

LUCAS MACHADO DE OLIVEIRA

Propulsor para veículos submarinos não tripulados

São Paulo
(2013)

LUCAS MACHADO DE OLIVEIRA

Propulsor para veículos submarinos não tripulados

Trabalho de conclusão de curso apresentado
à Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Engenheiro

Orientador: Prof. Dr. Ettore A. de Barros

São Paulo
(2013)

LUCAS MACHADO DE OLIVEIRA

Propulsor para veículos submarinos não tripulados

Trabalho de conclusão de curso apresentado
à Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Engenheiro

Área de Concentração: Engenharia Mecatrô-
nica

Orientador: Prof. Dr. Ettore A. de Barros

São Paulo
(2013)

FICHA CATALOGRÁFICA

Oliveira, Lucas Machado de
Propulsor para veículos submarinos não tripulados / L.M.
de Oliveira. -- São Paulo, 2013.
82 p.

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

1. Propulsão 2. Submarinos 3. Submersíveis não tripulados
4. Veículos guiados remotamente I. Universidade de São Paulo.
Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e
de Sistemas Mecânicos II. t.

Dedico a meus avôs e avós.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para minha formação ao longo destes anos. Meus pais, irmãos, avôs e avós, amigos e namorada. Com quem minha convivência foi afetada durante os últimos anos para que pudesse atingir este objetivo.

Agradeço também ao meu professor orientador e aos meus amigos do Laboratório de Veículos Não Tripulados, onde me formei e tanto aprendi.

Agradeço também à CESP pelo financiamento do projeto.

"I now walk into the wild"

Alexander Supertramp (Christopher Mc-
Candless)

RESUMO

Este projeto teve como finalidade o desenvolvimento de um propulsor para utilização em veículos submarinos não tripulados desenvolvidos no Laboratório de Veículos não Tripulados da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

O projeto envolveu diversas áreas de conhecimento como engenharia elétrica, mecânica, eletrônica e computação.

O propulsor é composto de um hélice, atuador elétrico, sistema de transmissão, sistema de acionamento e um vaso de pressão, com mecanismos para vedação dinâmica e estática.

A atuação é elétrica, feita através de um motor de corrente contínua sem escovas, cujo sistema de acionamento e controle de velocidade está integrado ao propulsor. O hardware desenvolvido é bastante compacto e o sistema de acionamento tem interface digital com comunicação via rede CAN, feita através de programação de um microcontrolador embarcado.

O sistema de vedação foi definido levando em conta diversos fatores como eficiência, confiabilidade, tamanho, custo, manutenção e complexidade de projeto.

O propulsor final desenvolvido tem dimensões reduzidas e capacidade de operar em profundidades de até 50 metros.

Palavras-chave: Propulsor, submarino, subaquático, ROV, AUV, veículos autônomos, veículos remotamente operados.

ABSTRACT

This project deals with the development of a thruster for unmanned underwater vehicles developed by the Unmanned Vehicles Laboratory of the Polytechnic School of University of São Paulo. This project involves several areas of engineering, such as electrical, mechanical, electronics and computer software.

A thruster contains a propeller, an actuator, transmission system, motor driver and a pressure vessel with mechanisms for sealing moving and static parts. A brushless electrical motor is used for actuation, and the motor driver is integrated on the thruster structure. The motor driver was made with a microcontroller, has small dimensions and a CAN interface for communication.

The sealing mechanism was defined by analyzing efficiency, reliability, size, cost, maintenance and complexity of the project. The thruster developed is compact and is capable of operating at depths of 50meters.

Keywords: Thruster, submarine, underwater, ROV, AUV, Autonomous underwater vehicles, Remotely operated vehicles

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - AUV Pirajuba e ROV Mandi.....	14
Figura 2 - Propulsores da Saab Seaeye e Sub-Atlantic - Retiradas de [16] e [17]	16
Figura 3 - Propulsor integrado ao duto. Retirada de [25]	17
Figura 4 - Exemplo de propulsor biomimético baseado em peixes. Retirada de [30].....	18
Figura 5 - Esquema da primeira versão do propulsor. Retirada de Assis [13].....	19
Figura 6 - Gráfico da corrente no motor em função da profundidade de operação.....	21
Figura 7 - Gráfico da potência consumida no propulsor em função do empuxo gerado.....	22
Figura 8 - Comparação entre os propulsores desenvolvidos no LVNT e o Tecnydyne 300.	23
Figura 9 - Gráfico do empuxo gerado em função da rotação do hélice para a 3a versão.....	27
Figura 10 - Motor da série Frameless Kit Motor da Parker. Retirada de [46].....	30
Figura 11 - Vista em corte do modelo em CAD da estrutura mecânica do propulsor.....	33
Figura 12 - Vista em corte do modelo em CAD do propulsor completo.....	33
Figura 13 - Estrutura básica de um controlador de motores sem escovas	34
Figura 14 - Diagrama do algoritmo de comutação e controle. Adaptada de [44]	39
Figura 15 - Leitura da corrente das fases. Adaptada de [44]	40
Figura 16 - Modelo do enrolamento de uma fase do motor	41
Figura 17 - Esquema de funcionamento do estimador. Adaptada de [44]	42
Figura 18 - Conversão do sistema trifásico no sistema dinâmico de referência.....	43
Figura 19 - Visualização em 3D da placa de controle.....	46
Figura 20 - Visualização em 3D da placa de amplificação projetada	47
Figura 21 - Peças da estrutura mecânica fabricadas	48
Figura 22 - Propulsor montado	49
Figura 23 - Resultado da fabricação das placas de circuito impresso	50
Figura 24 - Placa de controle montada	50
Figura 25 - Placa de amplificação montada	50
Figura 26 - Sistema de acionamento finalizado	51
Figura 27 - Comparação entre correntes estimada e medida para rotação de 100 rpm.....	53
Figura 28 - Gráfico da rotação do motor em função da rotação de referência	54
Figura 29 - Ensaio de bancada do propulsor	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Levantamento de vantagens e desvantagens de diferentes mecanismos de vedação ...	28
Tabela 2 – Planilha de cálculos para seleção do conjunto motor/redutor	31
Tabela 3 – Principais técnicas de comutação e suas características	35
Tabela 4 - Componentes para amplificação de potência do controlador.....	46
Tabela 5 – Resultados do ensaio de bancada do propulsor	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AUV: Veículo autônomo submarino: (Autonomous Underwater Vehicle)

ROV: Veículo remotamente operado (Remotely Underwater Vehicle)

LVNT: Laboratório de Veículos Não Tripulados

CAN: Rede de area para controladores (Controller Area Network)

PWM: Modulação por largura de pulso (Pulse Width Modulation)

FPGA: Arranjo de portas programável em campo (Field Programmable Gate Array)

DC Corrente continua (Direct Current)

FOC: Controle orientado a campo (Field-oriented control)

MOSFET: Transistor de efeito de campo de semicontudor metal óxido (Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor)

IGBT: Transistor bipolar de porta isolada (Insulated-Gate Bipolar Transistor)

FCEM: Força Contra Eletro Motriz

ARM: Máquina RISC Avançada (Advanced RISC Machine)

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1.	PROPULSORES COMERCIAIS	16
2.2.	PROPULSORES CONTRA-ROTATIVOS.....	16
2.3.	PROPULSORES INTEGRADOS AO DUTO.....	17
2.4.	PROPULSORES BIOMIMÉTICOS.....	18
2.5.	PROPULSORES PARA GLIDERS	18
2.6.	PROPULSORES DESENVOLVIDOS NO LVNT	19
2.6.1.	Primeira versão.....	19
2.6.2.	Segunda versão.....	20
2.6.3.	Terceira versão	20
2.7.	PROPULSORES TECNADYNE 300.....	21
2.8.	COMPARAÇÃO ENTRE OS PROPULSORES	22
3.	PROJETO CONCEITUAL	24
3.1.	REQUISITOS DO PROJETO.....	24
3.1.1.	Dimensões máximas.....	24
3.1.2.	Controlador.....	24
3.1.3.	Empuxo gerado	24
3.1.4.	Profundidade	25
3.1.5.	Tensão de alimentação	25
3.2.	ESTRUTURA SELECIONADA	25
3.2.1.	Hélice	25
3.2.2.	Redutor	26
3.2.3.	Motor.....	26
3.2.4.	Sistema de acionamento	26
3.2.5.	Mecanismos de vedação.....	26
4.	PROJETO MECÂNICO	27
4.1.	SELEÇÃO DE COMPONENTES	27

4.1.1.	Hélice	27
4.1.2.	Sistema de vedação	28
4.1.3.	Motor e Redutor	29
4.2.	PROJETO DA ESTRUTURA MECÂNICA	32
5.	PROJETO DO SISTEMA DE ACIONAMENTO.....	34
5.1.	ESTRUTURA GERAL	34
5.1.1.	Interface.....	34
5.1.2.	Lógica de Comutação e Controle	34
5.1.2.1.	Comutação trapezoidal.....	35
5.1.2.2.	Comutação senoidal	35
5.1.2.3.	Controle vetorial.....	36
5.1.3.	Pré-Amplificação	36
5.1.4.	Amplificação de potência.....	36
5.1.5.	Sensoriamento	37
5.2.	ALGORITMO DE COMUTAÇÃO.....	38
5.2.1.	Leitura de corrente	40
5.2.2.	Estimativa do ângulo e velocidade de rotação	40
5.2.3.	Controle de velocidade e ângulo do campo gerado.....	42
5.3.	PROJETO ELÉTRICO	44
5.3.1.	Circuito de controle.....	44
5.3.2.	Circuito de amplificação	46
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
6.1.	FABRICAÇÃO E MONTAGEM DA ESTRUTURA MECÂNICA	48
6.2.	FABRICAÇÃO E MONTAGEM DO SISTEMA DE ACIONAMENTO	49
6.3.	Ajustes e calibração do algoritmo de acionamento	53
7.	Conclusão	56
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57

1. INTRODUÇÃO

Veículos submarinos não tripulados têm desempenhado um papel cada vez mais significativo em diversas aplicações por apresentarem vantagens em relação a alternativas como o uso de mergulhadores. Pode-se citar, por exemplo, evitar a exposição de mergulhadores a ambientes perigosos, maior qualidade dos dados obtidos em missões oceanográficas, redução nos custos operacionais e viabilizar a execução de tarefas em altas profundidades ou ambientes com presença de grande radiação.[1] [2] [3]

Apesar de existirem diversos projetos de desenvolvimento de veículos híbridos, [4] [5] [6] fundamentalmente os veículos submarinos não tripulados são subdivididos em dois grandes grupos: veículos autônomos submarinos (AUVs) e veículos remotamente operados (ROVs). Cada um com características que os tornam mais adequados para diferentes tarefas. [3] [7]

O Laboratório de Veículos Não tripulados (LVNT) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo tem trabalhado em projetos de desenvolvimento de AUVs e ROVs, dos quais pode ser citado o AUV Pirajuba, primeiro protótipo nacional de AUV, [7] [8] [9] [10] e o ROV Mandi, desenvolvido para inspeção de turbinas geradoras em hidrelétricas. [10] Os veículos estão apresentados na Figura 1.



Figura 1 - AUV Pirajuba e ROV Mandi

O AUV Pirajuba é um veículo autônomo submarino com comprimento de aproximadamente 1,8 m e diâmetro de 330 mm e utiliza um propulsor para movimentação. O projeto foi desenvolvido para estudos de hidrodinâmica e atualmente está sendo adaptado para execução de missões para levantamento de dados oceanográficos. O ROV Mandi é um veículo submarino operado remota-

mente desenvolvido para inspeção de turbinas de usinas hidrelétricas, possui dimensões aproximadas de 400x400x600 mm e opera com seis propulsores.

Um dos principais limitantes para operações de AUVs é a sua autonomia. AUVs em geral são alimentados por sistemas de armazenamento de energia como baterias e, portanto, possuem uma capacidade de energia limitada.

O consumo de energia nestes veículos pode ser dividido em duas parcelas: uma praticamente constante, referente ao consumo de energia do sistema de controle e sensores, e uma parcela referente ao sistema de propulsão e acionamento de lemes, sendo esta última significativamente maior e menos constante ao longo da missão. [11]

ROVs em geral possuem uma grande quantidade de propulsores para permitir controle de movimento em diversos graus de liberdade. Assim, a maior parcela da energia consumida também provém dos propulsores.

