno | |
| Paulo Henrique Morato Scatena | | SIZE | DWG NO | REV |
| Rodolfo Ribeiro Zanetti | | A3 | 09 | 1 |
| | | Acumulador de Energia. | | |
| | | SCALE | 2:1 | SHEET 17 OF 22 |

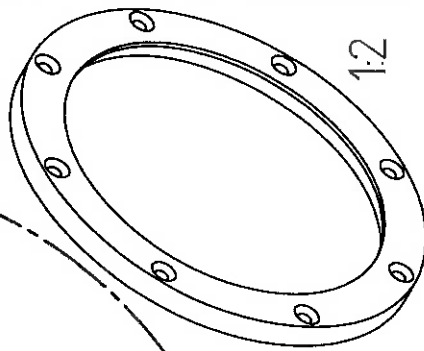


1:1



DETAIL U

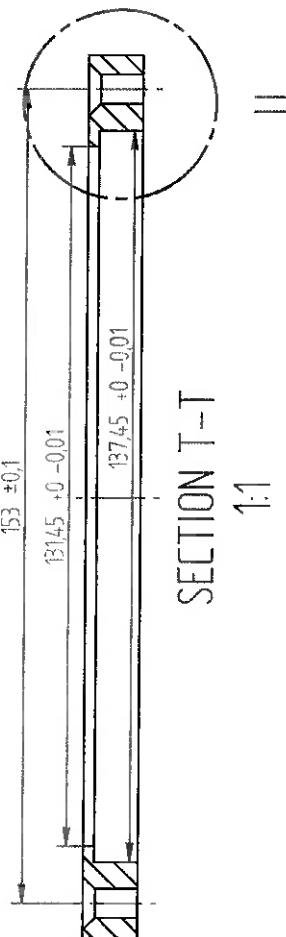
5:1



1:2

Quantidade 4 Peças
Propriedade Magnética do Material Não Magnético

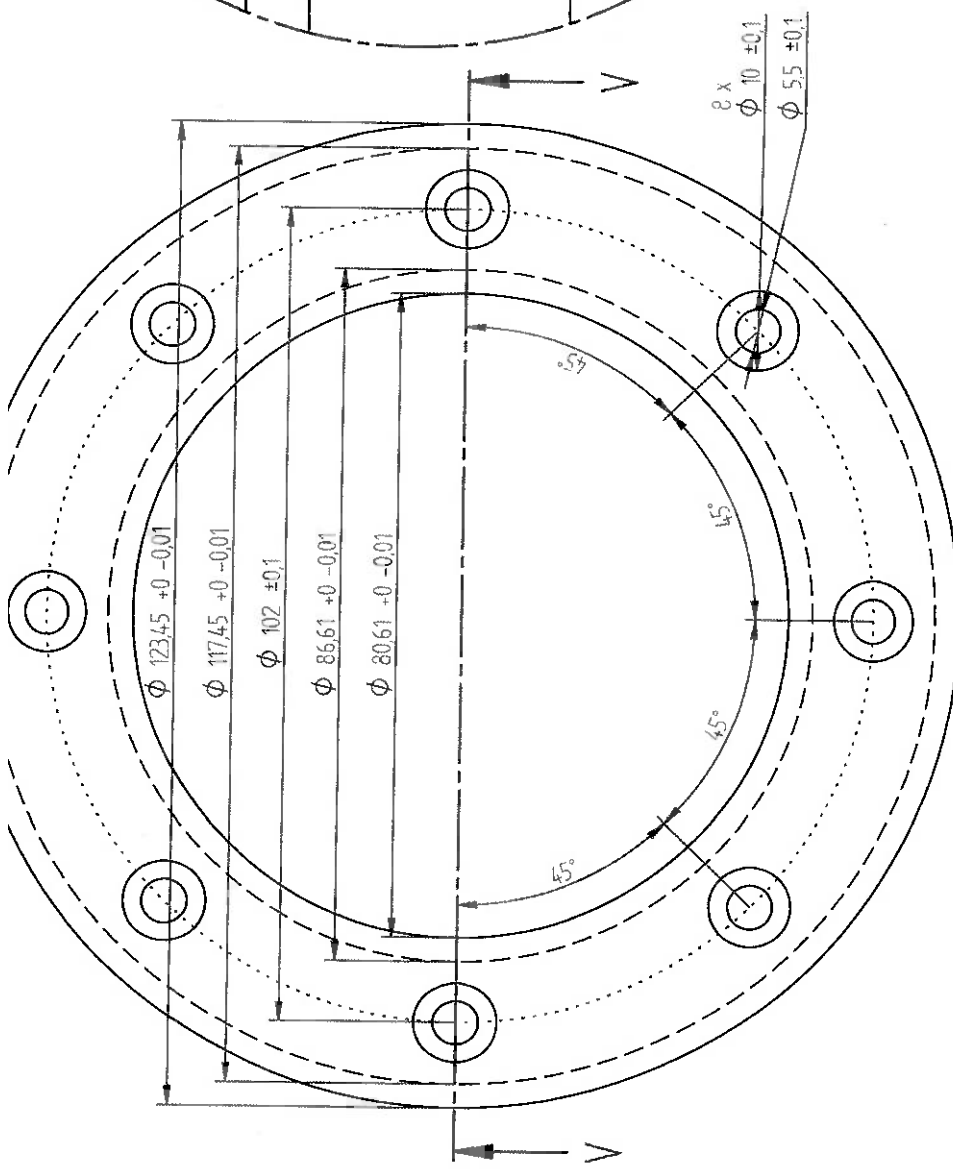
| TRABALHO DE FORMATURA | |
|---|--------|
| PEA - Energia e Automação | |
| TÍTULO | |
| Mancal Magnético - Anel Fixação Externo | |
| SIZE | DWG NO |
| A3 | 10 |
| REV | 1 |
| Acumulador de Energia | |
| SCALE | 1:1 |
| SHEET 18 OF 22 | |



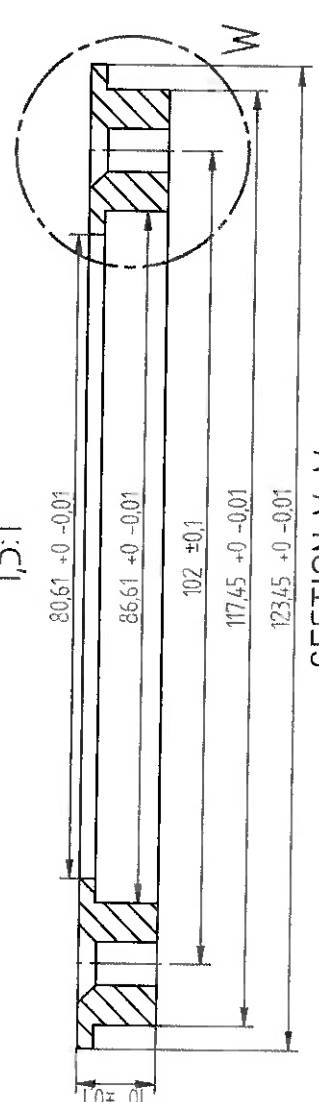
SECTION T-T

1:1

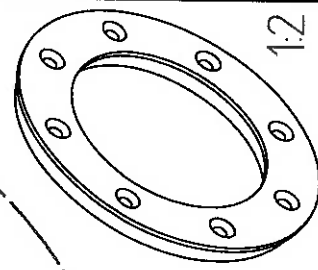
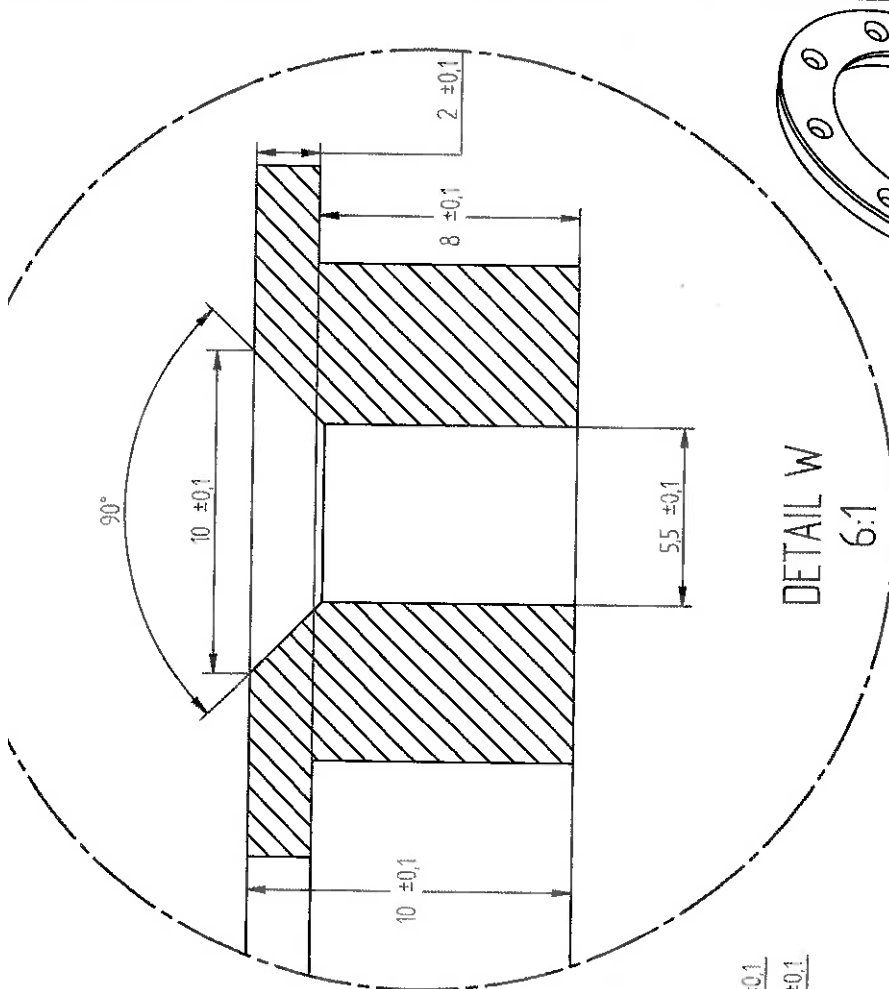
U