Apesar de não possuírem uma capacidade limitada de energia, pois em geral são alimentados por uma fonte na superfície através de um cabo umbilical, a potência requerida para acionamento dos propulsores também é um fator determinante para operação deste tipo de veículo, limitando o alcance do veículo e a correnteza máxima admissível no ambiente. Isto ocorre pois um aumento na potência necessária acarreta um aumento no diâmetro do umbilical e, conseqüentemente, um aumento no arrasto gerado ao longo de seu comprimento. [12]

Por essas razões, o aumento da eficiência dos propulsores se mostra de grande importância para ambos projetos de veículos submarinos não tripulados.

O LVNT tem dedicado ao longo dos anos um esforço no desenvolvimento de propulsores submarinos, principalmente voltados para aplicações em AUVs. [7] [8] [13] [14] O propulsor desenvolvido encontra-se na sua terceira versão e é atualmente utilizado no AUV Pirajuba. No entanto, devido ao seu tamanho e a necessidade de uso de controladores externos, não foi utilizado no projeto do ROV Mandi, para o qual foram adquiridos propulsores comerciais.

Propulsores são encontrados apenas no mercado internacional e são desenvolvidos por poucas empresas. O custo em geral é alto e é necessário aguardar períodos para fabricação e importação, provocando atrasos, aumentando o custo final do projeto e causando uma grande dependência do mercado internacional em casos de falhas.

Nota-se, portanto, grande vantagem no desenvolvimento de um projeto de propulsor nacional e que atenda os requisitos necessários para utilização nos projetos do LVNT.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. PROPULSORES COMERCIAIS

A grande maioria dos propulsores comercialmente disponíveis atualmente possui um vaso de pressão que abriga o motor, o redutor e a eletrônica de acionamento, e este vaso fica posicionado em frente ao hélice. O eixo de acoplamento entre o atuador e o hélice é vedado através de diferentes mecanismos, variando entre os fabricantes.[15] [16] [17] [18] [19]



Figura 2 - Propulsores da Saab Seaeye e Sub-Atlantic - Retiradas de [16] e [17]

Os sistemas de vedação mais comuns encontrados são baseados em acoplamento magnético, como os da Tecnadyne [15], ou vedação com retentores, como os modelos da SubAtlantic [16] e Seaeye [19]. Muitos propulsores, independentemente do sistema de vedação utilizado, possuem a opção de serem fornecidos com o vaso de pressão preenchido de algum óleo, aumentando sua resistência para operações em grandes profundidades [19].

2.2. PROPULSORES CONTRA-ROTATIVOS

Existem diversos artigos relacionados ao desenvolvimento e técnicas de modelagem, acionamento e controle de motores para propulsores contra-rotativos. [20]

Propulsores contra-rotativos têm uma vantagem significativa para aplicações para AUVs pois são capazes de gerar empuxo sem aplicar um torque na estrutura do veículo, evitando provocar um movimento de rolagem nos veículos.

A aplicação de propulsores contra-rotativos não é comum em ROVs pois, em geral, estes veículos possuem mais de um motor no mesmo plano, e o torque resultante na estrutura pode ser anulado utilizando propulsores girando em sentido contrário, com hélices invertidas. Além disso,

estes propulsores costumam ter um comprimento total grande, devido à necessidade de utilizar um mecanismo auxiliar para o acionamento do segundo eixo de rotação

Para gerar o movimento contrário nos hélices existem projetos que utilizam dois motores independentes [21] , projetos com engrenagens que invertem o sentido de rotação de um dos hélices, projetos que utilizam motores especiais com dois rotores [22] , e sistemas que utilizam o próprio estator para acionar o segundo eixo. [23]

2.3.PROPULSORES INTEGRADOS AO DUTO

Propulsores integrados ao duto são bastante utilizados em projetos para ROVs. Este tipo de propulsor apresenta a vantagem de ser bastante compacto, pois o volume do duto do propulsor é aproveitado para abrigar o estator. Com o grande o diâmetro do estator nesta configuração é possível obter altos torques no rotor, permitindo o acionamento de hélices sem a necessidade de sistemas de redução. [24] .



Figura 3 - Propulsor integrado ao duto. Retirada de [25]

Uma desvantagem deste tipo de projeto está relacionada à perda de eficiência devido à fricção entre o rotor e o estator, que fica numa região de maior diâmetro e, portanto, com maior velocidade tangencial. Outra fonte de perda de eficiência é a distância entre o estator e o rotor, que acaba sendo relativamente grande. [24] [26]

Apesar do uso do duto aumentar a eficiência dos hélices, seu uso em AUVs em geral se mostra desvantajoso [26] pois dutos têm sua eficiência maior quando operados em baixas velocidades, em condições próximas às de *bollard-pull*. Para operação em maiores velocidades o duto pode provocar um aumento no arrasto maior do que o ganho de desempenho do hélice. Além disso,

pesquisas mostram que o duto provoca um momento restaurador acentuado no movimento de veículos, que pode reduzir seu raio de giro.[27]

2.4.PROPULSORES BIOMIMÉTICOS

Atualmente, é possível notar uma grande tendência de pesquisa em propulsores biomiméticos. Estes projetos procuram desenvolver propulsores de alta eficiência baseados em mecanismos semelhantes aos de seres-vivos. [28] .

São encontrados mecanismos baseados na propulsão caudal de peixes [29] , movimentos de oscilação semelhantes aos dos pinguins [31] , arraias [32] e polvos [33] e mecanismos de propulsão com jatos d'água como em outros cefalópodes.

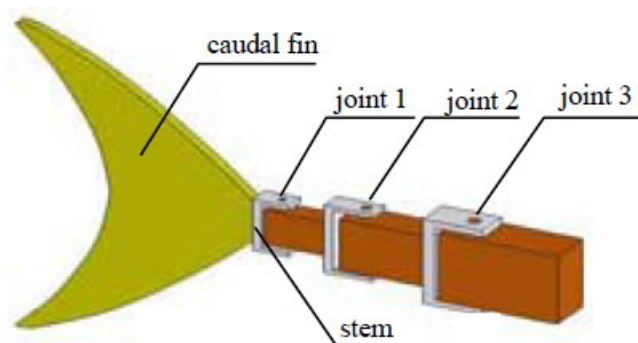


Figura 4 - Exemplo de propulsor biomimético baseado em peixes. Retirada de [30]

Estes propulsores ainda se encontram numa fase de pesquisa e desenvolvimento, não sendo encontrados em aplicações comerciais. No entanto, espera-se no futuro conseguir obter propulsores de alta eficiência e controle como observado nos animais [28] .

2.5.PROPULSORES PARA GLIDERS

Existem também propulsores para veículos autônomos conhecidos como *gliders*. Estes veículos utilizam um sistema de propulsão baseado na variação da flutuabilidade do veículo [35] , que gera movimentos com consumo de energia bastante reduzido, permitindo missões de longa duração.

Este sistema de propulsão não é utilizado em outros tipos de veículos pois o movimento gerado é quase vertical. Estes veículos têm aplicações limitadas, sendo geralmente utilizados para levantamento de dados oceanográficos.

2.6. PROPULSORES DESENVOLVIDOS NO LVNT

O Laboratório de Veículos Não Tripulados tem desenvolvido ao longo dos anos um projeto de propulsor para aplicação no AUV Pirajuba. A primeira versão foi desenvolvida em 2006 e atualmente o propulsor encontra-se na sua terceira versão.

2.6.1. Primeira versão

Em 2006, como parte de um trabalho de conclusão de curso, foi desenvolvida a primeira versão do propulsor utilizado no AUV Pirajuba que consistia num vaso de pressão fabricado em alumínio que abrigava um conjunto de redutor e motor de corrente contínua com escovas e um controlador de velocidade, todos da fabricante Maxon.

Para comportar o motor, sistema de vedação, rolamentos e o controlador de velocidade, foi feito um vaso de pressão com dimensões aproximadas de 500 mm de comprimento e 140 mm de diâmetro. A Figura 5 mostra o sistema de propulsão completo:

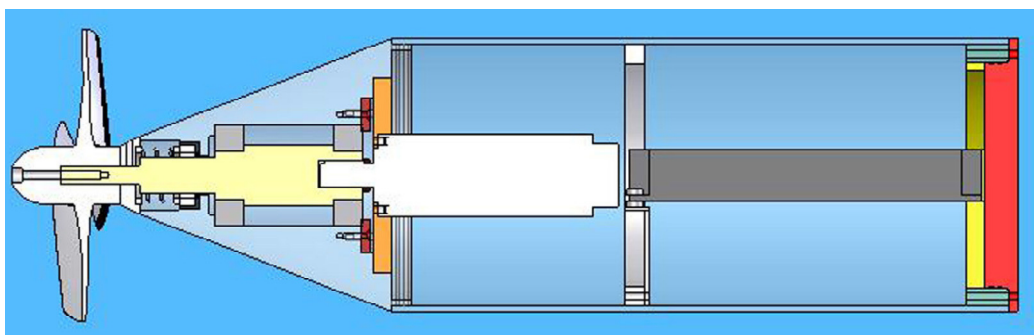


Figura 5 - Esquema da primeira versão do propulsor. Retirada de Assis [13]

A vedação do eixo rotativo foi feita utilizando um selo mecânico, dispositivo de baixo custo bastante utilizado em bombas e compressores. A vedação nos selos mecânicos é feita através de dois discos de cerâmica que giram em contato entre si pressionados por uma mola.

Foram identificados três principais desvantagens no uso deste sistema de vedação:

O aumento da pressão externa aumenta a pressão de contato entre as duas cerâmicas, aumentando assim o torque resistivo. Apesar de necessário para que o sistema resista à entrada de água em pressões maiores, o aumento no torque resistivo provoca uma redução na eficiência do propulsor e dificulta a previsão de consumo de energia do veículo.

Outro problema deste sistema é que ele não deve ser acionado sem que esteja submerso, pois a água tem um papel lubrificante no contato das duas cerâmicas. Com isso, prejudica-se a realização de testes de bancada do veículo no laboratório.

O terceiro problema detectado se refere à manutenção. Selos mecânicos são bastante frágeis e, uma vez montados no eixo, precisam ser danificados para remoção, sendo necessário trocá-los por novos.

2.6.2. Segunda versão

Visando reduzir o tamanho do propulsor desenvolvido na primeira versão, foi feito o projeto de uma segunda versão sem o controlador de velocidades integrado ao propulsor. Foi utilizado o mesmo sistema de vedação por selo mecânico e o mesmo conjunto motor/redutor.

Com a remoção do controlador, o tamanho do propulsor pôde ser reduzido consideravelmente, tendo dimensões aproximadas de 300 mm de comprimento e 50 mm de diâmetro. No entanto, foi necessário acomodar o controlador de velocidade em outro vaso de pressão do veículo.

Esta segunda versão foi utilizada por um longo período no veículo, mas notou-se uma redução significativa na sua eficiência, provavelmente devido ao dimensionamento do sistema do selo-mecânico e defeitos de alinhamento do eixo.

2.6.3. Terceira versão

Procurando solucionar os problemas verificados no sistema de vedação por selos mecânicos, foi desenvolvida uma nova versão do propulsor, desta vez com a vedação baseada em retentores. Nesta terceira versão, foram utilizados dois retentores instalados sequencialmente no eixo, e o volume entre eles foi preenchido com óleo. [8]

Ensaio realizados com o propulsor mostraram um ganho de desempenho significativo com o novo sistema de vedação em operações de baixa profundidade. No entanto, ensaios em câmara de pressão mostraram que ainda ocorre um aumento significativo no torque resistente quando a pressão externa aumenta, como pode ser visto na Figura 6.

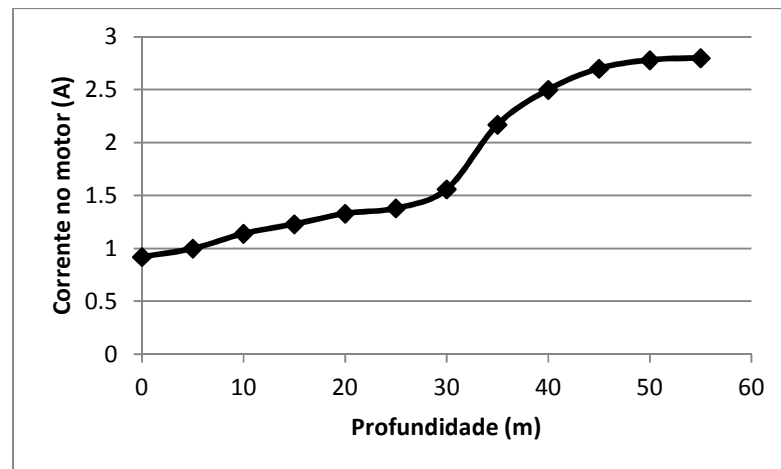


Figura 6 - Gráfico da corrente no motor em função da profundidade de operação

Os retentores disponíveis comumente no mercado nacional são recomendados para operações a pressões equivalentes a, no máximo, 30m de coluna d'água. Os testes demonstraram que o sistema é capaz de impedir a entrada de água a profundidades de pelo menos 70m, mas provavelmente a durabilidade do retentor seja reduzida com a grande pressão exercida. É possível verificar no gráfico acima que ocorre um salto na corrente necessária justamente na faixa de limite de pressão do retentor, provavelmente indicando uma deformação excessiva.