15:1



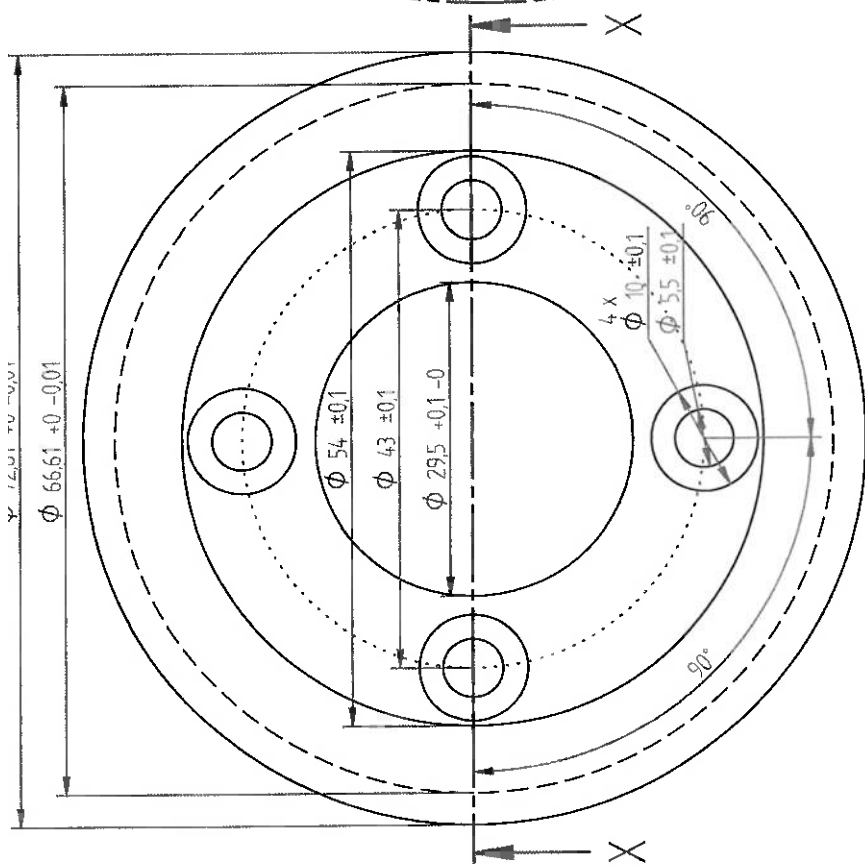
SECTION V-V



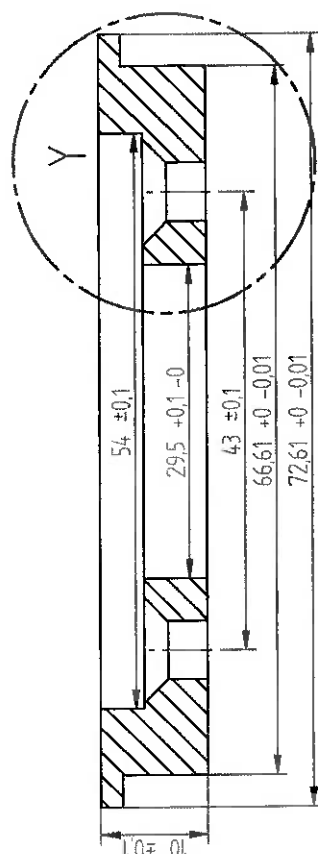
1:2

Propriedade Magnética do Material: Não Magnético
Quantidade: 4 Peças

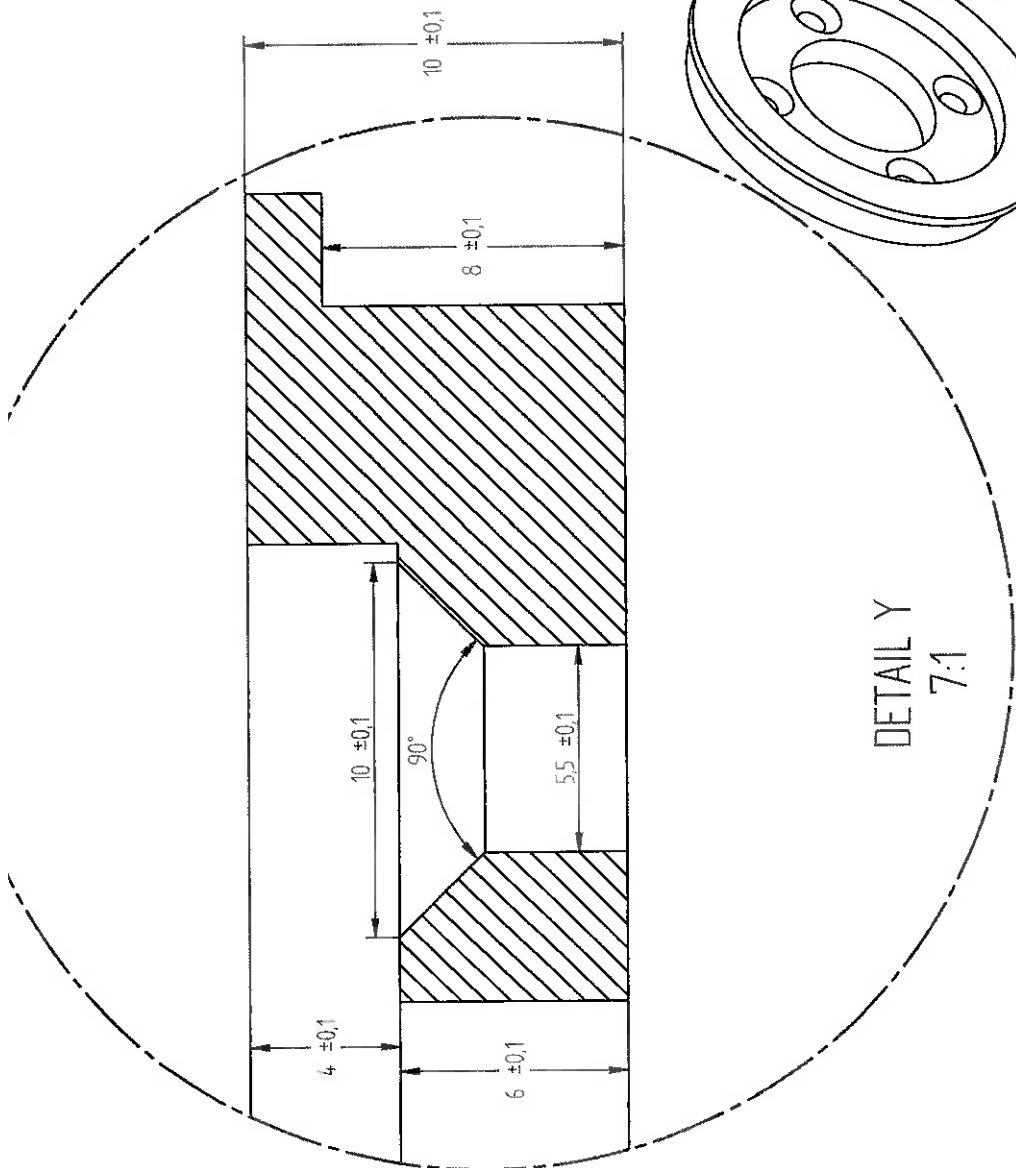
| TRABALHO DE FORMATURA | |
|--|----------------|
| PEA - Energia e Automação | |
| TÍTULO: Mancal Magnético - Anel Fixação intermediária | |
| SIZE: DWG NO: A3 | REV: 1 |
| Paulo Henrique Morato Scatena Rodolfo Ribeiro Zanetti | |
| SCALE: 15:1 | SHEET 19 DE 22 |