2.7.PROPULSORES TECNADYNE 300

Foram adquiridos propulsores para utilização no ROV Mandi da fabricante Tecnadyne, modelo 300. Esta empresa é bastante reconhecida no desenvolvimento de sistemas de propulsão submarinos e seus propulsores foram utilizados em diversos projetos.

Estes propulsores são bastante compactos, com comprimento aproximado de 225 mm e diâmetro externo do duto de aproximadamente 110 mm. O vaso de pressão tem diâmetro de aproximadamente 42 mm e acomoda o motor, redutor e um controlador de velocidades.

O sistema de vedação utilizado nos propulsores dessa empresa é baseado em acoplamento magnético. Neste sistema, o motor gira um eixo que possui ímãs que, por sua vez, giram o hélice, também montado num sistema com ímãs. Desta forma não é necessário o uso de retentores ou outra forma de vedação dinâmica

Este sistema apresenta vantagens como, por exemplo, grande confiabilidade, resistência a altas pressões e independência do torque resistivo com a variação de pressão, além de atuar como proteção no caso de travamento do hélice. [15]

No entanto, é possível notar algumas desvantagens no uso deste sistema. Um problema verificado é que a água possui papel fundamental na lubrificação do contato entre o conjunto do hélice e o vaso de pressão do propulsor. Quando seco, ocorre grande atrito e, conseqüentemente, aquecimento no acoplamento. Portanto, o propulsor só deve ser acionado quando submerso.

Outro problema deste sistema é que ele tem um tamanho consideravelmente grande para comportar a quantidade de ímãs necessários para transmitir o torque. Neste propulsor em questão, o sistema de acoplamento magnético corresponde a aproximadamente 1/4 do comprimento total.

2.8.COMPARAÇÃO ENTRE OS PROPULSORES

Para comparar o desempenho dos diferentes propulsores, foi feito um gráfico de empuxo em *bollard-pull* em função da potência requerida, permitindo comparar a eficiência dos diferentes propulsores. Este gráfico é mostrado na Figura 7

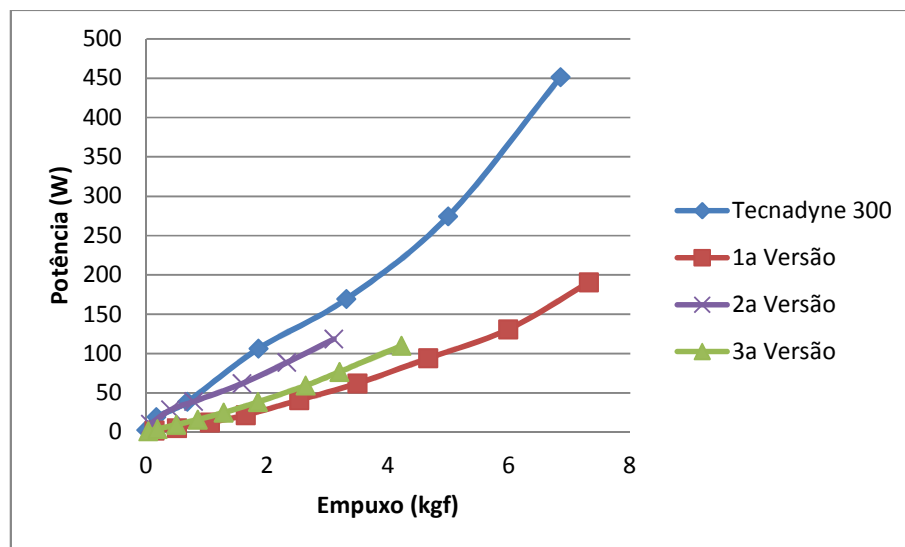


Figura 7 - Gráfico da potência consumida no propulsor em função do empuxo gerado

Devido às limitações impostas no controlador de velocidade, os ensaios da 2ª e 3ª versão não puderam ser feitos na máxima rotação. No entanto, é possível verificar uma tendência compatível com a observada no ensaio da primeira versão.

É importante ressaltar também que, no ensaio da primeira versão, feito em 2008, foi utilizada uma célula de carga com fundo de escala de mais de 50 kgf, portanto existe uma maior incerteza nos valores de empuxo medidos. Nos ensaios das segunda e terceira versões foi utilizada uma célula de carga com fundo de escala de 10 kgf, e os resultados são mais confiáveis.

Apesar destas incertezas, pode-se notar que houve uma grande perda de eficiência na segunda versão com relação à primeira. Este desempenho foi melhorado na terceira versão, mas possivelmente não atingiu aquele da primeira versão.

É possível verificar que todas as versões de propulsores desenvolvidos no laboratório apresentaram melhores eficiências para operação em bollard-pull do que o propulsor da Tecnadyne, provavelmente devido à diferença no tamanho e formato dos hélices.

O hélice utilizado nos propulsores do LVNT foi desenvolvido como parte de um projeto de conclusão de curso, com o intuito de validar uma ferramenta numérica para projeto de hélices [14]. Esse hélice pertence à família Kaplan, tem quatro pás e diâmetro de aproximadamente 150 mm.

Hélices da família Kaplan são muito utilizados em operações de baixas velocidades onde é necessário um alto empuxo [14]. Embora sejam apropriados para uso em dutos, os ensaios realizados mostraram um bom desempenho em sua operação mesmo sem a instalação do duto.

No entanto, também é importante notar que o propulsor da Tecnadyne possui dimensões muito menores que os outros desenvolvidos. A Figura 8 permite comparar o tamanho dos propulsores analisados:



Figura 8 - Comparação entre os propulsores desenvolvidos no LVNT e o Tecnadyne 300.

Conforme pode ser visto pela descrição dos projetos anteriores, é notável que houve uma grande evolução nas novas versões desenvolvidas, mas ainda não existe uma versão que realmente atenda a todos os requisitos de operação dos veículos de forma satisfatória.

Além disso, nota-se que é possível equiparar-se ou até mesmo superar a eficiência do propulsor da Tecnadyne num propulsor desenvolvido com um hélice de melhor desempenho

3. PROJETO CONCEITUAL

3.1. REQUISITOS DO PROJETO

Para aplicação do propulsor nos projetos desenvolvidos no Laboratório de Veículos Não Tripulados, foram definidos requisitos relacionados às dimensões, eficiência, empuxo e interface de comunicação.

3.1.1. Dimensões máximas

Para que o propulsor possa ser instalado nos veículos já desenvolvidos sem necessidade de grandes modificações nas suas estruturas, é preciso que o vaso de pressão que abriga o motor e controlador possua no máximo 50 mm de diâmetro. É necessário também que o comprimento não seja maior do que o do propulsor atual, de aproximadamente 350 mm.

Atendidos estes limites, deseja-se que o propulsor possua as menores dimensões possíveis, tanto em diâmetro como comprimento. A redução do diâmetro reduz a interferência no escoamento que chega ao hélice, podendo melhorar sua eficiência. A redução no comprimento permite o desenvolvimento de veículos cada vez mais compactos.

3.1.2. Controlador

O sistema de controle e acionamento do motor deverá ser integrado ao propulsor, evitando o uso de um controlador externo que necessite ser instalado num dos vasos de pressão do veículo, que possuem volume interno limitado.

Para permitir uma fácil adequação do propulsor aos veículos, deseja-se que o controlador possa ser adaptado para uso de diferentes tipos de interface, analógicas ou digitais.

3.1.3. Empuxo gerado

Através de ensaios de campo realizados com o AUV Pirajuba, foi verificada a necessidade do propulsor ser capaz de gerar no mínimo 3kgf de empuxo proporcionando uma velocidade ao AUV compatível com suas operações.

Este valor foi obtido à partir da rotação necessária para propulsionar o veículo em sua velocidade nominal de 1 m/s e do empuxo correspondente levantado em ensaios do propulsor. Este valor é conservador, pois a curva utilizada foi levantada em ensaios estáticos (*bollard-pull*), ou seja, com

velocidade nula do escoamento, que correspondem ao máximo empuxo gerado pelo hélice naquela rotação.

Utilizando propulsores comerciais de dimensões e faixas de potência semelhantes como referência, pode-se estabelecer um objetivo de gerar empuxo máximo na faixa de 8kgf.

3.1.4. Profundidade

É preciso que o sistema de vedação seja capaz de manter o sistema estanque a profundidades de até 50m, para que seja adequado às operações do ROV Mandi.

É desejável que o propulsor resista a profundidades de até 100 metros, compatível com a profundidade máxima projetada para os outros vasos de pressão dos veículos.

3.1.5. Tensão de alimentação

Para aplicação do propulsor nos diferentes veículos, o projeto deverá ser adaptável facilmente para diferentes faixas de tensão de alimentação. Para o uso em ROVs é adequado o uso de tensões mais elevadas, na faixa de 300 V. Em AUVs, a tensão é menor, na faixa de 24 a 48 V.

3.2. ESTRUTURA SELECIONADA

A estrutura utilizada para o projeto do propulsor é baseada na maioria dos propulsores comercialmente disponíveis atualmente, com o vaso de pressão posicionado à frente do hélice.

Esta estrutura foi escolhida pois pode ser utilizada tanto em ROVs quanto em AUVs de forma satisfatória. Foi descartado o desenvolvimento de um propulsor contra-rotativo pois, embora apresente vantagens na aplicação no AUV, seu tamanho provavelmente inviabilizaria sua aplicação no ROV. Outra opção descartada foi fazer o propulsor integrado ao duto pois, como citado anteriormente, o uso de dutos pode prejudicar o desempenho na aplicação em AUVs.

Desta forma, os principais componentes do propulsor são:

3.2.1. Hélice

O hélice é o elemento do propulsor responsável por gerar empuxo a partir do movimento de rotação produzido pelo motor. Existem diversas geometrias de hélices, cada uma apresentando vantagens para diferentes aplicações. Para padronizar algumas geometrias, foram estabelecidas di-

versas séries de hélices que parametrizam suas características. Pode-se citar, por exemplo, as séries Kaplan e B-Troost.

3.2.2. Redutor

O redutor é um elemento encontrado na maioria dos propulsores, utilizado para reduzir a rotação e aumentar o torque gerado pelo motor, resultando num movimento mais adequado para acionamento dos hélices.

Alguns propulsores não utilizam um redutor e acoplam o hélice diretamente à saída do motor para aumento da confiabilidade, sistema conhecido como *direct-drive*, ou acionamento direto [16] .

3.2.3. Motor

O motor é o elemento que converte a energia elétrica num movimento de rotação que será transmitido ao hélice. Em geral propulsores de pequeno e médio porte utilizam motores elétricos de corrente contínua. Há propulsores baseados em motores de corrente contínua com escovas [17] , mas nota-se uma tendência atual pelo uso de motores sem escovas por apresentarem maior confiabilidade e eficiência. [18] [19]

3.2.4. Sistema de acionamento

O sistema de acionamento, também chamado de controlador, é um dispositivo que permite controlar a rotação do motor e, conseqüentemente, o empuxo gerado pelo propulsor. Existe uma grande variedade de controladores, que variam em função do tipo de motor, sensor de realimentação, tensão de alimentação, corrente de operação, interface de comunicação, etc.

3.2.5. Mecanismos de vedação

Mecanismos de vedação são utilizados em propulsores para evitar o contato da água com os componentes elétricos e eletrônicos, evitar a entrada de partículas que poderiam danificar os elementos mecânicos e evitar a saída de óleo em alguns propulsores. O mecanismo mais comum utilizado em propulsores comerciais é baseado em retentores. [16] [18] [19]

4. PROJETO MECÂNICO

4.1. SELEÇÃO DE COMPONENTES

4.1.1. Hélice

Optou-se por utilizar neste projeto o mesmo hélice que vem sendo utilizado nos propulsores desenvolvidos no LVNT devido ao seu bom desempenho e à disponibilidade de dados levantados em ensaios. Além disso, evita-se assim a necessidade de fabricar um novo hélice, que é um processo complexo e de custo elevado.

Utilizando os dados obtidos no ensaio da última versão do propulsor foi gerado um gráfico de empuxo gerado em função da rotação do hélice que é apresentado na Figura 9. Uma aproximação destes dados por um polinômio de 2º grau permite estimar a rotação necessária para gerar um empuxo de 8kgf correspondente à aproximadamente 1160 rpm. Estipulou-se, portanto, que o propulsor deve ser capaz de atingir uma rotação de 1200 rpm no eixo do hélice.

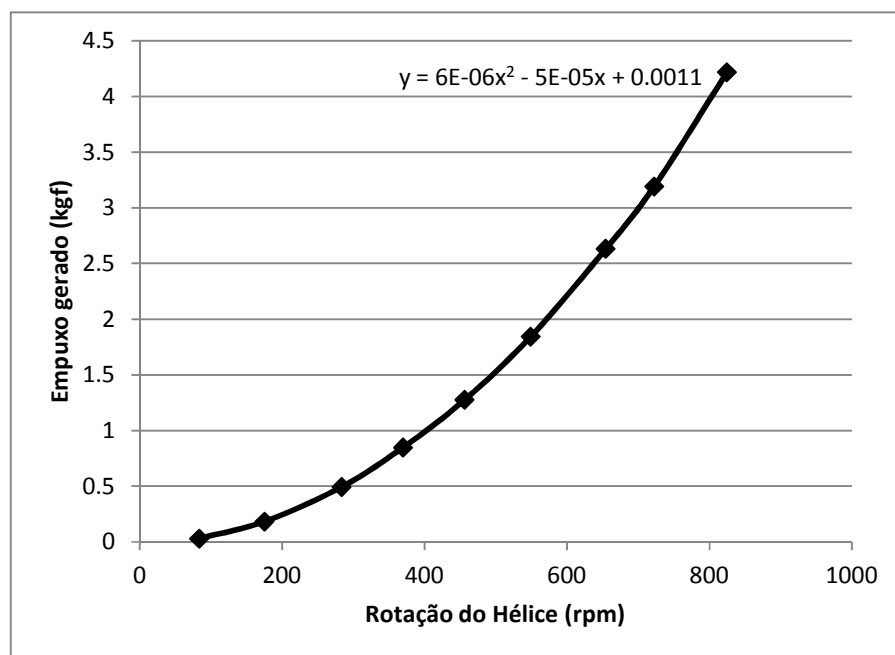


Figura 9 - Gráfico do empuxo gerado em função da rotação do hélice para a 3ª versão

4.1.2. Sistema de vedação

Para definir um sistema de vedação, foi feito um levantamento de vantagens e desvantagens para as soluções mais comuns. O resultado encontra-se resumido na Tabela 1:

Tabela 1 - Levantamento de vantagens e desvantagens de diferentes mecanismos de vedação

Solução	Vantagens	Desvantagens
Retentores	Projeto simples Tamanho reduzido Custo baixo Pode ser acionado fora d'água	Atrito aumenta com a profundidade Adequado para profundidades baixas Desgaste pode ser grande com maiores pressões Mola pode sofrer corrosão Frequentemente danificado ao ser desmontado
Selos Mecânicos	Profundidade máxima elevada Projeto relativamente simples Custo relativamente baixo	Atrito aumenta com a profundidade Desgaste pode ser grande com maiores pressões Pouco compacto Precisa ser trocado ao ser desmontado Não pode ser acionado fora d'água
Acoplamento magnético	Atrito independe da profundidade Desgaste baixo Profundidade máxima muito alta Grande confiabilidade	Não pode ser acionado fora d'água Projeto Bastante complexo Pouco compacto Preço elevado
Vaso imerso em óleo	Atrito independe da profundidade Desgaste baixo Profundidade máxima alta Desgaste menor do retentor Pode ser acionado fora d'água Custo provavelmente baixo Vaso de pressão pode ter paredes finas Compacto	Atrito viscoso sempre presente Difícil seleção do óleo Componentes eletrônicos ficam submetidos à pressão É preciso cuidado para retirar as bolhas de ar

Analisando as opções, optou-se por fazer o propulsor com vedação por retentores, prevendo a possibilidade de utilizar o vaso de pressão imerso em óleo.

Esta solução é amplamente utilizada nos propulsores comerciais [15] [16] [18] [19] e apresenta bom desempenho quando utilizada com motores sem escovas [36] [37]

É esperado que esta solução provoque um aumento no torque para operações em baixas profundidades devido à viscosidade do óleo no qual o motor estará imerso, mas com o aumento da profundidade espera-se que o desempenho seja superior. Além disso, devido à redução na diferença de pressão nas faces do retentor, provavelmente será possível utilizá-lo com menor pressão radial no eixo, reduzindo assim o atrito.

4.1.3. Motor e Redutor

Para atingir os requisitos de dimensões finais do propulsor, é proposto o uso de um motor de corrente contínua sem escovas. Estes motores em geral possuem maiores densidades de potência do que os que possuem escovas, além de apresentar maior confiabilidade e eficiência. [38] Além disso, para operação do motor imerso em óleo, o uso de motores com escovas se mostra inadequado [37]

A principal desvantagem associada a este tipo de motor é o fato de necessitarem de uma eletrônica de acionamento mais complexa do que os motores com escovas. No entanto, com o avanço da microeletrônica, este problema se torna cada vez menos significativo.

Para seleção do conjunto mais adequado foi elaborada uma planilha que calcula o empuxo máximo em operação nominal e o empuxo máximo gerado pelo propulsor levando em conta as rotações e torques máximos do motor e do redutor. Esta planilha encontra-se na Tabela 2.

Para cálculo do empuxo em operação nominal, foi utilizada uma função polinomial de 2º grau para aproximar os dados de empuxo em função da rotação obtidos para a terceira versão do propulsor do LVNT. Assim, é calculado o empuxo em função do *stall torque* do motor e da razão de redução.

Para cálculo do empuxo máximo, foi utilizada a mesma aproximação anterior e uma aproximação semelhante para cálculo do empuxo em função da rotação. Calcula-se o mínimo valor de empuxo gerado em função da máxima rotação e do máximo torque admissível no redutor.

Foi feita uma busca por motores de diversos fabricantes como Maxon, Parker, Faulhaber, Kollmorgen, Johnson e outros. Foram selecionados inicialmente os motores que permitissem atender o requisito de diâmetro máximo.

Optou-se pelo uso de motores da fabricante Parker, série *Frameless* kit motor, que possuem tamanhos e características de torque satisfatórias, além de ser uma fabricante com representante nacional, facilitando processos de compra. Além disso, por serem fornecidos sem a carcaça, é possível alojar o estator diretamente na estrutura do vaso de pressão, reduzindo as dimensões finais do propulsor.

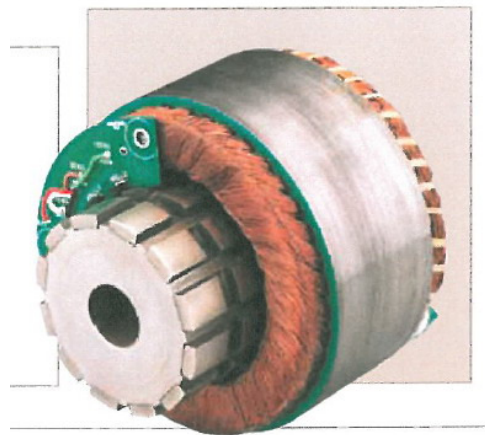


Figura 10 - Motor da série Frameless Kit Motor da Parker. Retirada de [46]

Essa série de motores pode ser montada com diversos tipos de enrolamentos, o que dá grande versatilidade ao projeto para aplicações com diferentes níveis de tensão de alimentação.

Foram encontrados poucos redutores com dimensões pequenas que pudessem ser utilizados no projeto. O redutor mais adequado encontrado foi o da série GP42, da Maxon, que possui alta capacidade de torque e rotação máxima maior do que os redutores dos outros fabricantes.

Tabela 2 – Planilha de cálculos para seleção do conjunto motor/redutor

Motor						Redutor						Resultado			
	Modelo	RPM Max.	Torque Nom. (N.m)	Compr. (mm)	Diâm. (mm)	Modelo	i	RPM	Torque Max (N.m)	Compr. (mm)	Diâm. (mm)	Empuxo Nominal (kgf.)	Empuxo Max (kgf.)	Compr. (mm)	Diâm. (mm)
Parker	44050	20000	0,21	37,0	44	GP42	6	8000	3	42	42	4,17	10,6	79,0	44
	44050	20000	0,21	37,0	44	GP42	4,3	8000	3	42	42	2,73	20,7	79,0	44
	44075	20000	0,297	43,5	44	GP42	3,5	8000	3	42	42	3,27	31,2	85,5	44
	44075	20000	0,297	43,5	44	GP42	4,3	8000	3	42	42	4,25	20,7	85,5	44
	44100	20000	0,36	49,8	44	GP42	3,5	8000	3	42	42	4,17	31,2	91,8	44
	44100	20000	0,36	49,8	44	GP42	4,3	8000	3	42	42	5,39	20,7	91,8	44
	44100	20000	0,36	49,8	44	GP42	6	8000	3	42	42	8,12	10,6	91,8	44
	44200	20000	0,607	75,2	44	-	1	20000	-	0	0	1,58	2399,0	75,2	44
	44300	20000	0,96	100,6	44	-	1	20000	-	0	0	2,95	2399,0	100,6	44
Kollmorgen	00711	20000	0,109	27,9	37,8	GP42	3,5	8000	3	42	42	0,74	31,2	69,9	42
	00711	20000	0,109	27,9	37,8	GP42	4,3	8000	3	42	42	1,06	20,7	69,9	42
	00711	20000	0,109	27,9	37,8	GP42	6	8000	3	42	42	1,76	10,6	69,9	42
	00712	20000	0,152	34,3	37,8	GP42	3,5	8000	3	42	42	1,30	31,2	76,3	42
	00712	20000	0,152	34,3	37,8	GP42	4,3	8000	3	42	42	1,76	20,7	76,3	42
	00712	20000	0,152	34,3	37,8	GP42	6	8000	3	42	42	2,76	10,6	76,3	42
	00713	20000	0,195	40,6	37,8	GP42	3,5	8000	3	42	42	1,87	31,2	82,6	42
	00713	20000	0,195	40,6	37,8	GP42	4,3	8000	3	42	42	2,47	20,7	82,6	42
	00713	20000	0,195	40,6	37,8	GP42	6	8000	3	42	42	3,80	10,6	82,6	42
	00714	20000	0,249	48,3	37,8	GP42	3,5	8000	3	42	42	2,60	31,2	90,3	42
	00714	20000	0,249	48,3	37,8	GP42	4,3	8000	3	42	42	3,40	20,7	90,3	42
	00714	20000	0,249	48,3	37,8	GP42	6	8000	3	42	42	5,16	10,6	90,3	42
Faulhaber	4490BStc	16000	0,24	90,0	42	38A_5	5	4500	6	42,2	38	3,93	4,8	132,2	42
	4490BStc	16000	0,24	90,0	42	38A_4	4	4500	6	42,2	38	2,95	7,5	132,2	42
	4490BS	16000	0,2	90,0	42,2	38A_5	5	4500	6	42,2	38	3,11	4,8	132,2	42,2
	4490BS	16000	0,2	90,0	42,2	38A_4	4	4500	6	42,2	38	2,32	7,5	132,2	42,2
	4490Btc	16000	0,225	90,0	42,2	38A_5	5	4500	6	42,2	38	3,62	4,8	132,2	42,2
	4490Btc	16000	0,225	90,0	42,2	38A_4	4	4500	6	42,2	38	2,72	7,5	132,2	42,2
	4490B	16000	0,191	90,0	42,2	38A_5	5	4500	6	42,2	38	2,93	4,8	132,2	42,2

4.2.PROJETO DA ESTRUTURA MECÂNICA

Uma vez definidos todos os componentes e o driver de acionamento, foi desenvolvido projeto da estrutura mecânica do propulsor. O projeto foi feito utilizando-se o software de CAD Solid-Works.

Inicialmente foi feita a modelagem dos principais componentes separadamente: motor, redutor, hélice e sistema de acionamento. Estes componentes foram incluídos num projeto de montagem no qual foram modeladas as peças necessárias para sua fixação.

O projeto foi feito de forma a separar as estruturas mecânicas que abrigam o motor e o redutor. Desta forma é possível alterar qualquer um destes componentes sem ser necessário refazer todo o projeto.

A fixação do estator do motor será feita através de adesivo, e a posição do motor é definida através de um ressalto na face interna do vaso, conforme recomendado no manual de usuário do motor [46] . Para sustentação do eixo foram utilizados rolamentos de uma carreira de esferas.

As peças do vaso de pressão foram feitas em alumínio, por apresentar boa resistência à corrosão e peso reduzido. Os eixos do motor e do hélice foram feitos em aço inoxidável, pois estarão sujeitos a maiores esforços.