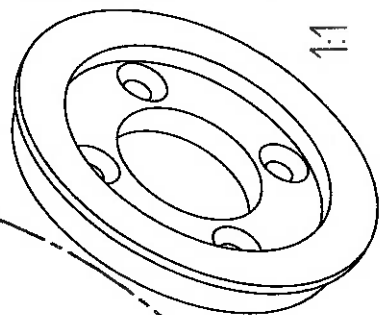
2:1



SECTION X-X



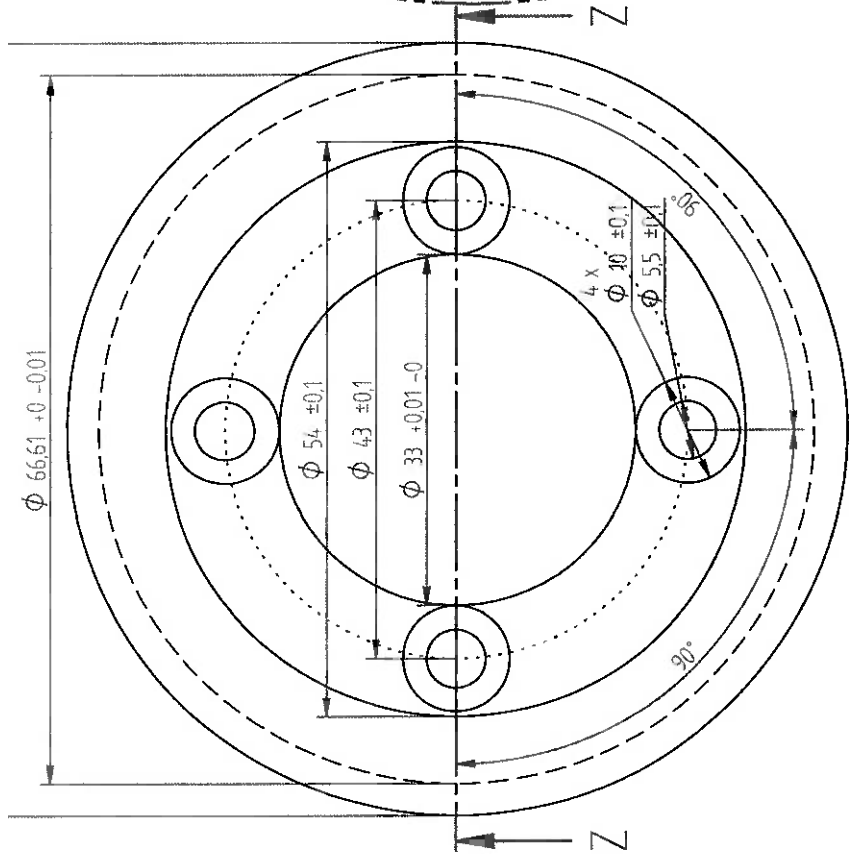
DETAIL Y
7:1



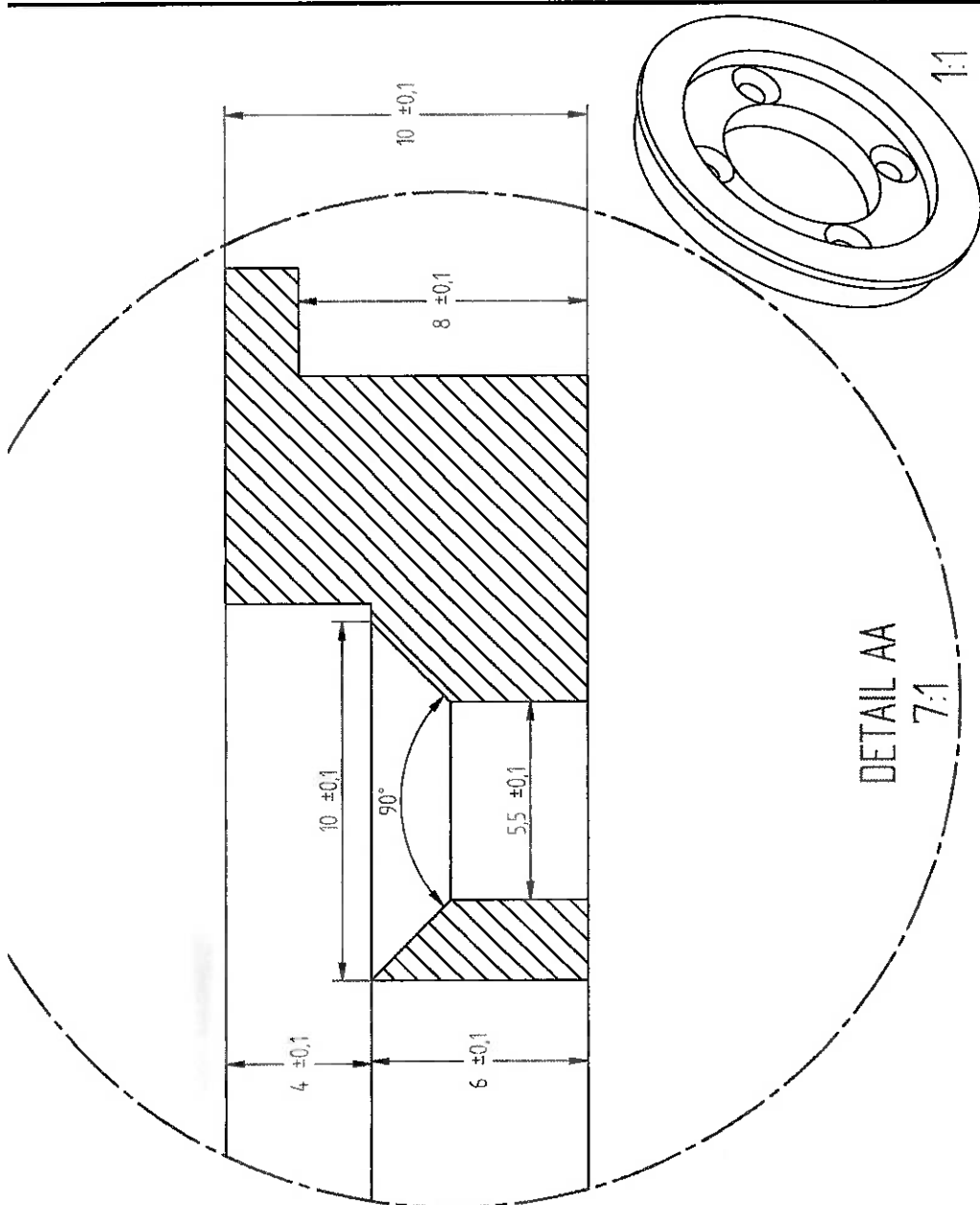
1:1

Quantidade 2 Peças
Propriedade Magnética do Material Não Magnético

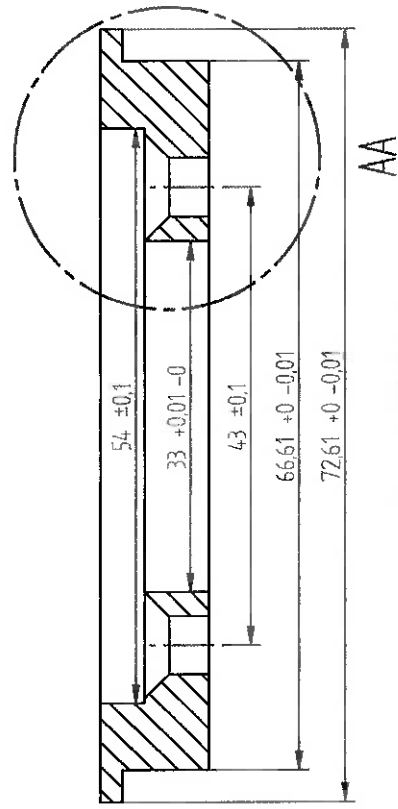
| TRABALHO DE FORMATURA | |
|--|----------|
| NAME | Zanetti |
| DATE | 04/03/10 |
| DRAWN | |
| CHECKED | |
| ENG APPR | |
| MGR APPR | |
| Paulo Henrique Morato Scatena Rodolfo Ribeiro Zanetti | |
| TÍTULO Mancal Magnético - Anel Fixação Interno | |
| Supporte | |
| SIZE | A3 |
| DWG NO | 12 |
| REV | 1 |
| Acumulador de Energia | |
| SCALE | 2:1 |
| SHEET 20 OF 22 | |



2:1



DETAIL AA
7:1



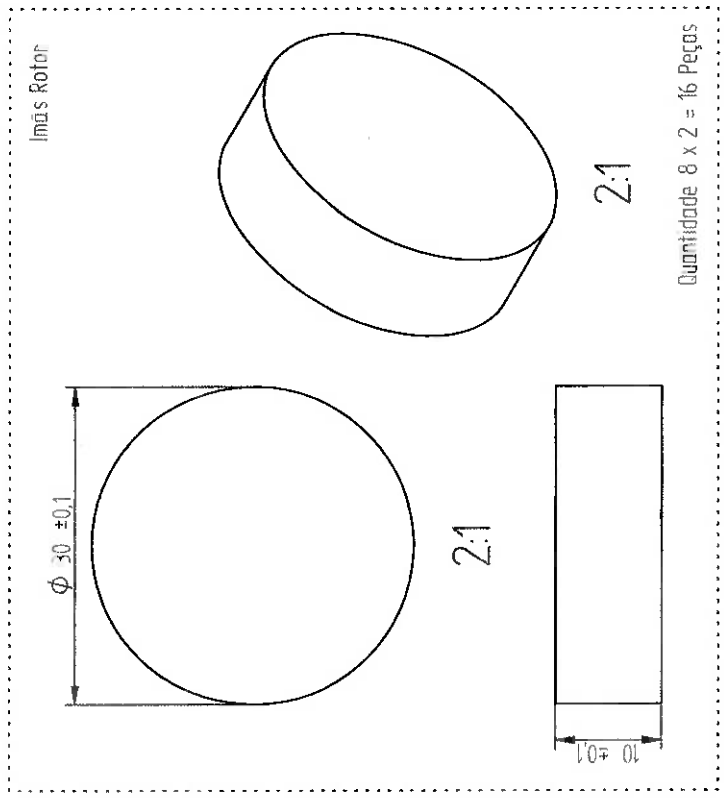
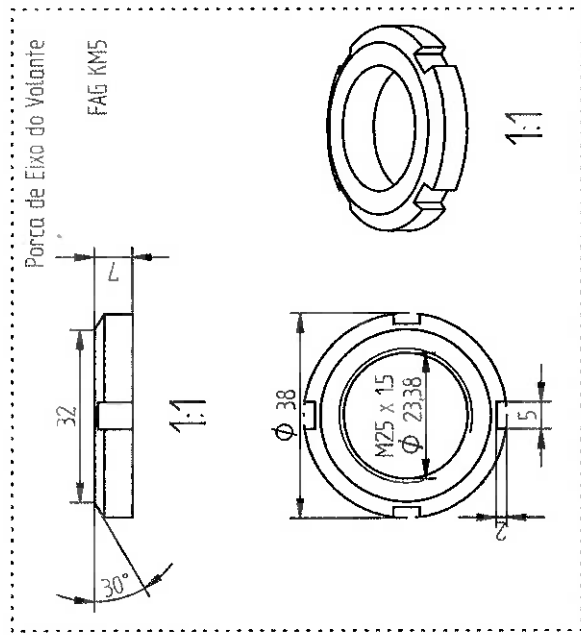
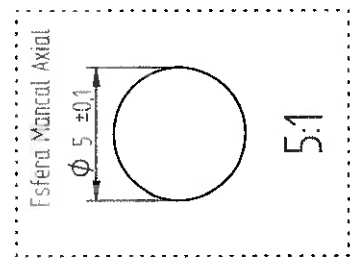
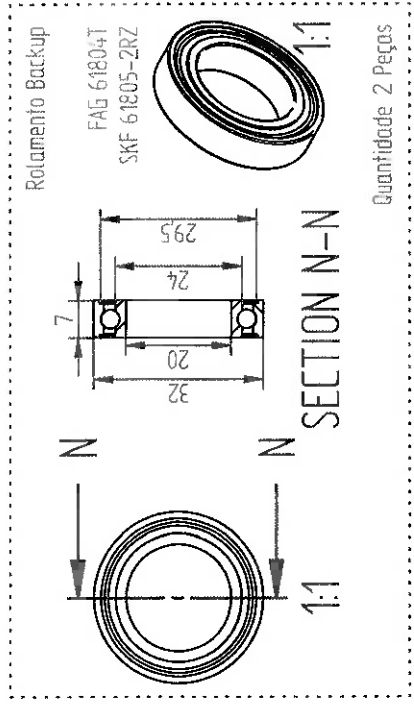
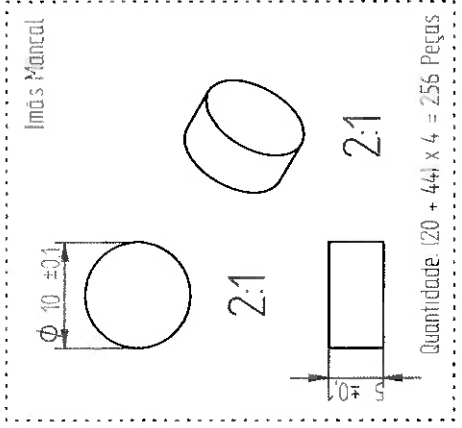
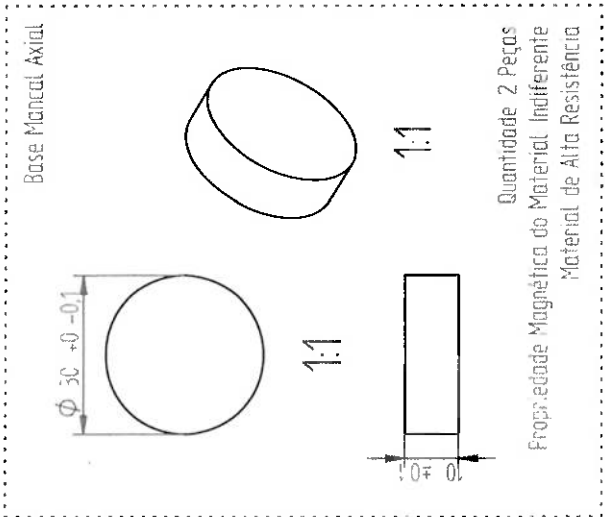
AA

SECTION Z-Z

Quantidade 2 Peças
Propriedade Magnética do Material: Não Magnético

| TRABALHO DE FORMATURA | |
|--|----------------|
| PEA - Energia e Automação | |
| TITLE: Mancal Magnético - Anel Fixação Interno | |
| Volante | |
| SIZE: A3 | DWG NO: 13 |
| REV: 1 | |
| Acumulador de Energia | |
| SCALE: 2:1 | SHEET 21 OF 22 |

Paulo Henrique Morato Scatena
Rodolfo Ribeiro Zanetti



| TRABALHO DE FORMATURA | | TITLE | |
|-------------------------------|---------|-----------------------|--------|
| DRAWN | NAME | DATE | |
| CHECKED | Zanetti | 04/10/10 | |
| ENG APPR | | | |
| MGR APPR | | | |
| Paulo Henrique Morato Scatena | | Peças Pequenas | |
| Rodolfo Ribeiro Zanetti | | SIZE | DMB NO |
| | | A3 | 14 |
| | | REV | 1 |
| | | Acumulador de Energia | |
| SCALE: ~ | | SHEET 22 OF 22 | |