Não foi necessário dimensionar o vaso para suportar altas pressões pois é previsto que, para operação em grandes profundidades, o vaso será preenchido com óleo e a pressão será compensada através da deformação do retentor.

Para vedação do eixo rotativo foi utilizado um retentor, selecionado no catálogo da Vedabrás [47] a partir dos diâmetros do eixo e do alojamento no vaso. A vedação das partes estáticas foi feita através de *o'rings*, cujo canal foi dimensionado à partir do catálogo da Parker [48]

Foram utilizados parafusos com mola para manter o amplificador de potência em contato com a estrutura de alumínio do vaso, para melhorar a dissipação do calor gerado.

O resultado do projeto em CAD pode ser visto nas Figura 11 e Figura 12, e o desenho de conjunto é apresentado no apêndice I.

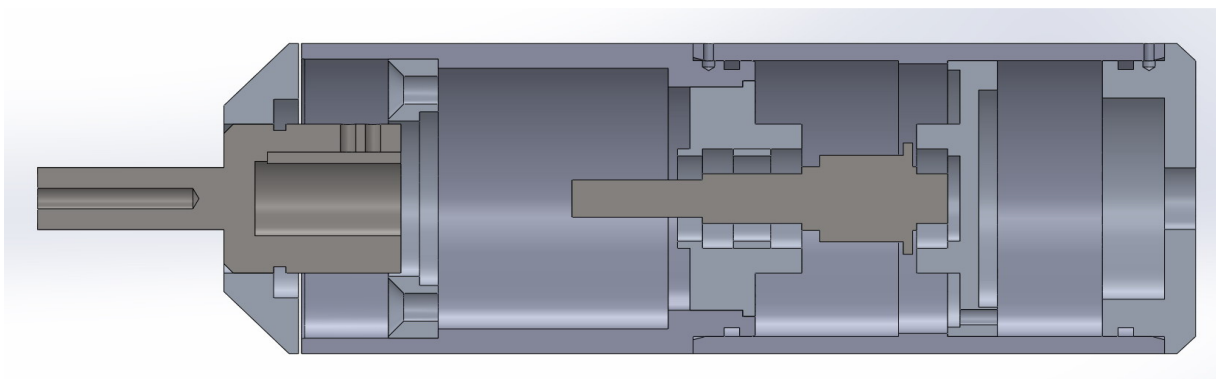


Figura 11 - Vista em corte do modelo em CAD da estrutura mecânica do propulsor

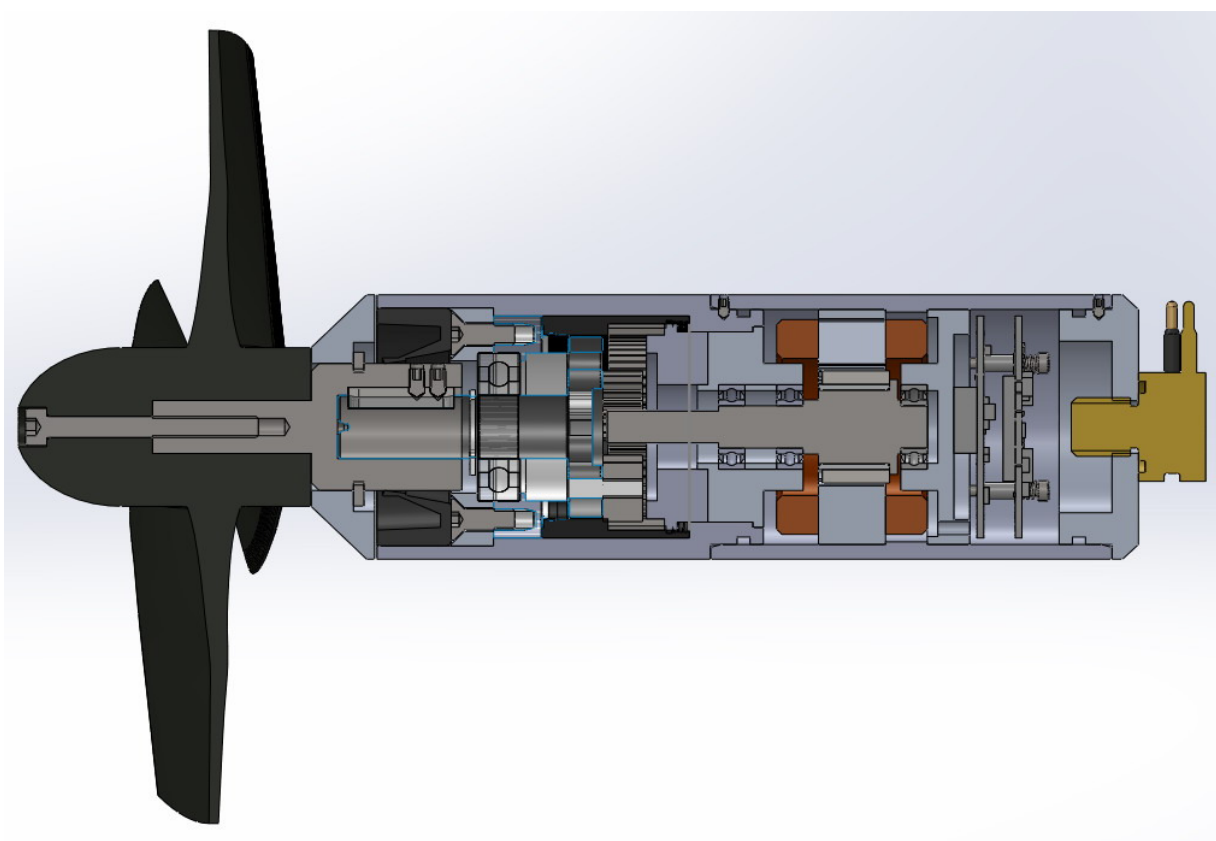


Figura 12 - Vista em corte do modelo em CAD do propulsor completo

5. PROJETO DO SISTEMA DE ACIONAMENTO

5.1. ESTRUTURA GERAL

A estrutura geral de um sistema de acionamento e controle de motores sem escovas pode ser dividida em cinco blocos principais: interface, lógica de comutação e controle, pré-amplificação, amplificação de potência e sensoriamento, conforme mostra a Figura 13:

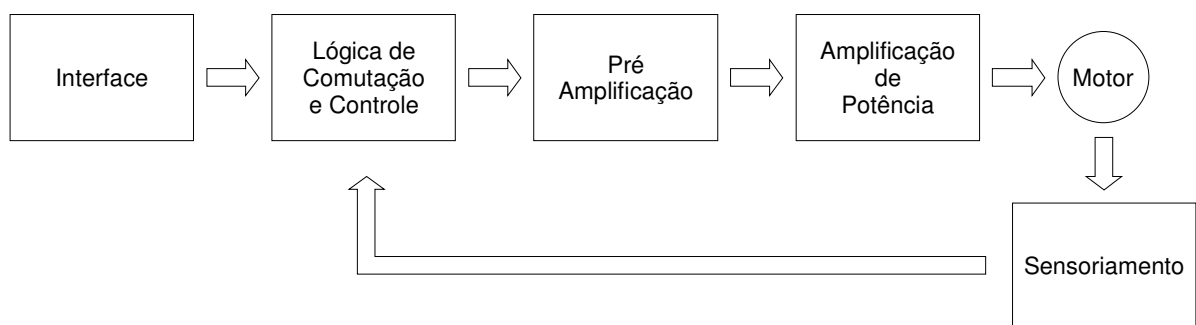


Figura 13 - Estrutura básica de um controlador de motores sem escovas

5.1.1. Interface

A interface do sistema de acionamento é em geral feita através de algum circuito integrado com capacidade de processamento e programação, como microcontroladores, microprocessadores ou FPGAs. Algumas soluções não utilizam este sistema e fazem a interface diretamente com um circuito integrado responsável pela lógica de comutação e controle do motor, usualmente através de sinais analógicos ou PWM.

5.1.2. Lógica de Comutação e Controle

Como motores sem escovas não possuem elementos de comutação integrados em sua construção, é preciso implementar uma lógica para acionamento das bobinas do motor na sequência e nos instantes adequados. Existem diversos circuitos integrados disponíveis no mercado que gerenciam a comutação por diferentes lógicas, utilizando alguma forma de realimentação para determinar a posição angular do rotor.

Existem três métodos tradicionais utilizados para de comutação de motores sem escovas: comutação trapezoidal, comutação senoidal e controle vetorial. [39] A Tabela 3 resume as características destas três técnicas.

Tabela 3 – Principais técnicas de comutação e suas características

Comutação	Sensores	Processamento	Flutuação de torque
Trapezoidal	Hall F.C.E.M	Baixo	Alto
Senoidal	Encoder Resolver	Médio	Baixo
Controle Vetorial	Shunt Encoder Resolver	Alto	Baixo

5.1.2.1.Comutação trapezoidal

O método mais simples de efetuar a comutação de um motor sem escovas é a comutação trapezoidal, também conhecida como comutação em seis passos, na qual duas das três fases do motor são acionadas numa sequência determinada e durante certo período de tempo, até que o rotor se mova. Este movimento é detectado através de um sensor de efeito hall e determinará as próximas duas fases que serão acionadas. Com este tipo de comutação o motor opera de forma semelhante a um motor com escovas, e o motor é frequentemente chamado de “*Brushless DC*”.

Este tipo de comutação possui a vantagem de sua programação ser muito simples, podendo ser feita em circuitos pequenos, com baixa capacidade de processamento.

A principal desvantagem deste tipo de acionamento é que ocorrem maiores flutuações no torque desenvolvido no motor [39]

Esta forma de comutação pode ser feita também através de outros sensores como encoder, resolver, ou até mesmo sem um sensor dedicado, através da medição da força contra eletromotriz gerada na fase que não é acionada durante cada ciclo. [40]

5.1.2.2.Comutação senoidal

A comutação senoidal é semelhante à comutação trapezoidal, mas os sinais de acionamento do motor têm uma forma senoidal e as três fases são acionadas ao mesmo tempo, com níveis diferentes de tensão a cada instante.

Para possibilitar esta forma de comutação é preciso uma maior resolução na leitura da posição do rotor, em geral a realimentação é obtida por um encoder óptico ou um resolver, que têm um custo bem maior que sensores hall e aumentam o custo total do sistema, [39]

A principal vantagem deste método é que a flutuação no torque gerado é reduzida, mas ocorre uma perda na eficiência em altas rotações. [41]

5.1.2.3. Controle vetorial

O controle vetorial, também conhecido como *Field Oriented Control (FOC)*, é uma técnica mais sofisticada de acionamento, que faz a comutação baseado nos vetores de tensão e corrente que são estimados através de uma realimentação de corrente do motor. [41]

Este método requer um processamento muito maior do que os outros apresentados, mas apresenta os melhores resultados para flutuação de torque, eficiência do motor e controles dinâmicos em altas e baixas rotações.[39]

5.1.3. Pré-Amplificação

O sinal de controle gerado pelos circuitos que implementam a lógica de comutação do motor em geral possuem níveis de tensão e correntes insuficientes para acionamento dos amplificadores de potência. Assim, faz-se necessário o uso de um circuito de pré-amplificação, que gera sinais com potência menor do que a necessária para acionamento direto do motor, mas suficiente para acionamento do estágio de potência.

5.1.4. Amplificação de potência

A amplificação de potência usualmente é feita através de MOSFETs ou IGBTs [42] . Estes componentes operam de forma semelhante à uma chave ou um relé, recebendo um sinal de baixa potência que controla uma saída ligada às fases do motor.

O MOSFET é um tipo de transistor que atualmente substitui os transistores bipolares em muitas aplicações de amplificação de potência devido às suas características como, por exemplo, controle por um sinal de tensão, enquanto transistores bipolares são controlados por sinais de corrente. A forma construtiva dos MOSFETs não apresenta limites teóricos para a resistência de condução, diferentemente de transistores bipolares.[43]

O IGBT é um componente que mistura as características dos MOSFETs e dos transistores bipolares. IGBTs são acionados através de um sinal de tensão como MOSFETs, mas possuem o estágio de saída semelhante ao de transistores bipolares [43]

MOSFETs e IGBTs possuem seus próprios campos de aplicação dependendo das características de tensão e frequência de operação, no entanto existe uma região que não é bem definida.

IGBTs são preferíveis em sistemas que operam em tensões acima de 1000 V, tensões acima de 250 V com frequências baixas, até aproximadamente 20 kHz, ou para sistemas de alta potência, acima de 5 kW. [43]

MOSFETs são mais apropriados para tensões até 250 V, ou tensões abaixo de 1000 V com frequências acima de aproximadamente 200 Hz, com potência abaixo de 500 W.

A região entre 250 V e 1000 V, com frequências entre 20 e 200 Hz não possui uma solução bem definida.[43]

5.1.5. Sensoriamento

Para realizar o acionamento adequado de motores sem escovas é necessário algum tipo de realimentação da posição do rotor. Diferentes técnicas de comutação requerem diferentes características de realimentação.[39]

Os tipos de realimentação mais utilizados são através de sensores de efeito hall, encoders, medição de corrente através de shunts ou medição da força contra eletromotriz gerada numa das bobinas.[41]

Sensores de efeito hall são mais baratos que encoders, porém sua resolução é baixa, inviabilizando técnicas de comutação mais sofisticadas como controle vetorial ou comutação senoidal.[41]

É bastante difundido o acionamento chamado sem sensores (*sensorless*), que funciona através da medição da força contra eletromotriz gerada em uma das fases do motor, ou através da leitura da corrente de uma ou duas fases. [40]

Como a força contraeletromotriz é proporcional à velocidade de rotação, esta técnica apresenta dificuldades para operação em baixas rotações e durante o início do movimento de rotação. Além disso, é preciso que uma das fases não esteja acionada para medição da força contra eletromotriz, inviabilizando sua aplicação em métodos de comutação senoidal e FOC.

A realimentação através da leitura de corrente das fases é utilizada para comutação por controle vetorial. Usualmente são utilizados resistores de baixa resistência (*shunts*) em série com as fases, gerando uma pequena tensão que é amplificada para medição da corrente. É possível medir a corrente de uma, duas ou das três fases do enrolamento do motor. [41] .

5.2.ALGORITMO DE COMUTAÇÃO

Tendo em vista o melhor desempenho do sistema para acionamento do motor em diferentes faixas de rotação e a redução do tamanho do propulsor ao máximo, foi escolhido utilizar o sistema de comutação por controle vetorial com realimentação de corrente. O princípio de funcionamento do controle vetorial consiste em controlar o acionamento das fases do motor de forma a gerar um campo magnético perpendicular ao campo magnético do rotor.

O diagrama apresentado na Figura 14 apresenta o funcionamento geral do sistema. Inicialmente é feita a determinação da corrente em cada fase do motor. A partir destas correntes é feita uma estimativa do ângulo e velocidade de rotação do rotor, que são utilizados para converter as três correntes num sistema de duas coordenadas, solidário ao rotor. Neste sistema são realizados os algoritmos de controle do tipo PID que determinam a velocidade de rotação do motor. Então, as saídas destes controladores são convertidas novamente num sistema trifásico para serem enviadas ao driver de potência.

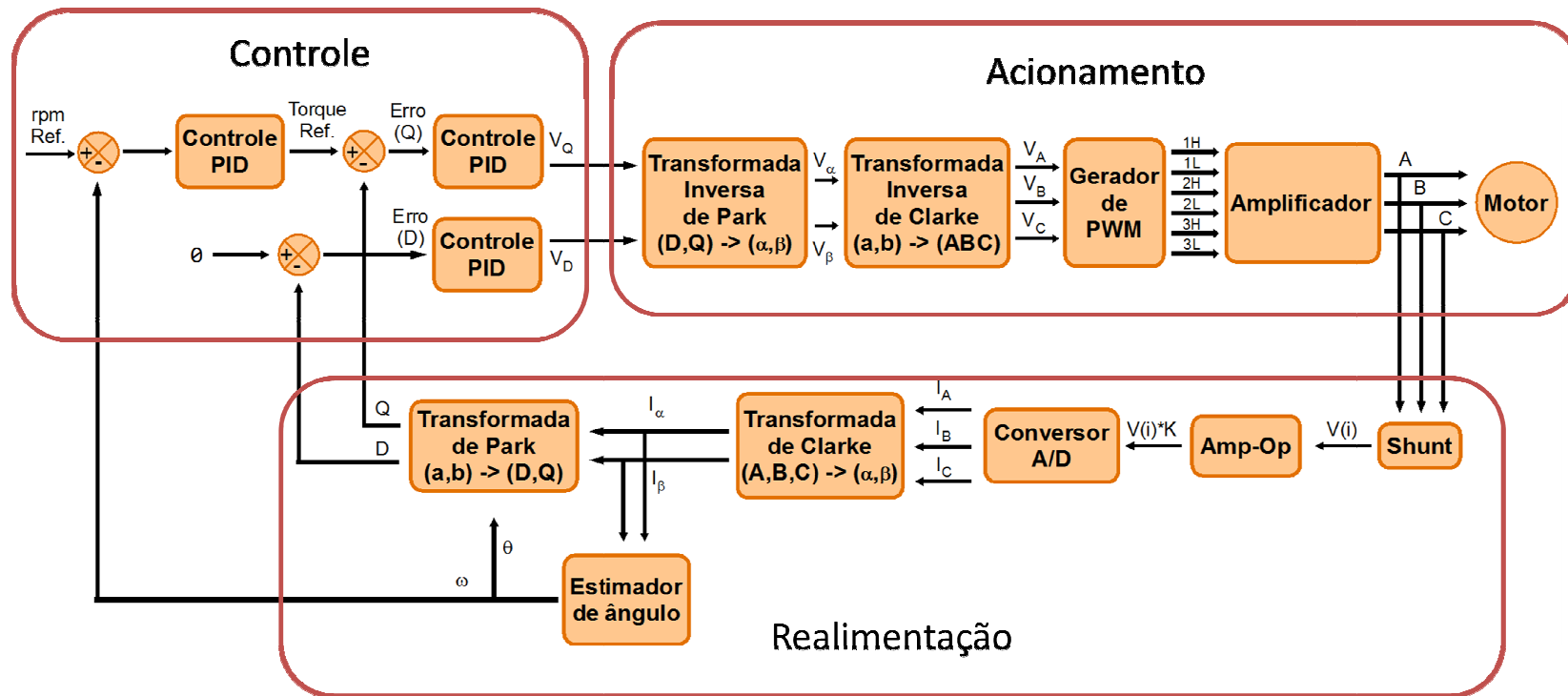


Figura 14 - Diagrama do algoritmo de comutação e controle. Adaptada de [44]

5.2.1. Leitura de corrente

Para determinar a corrente nas três fases através de um único shunt, instalado entre os terminais negativos dos IGBTs e o terra de referência, é preciso sincronizar a leitura do conversor A/D com os sinais de PWM de acionamento.

Após a primeira borda de subida da fase A, aguarda-se um período para estabilização da corrente e então é realizada a primeira leitura, determinando a corrente da fase A. Quando é acionada a fase B, é realizada a segunda leitura, que indica o valor das correntes A e B. Pela lei de Kirchoff, temos que a soma das correntes é igual a 0 e, portanto, é possível determinar a corrente da fase C. Para permitir a leitura da corrente apenas do canal A e do canal A e B, o acionamento das fases pode ser deslocado. Para minimizar este processo, são utilizados dois conversores A/D de alta velocidade, e um amplificador operacional de resposta rápida.

A Figura 15 esquematiza o processo.

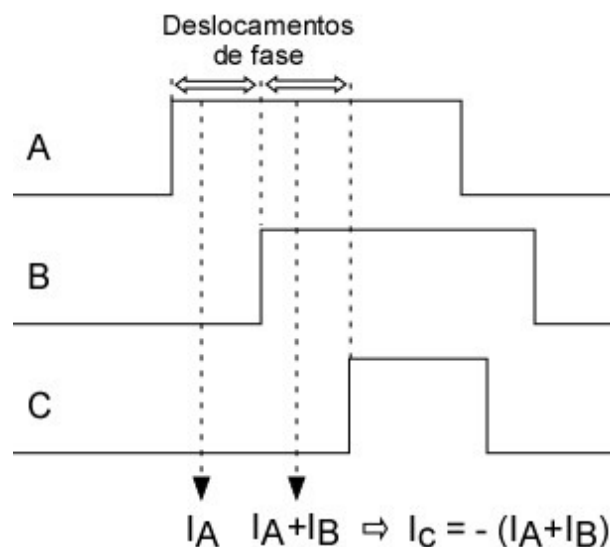


Figura 15 - Leitura da corrente das fases. Adaptada de [44]

5.2.2. Estimativa do ângulo e velocidade de rotação

A estimativa do ângulo e da velocidade de rotação do rotor é feita à partir de um observador do tipo “modos deslizantes”, que estima o valor da força contraeletromotriz, que é proporcional à velocidade de rotação.

Neste observador, é utilizado um modelo do enrolamento conforme a Figura 16

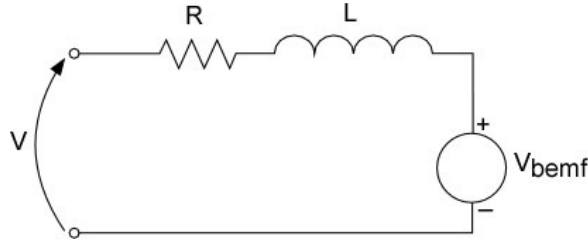


Figura 16 - Modelo do enrolamento de uma fase do motor

O Equacionamento da corrente em função da tensão de entrada fica:

$$\frac{d}{dt}i = \left(-\frac{R}{L}\right)i + \frac{1}{L}(V - V_{bemf})$$

Aproximando a derivada com a leitura de corrente em dois períodos de controle temos:

$$\frac{i_{est} - i_{ant}}{T} = \left(-\frac{R}{L}\right)i_{ant} + \frac{1}{L}(V - V_{bemf})$$

Portanto:

$$i_{est} = \left(1 - T\frac{R}{L}\right)i_{ant} + \frac{T}{L}(V - V_{bemf})$$

Para execução do observador, é incluído um fator z, resultando em:

$$i_{est} = \left(1 - T\frac{R}{L}\right)i_{ant} + \frac{T}{L}(V - V_{bemf} - Z)$$

O estimador da força eletromotriz funciona comparando a corrente calculada a partir da equação acima, e a corrente medida nas fases. Esta diferença é multiplicada por um ganho constante e realimentada como o parâmetro ‘Z’ na equação.

Como a corrente e a tensão aplicada são conhecidos, bem como a resistência e indutância do enrolamento e o período de execução do algoritmo, o único fator que zera o erro é o fator Z, que após um filtro passa-baixa, corresponde então à tensão contraeletromotriz.

Este algoritmo é realizado para um sistema ortogonal (α , β), obtido através da transformada de Clarke. Portanto, o ângulo do motor é calculado por:

$$\theta = \arctan\left(\frac{V_{\alpha}}{V_{\beta}}\right)$$

A velocidade de rotação é calculada à partir de duas leituras de ângulo:

$$\omega = \frac{\theta - \theta_{ant}}{T}$$

A Figura 17 apresenta o esquema de funcionamento do algoritmo de estimação

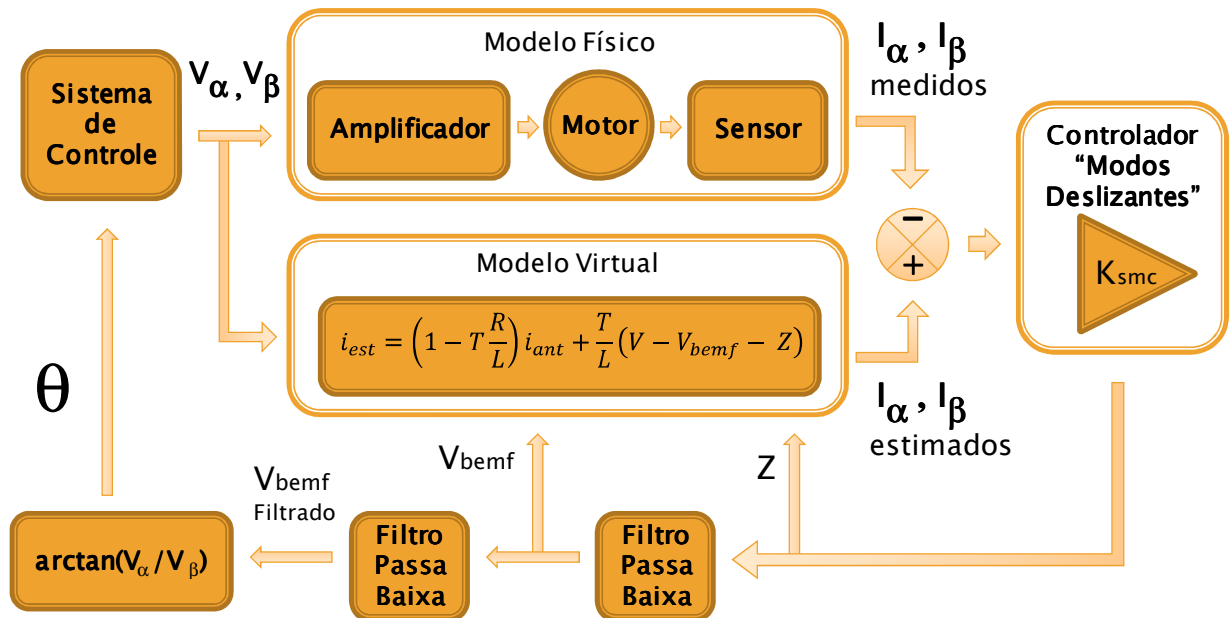


Figura 17 - Esquema de funcionamento do estimador. Adaptada de [44]

5.2.3. Controle de velocidade e ângulo do campo gerado

Para executar o algoritmo de controle do ângulo do campo gerado a partir do acionamento das fases e controle da velocidade de rotação as correntes lidas são representadas num sistema de referência solidário ao rotor do motor.

Como as fases do motor estão defasadas de 120° , é possível representar as correntes medidas num plano complexo. Através de uma transformada de Clarke, converte-se o sistema trifásico num sistema de referência estático, em função de duas componentes (α, β). Através de uma transformada de Park pode-se transformar este sistema num sistema dinâmico de referência (D,Q), solidário ao rotor. O ângulo de rotação do rotor é estimado a partir das leituras de corrente, conforme explicado anteriormente. A Figura 18 exemplifica o processo de conversão das correntes medidas para o sistema dinâmico de referência

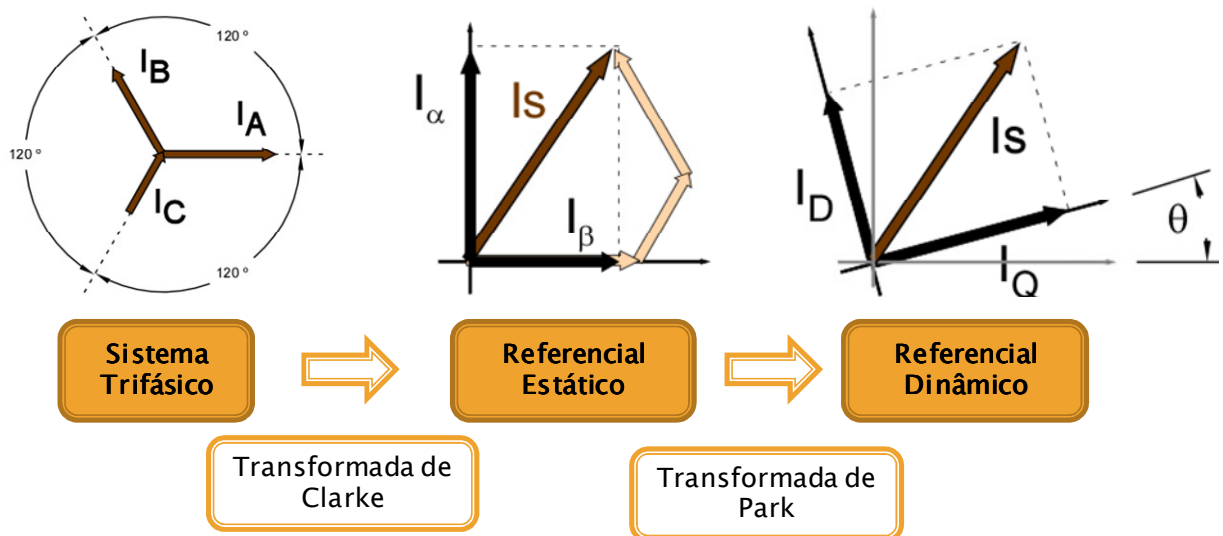


Figura 18 - Conversão do sistema trifásico no sistema dinâmico de referência

Neste sistema dinâmico solidário ao rotor, um controlador do tipo PID é utilizado para minimizar a componente D, que não gera torque. Outro controlador PID atua para controlar a componente Q, e a referência para este controlador é dada a partir de outro controlador PID que controla a velocidade de rotação.

A saída dos controladores são os níveis de tensão das bobinas representados no sistema dinâmico de referência. Através das transformada inversas de Park e Clarke é possível voltar novamente ao sistema trifásico e acionar as fases do motor, regulando a intensidade através de modulação por largura de pulso, ou PWM.

5.3.PROJETO ELÉTRICO

Para aumentar a flexibilidade para futuras modificações, reduzir as dimensões do controlador e minimizar a interferência entre o estágio de potência e o de controle, optou-se por separar o sistema em duas placas, uma de controle, responsável pela interface e lógica de comutação e controle do motor, e uma placa com as funcionalidades de pré-amplificação e amplificação de potência

5.3.1. Circuito de controle

O circuito de controle é responsável por fornecer uma interface de comunicação para sistemas externos e realizar os algoritmos de comutação do motor e controle de velocidade.

Para desempenhar o papel de interface e controle do sistema foram encontrados dois tipos de soluções no mercado. Alguns fabricantes, como é o caso da NXP, Freescale e Microchip, recomendam a programação dos algoritmos de comutação e controle num microcontrolador comum, enquanto outros fabricantes, como a International Rectifier, Fairchild e Renesas, fornecem circuitos-integrados que combinam um núcleo de processamento para programação da interface com um núcleo que gerencia as funções de comutação do motor.

Apesar de apresentarem facilidades no desenvolvimento do algoritmo de comutação, as soluções com núcleo duplo encontradas não possuem grande diversidade de interfaces como as soluções implementadas em microcontroladores. Outro problema verificado é que a maioria requer a compra de um programador ou um kit de desenvolvimento, além de alguns necessitarem de ambientes de desenvolvimento e compiladores de terceiros.

Foi feita a opção de utilizar um microcontrolador e programá-lo para realizar as funções de comutação e interface pois, embora necessite de um esforço maior no desenvolvimento do software embarcado, esta solução pode ser facilmente adaptada para diferentes tipos de interface.

O microcontrolador LPC2929 da NXP foi escolhido para implementação pois possui diversas características adequadas para controle de motores. O núcleo ARM968 de 32 bits é capaz de executar os algoritmos de comutação rapidamente e numa alta frequência e este microcontrolador possui um mecanismo em hardware para sincronização dos conversores A/D com os sinais de PWM, permitindo realizar a leitura de corrente nos instantes exatos de acionamento das fases. Além disso, o controlador de PWM pode ser configurado para atualização automática, permitindo que o processador seja utilizado exclusivamente para realizar os cálculos dos algoritmos de controle e as funcionalidade de interface.

A NXP disponibiliza um *Application Note* que trata da programação de um controlador para motores sem escovas por controle vetorial baseado na leitura de corrente do motor para a série de microcontroladores LPC2900, além de fornecer exemplos para realização das funcionalidades necessárias e algoritmos de comutação [41], facilitando o desenvolvimento do software embarcado. Outra vantagem desta solução é que é fornecido um exemplo baseado na realimentação de corrente do motor através de um único *shunt*, o que reduz os custos e também o espaço necessário nas placas de circuito impresso. O fato de o controlador realimentação de corrente permite que seja utilizado no projeto um motor sem sensores Hall, reduzindo o tamanho do motor e seu custo.

O circuito de controle foi feito com base naquele apresentado em [44]. Foram removidas as funcionalidades que não serão necessárias nesta aplicação, como leitura de encoder e sensores hall, para reduzir o espaço necessário na placa. O circuito é composto por um microcontrolador ARM9, modelo LPC2929 e circuitos auxiliares de osciladores, reguladores de tensão e interfaces de comunicação. A alimentação do sistema é feita em 12V, que é regulada através de circuitos integrados LM117 para 5V, 3.3V e 1.8V, que alimentam o microcontrolador. Foram incluídos LEDs para indicar as tensões de 12V, 5V e 3.3V, permitindo verificar rapidamente que os circuitos estão alimentados.

Foi utilizado um cristal de 16Mhz para gerar o sinal de clock para o microcontrolador. Foi incluído também um circuito integrado MCP2515 para realizar a interface entre o controlador de redes CAN do microcontrolador e o barramento de comunicação.

Foi incluído um conector para comunicação serial que será utilizado para interface com um computador para ajustes do algoritmo de controle. Para programação e depuração foi incluído um conector para interface JTAG padrão.

Dois conectores de 6 pinos são utilizados para interface com a placa de amplificação de potência. Através de um deles são enviados os sinais de PWM que controlam o acionamento do motor, e o outro é utilizado para alimentação, interface I2C com um sensor de temperatura e leitura do sinal de corrente do motor.

O diagrama esquemático do circuito final está apresentado no apêndice II.

No projeto de layout da placa foi definido o posicionamento dos conectores de interface com a placa de amplificação, furos para alinhar e fixar o sistema à estrutura do vaso de pressão. Foram inseridos todos os componentes e conectores na placa procurando uma disposição que facilitasse

o roteamento dos sinais para evitar o uso de uma placa de mais de duas camadas, que aumenta consideravelmente o custo de fabricação, além de dificultar manutenções.

Devido ao tamanho reduzido da placa, não foi possível incluir um circuito para elevação dos sinais de comunicação serial para o padrão do protocolo RS-232 utilizado nos computadores. Assim, é necessário utilizar uma placa externa para fazer a ligação com um computador durante os testes. A Figura 19 apresenta a visualização do modelo da placa em 3D

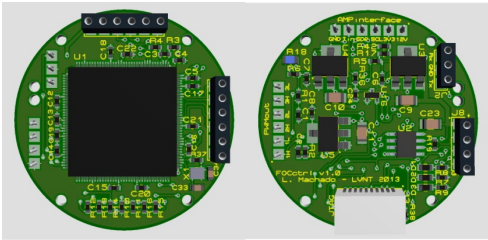


Figura 19 - Visualização em 3D da placa de controle

5.3.2. Circuito de amplificação

O circuito de amplificação é responsável por receber os sinais gerados pelo sistema de controle e amplificá-los para os níveis de tensão e potência compatíveis com o acionamento do motor.

Foram encontrados diversos componentes no mercado capazes de desempenhar satisfatoriamente a função de amplificador de potência para este projeto. Existem soluções baseadas em MOSFETs ou IGBTs, com características semelhantes de tensão máxima para o motor, tensão de alimentação e frequência de acionamento. Todas as soluções escolhidas possuem pré-amplificadores integrados e não necessitam de acoplamento óptico para interface com o microcontrolador.

A Tabela 4 apresenta as soluções encontradas e algumas de suas características.

Tabela 4 - Componentes para amplificação de potência do controlador

<i>Fabricante</i>	<i>Modelo</i>	<i>Tensão Max.</i>	<i>Corrente Max.</i>	<i>Tipo</i>	<i>Frequência máxima</i>	<i>Dimensões aproximadas</i>
ON	STK611	450 V	2 A	MOSFET	20 kHz	30x20mm
	STK5C4	450 V	3 A	IGBT	20kHz	30x20mm
ST	STGIPN3H60A	600 V	3 A	IGBT	25kHz	30x24mm
Fairchild	FSB50760SF	600 V	3.6 A	MOSFET	20kHz	30x20mm
	FNA40560	600 V	5 A	IGBT	20kHz	40x27mm

Espera-se que IGBTs apresentem menores perdas para operação em correntes reduzidas, enquanto MOSFETs devem ter melhor desempenho para correntes maiores. As perdas dependem também da temperatura de operação. [42] . Através dos experimentos retratados em [42] , é possível

verificar que para um motor de 150 W sendo acionado à 20 kHz com uma tensão de 300 V , os módulos baseados em IGBTs apresentaram menores perdas.

Portanto, foi feita a opção de utilizar o componente STGIPN3H60A, baseado em IGBTs, e que possui funcionalidades de proteção e podem ser alimentados com 12 V, tensão comumente disponível nos projetos. Além disso, suas dimensões são reduzidas, podendo ser instalado numa placa de circuito impresso com diâmetro menor que o do vaso de pressão.

O projeto do circuito foi feito com base em [45] , com as ligações dos sinais de PWM, alimentação de potência de até 300 V e alimentação de controle em 12 V e 3.3 V. Foi incluído no circuito um sensor de temperatura com interface I2C para medição da temperatura e um amplificador operacional para amplificação de um sinal de tensão gerado através de um *shunt*, que será utilizado para medição da corrente do motor.

Dois LEDs indicam a alimentação da placa e resistores posicionados entre os sinais de controle e o driver de potência têm a finalidade de limitar a corrente fornecida pelo microcontrolador.

Para acionamento do estágio de potência, este amplificador utiliza capacitores de *bootstrap*, que são carregados na inicialização do sistema através do acionamento do sinal de PWM. Esses capacitores foram dimensionados em função das características de acionamento e do motor segundo as recomendações de [49] .

O projeto da placa de potência foi feito procurando minimizar as interferências entre os sinais de alta potência e os sinais de controle, além de separar ao máximo os sinais de leitura e amplificação de corrente dos sinais de entrada e saída que variam em altas frequência. Os sinais de terra dos dois estágios foram conectados num único ponto através de um resistor de baixo valor para evitar interferências provenientes do acionamento da carga. Foram seguidas as recomendações disponíveis em [49] .

O diagrama esquemático do circuito final está apresentado no apêndice III. A visualização em 3D do resultado do projeto pode ser vista na Figura 20:

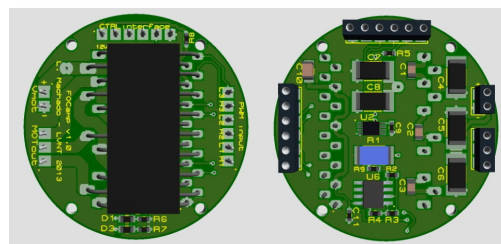


Figura 20 - Visualização em 3D da placa de amplificação projetada

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1.FABRICAÇÃO E MONTAGEM DA ESTRUTURA MECÂNICA

Uma vez finalizado o projeto em CAD, foram gerados os desenhos de fabricação para todas as peças que foram então fabricadas utilizando um torno manual. Os detalhes como rasgos de chave e furos foram feitos posteriormente utilizando uma fresadora.

O resultado da fabricação mecânica pode ser visto na Figura 21 e os desenhos de fabricação podem ser encontrados no apêndice IV.



Figura 21 - Peças da estrutura mecânica fabricadas

Para a montagem do conjunto, foi necessário efetuar ajustes em algumas peças utilizando lixas, pois o ajuste por interferência dificultava bastante o processo de montagem. Seria interessante, em futuras versões, fabricar as peças com ajustes menos interferentes e fazer a fixação das peças através de adesivos. Desta forma, é possível manter o alinhamento das peças e fazer as montagens e desmontagens do sistema mais facilmente.

Outra modificação necessária foi remover o ressalto que apoia a pista superior do rolamento traseiro. Isso se deu pois, devido a imperfeições na fabricação das peças, ao montar o sistema completo as pistas dos rolamentos ficavam pressionadas, aumentando o torque resistivo. Sem o res-

salto, liberou-se um dos graus de liberdade do rolamento, permitindo que se ajustasse na posição adequada.

Após terem sido feitos os ajustes citados, foi feita a montagem do conjunto completo. O propulsor montado ficou com dimensões de aproximadamente 190mm de comprimento e 50 mm de diâmetro, mostrando uma grande redução no comprimento com relação à última versão desenvolvida, que possuía 330mm de comprimento, além de estar incluso no novo projeto o sistema de acionamento. O resultado pode ser visto na Figura 22.



Figura 22 - Propulsor montado

6.2.FABRICAÇÃO E MONTAGEM DO SISTEMA DE ACIONAMENTO

Após o projeto das placas ter sido feito, foram gerados os arquivos no padrão GERBER, que são utilizados para fabricação. As duas placas que compõem o sistema de acionamento foram fabricadas com duas camadas, furos metalizados, verniz protetor e silk-screen para identificação dos componentes. O resultado da fabricação é apresentado na Figura 23.

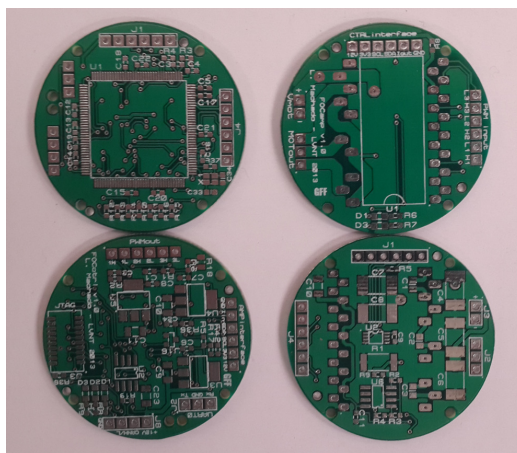


Figura 23 - Resultado da fabricação das placas de circuito impresso

A montagem dos componentes foi feita utilizando um ferro de solda manual com uma ponta fina e solda em pasta, para permitir a soldagem dos componentes SMD. As placas com os componentes montados podem ser vistas na Figura 24 e Figura 25. A Figura 26 mostra o sistema de acionamento completo, com a placa de controle e a placa de amplificação conectadas.

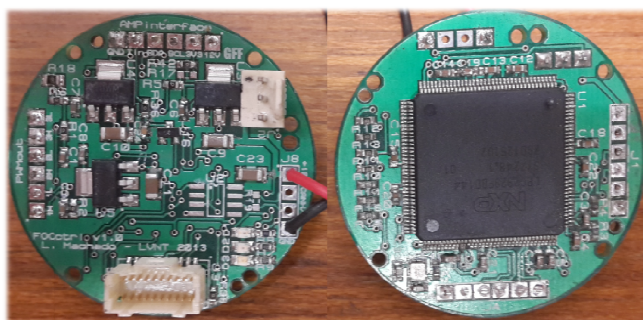


Figura 24 - Placa de controle montada

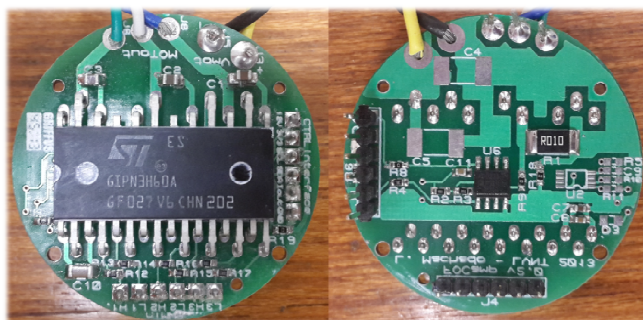


Figura 25 - Placa de amplificação montada

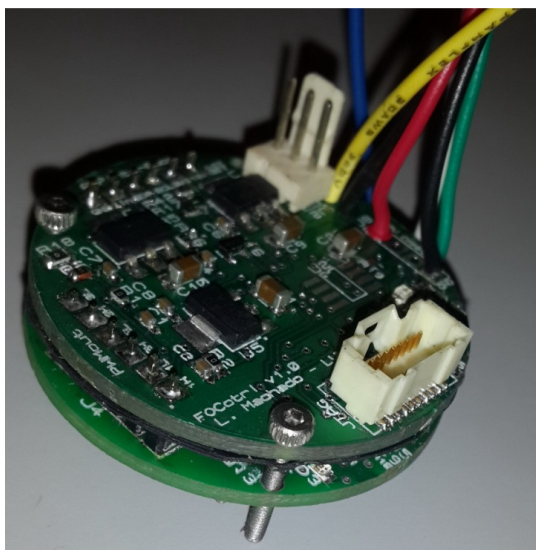


Figura 26 – Sistema de acionamento finalizado

Inicialmente foi testada a placa de controle. Foi possível verificar que os reguladores de tensão estavam funcionando adequadamente através dos LEDs instalados. Para verificar o funcionamento do microcontrolador, foi feita a sua programação através do conector de JTAG, que funcionou normalmente. O software programado foi executado e os sinais de PWM gerados para acionamento do motor foram verificados através de um osciloscópio.

A placa de amplificação foi então acoplada à placa de controle e alimentada inicialmente com uma tensão de 12 V e os sinais de saída foram verificados num osciloscópio. Ao conectar o motor, foi possível verificar que ocorreu grande interferência nos sinais gerados pelo microcontrolador, que possuíam tensão de 3.3 V pico a pico e passaram a ter ruídos com picos de 4.5 V. Ao elevar a tensão de alimentação do estágio de potência de 12 para 24 V, os ruídos nos sinais de controle se tornaram muito altos, queimando o microcontrolador.

Para evitar a interferência o projeto da placa de amplificação foi refeito, procurando separar ao máximo os três principais grupos de sinais existentes: Sinais de alta tensão e alta frequência que acionam o motor, sinais de alta frequência e baixa tensão que são gerados pelo microcontrolador e sinais analógicos de baixa tensão e baixa frequência para leitura da corrente do motor. Além disso, os terras da alimentação de potência e da alimentação de controle foram conectados num único ponto, através de um resistor de resistência nula, evitando o acoplamento de ruídos.

Com essas modificações, o ruído nos sinais de controle foi reduzido a níveis imperceptíveis, e foi possível acionar o motor com tensão de até 50 V.

A tensão de alimentação ficou limitada devido aos capacitores de *bootstrap* do sistema de acionamento, responsáveis por elevar a tensão na base dos IGBTs até os níveis necessários para seu chaveamento. Apesar destes capacitores normalmente estarem sujeitos à tensão da alimentação de controle, na faixa de 12 V, verificou-se que ocorrem transientes durante o acionamento das fases com picos de tensão correspondes à alimentação de potência. Como os capacitores disponíveis no encapsulamento 0805 que foi utilizado suportavam tensões de no máximo 25 V, foram utilizados três capacitores em série para elevar a tensão máxima para 75 V. A alimentação do sistema foi limitada à 65 V para manter uma faixa de segurança.

Como o motor utilizado possui constante de rotação de aproximadamente 23 rpm/V, o acionamento do motor foi limitado à rotações de 1400 rpm

6.3. Ajustes e calibração do algoritmo de acionamento

Com todo o sistema montado, foi iniciado o processo de ajustes do algoritmo responsável pela comutação e controle de rotação do motor. Nota-se que o sistema utilizado, baseado na realimentação de corrente do motor para estimação do ângulo do rotor e velocidade de rotação, é fortemente dependente da calibração de seus algoritmos de controle e parâmetros utilizados para estimação. Alguns parâmetros são de fácil configuração, como a resistência e indutância das fases do motor. No entanto, os ganhos do observador por modos deslizantes e a constante de filtragem para estimação da força contraeletromotriz se mostraram de difícil ajuste. Para ajustar todos os parâmetros adequadamente, seria necessário fazer o projeto de uma placa que incluísse também a leitura de um sensor de rotação como, por exemplo, um *encoder* óptico. Assim, seria possível exibir num gráfico os valores lidos de rotação e posição angular e compará-los aos valores fornecidos pelo estimador. Este sistema, com realimentação mais precisa, seria necessário apenas no início do processo, para calibrar as constantes de ajuste do observador e dos controladores de rotação e de campo. Após definidas as constantes, poderia ser utilizado o controlador apenas com realimentação de corrente, já que as constantes definidas dependem do motor utilizado e das condições de operação, que seriam mantidos constantes.

A estimação da corrente foi verificada através de gráficos com a corrente estimada e a corrente real medida, em ensaios realizados para diferentes rotações. Não foi obtido um resultado ótimo, porém foi possível limitar o erro a valores baixos, permitindo testar o acionamento do motor em diferentes velocidades. A Figura 27 mostra o resultado para velocidade de 100 rpm.

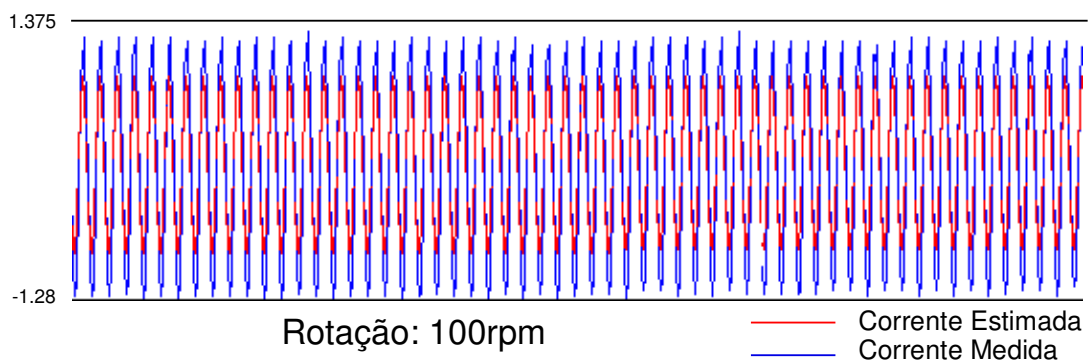


Figura 27 - Comparação entre correntes estimada e medida para rotação de 100 rpm

Após uma calibragem inicial, foram realizados alguns testes para verificar a velocidade de rotação gerada pelo motor em função da velocidade de referência. A rotação foi aferida utilizando um tacômetro manual com medição por laser, e a rotação foi medida na saída do redutor planetário com razão de redução de 4.3:1. Os resultados podem ser visto na Tabela 5 e no gráfico da Figura 28. A Figura 29 mostra o arranjo experimental utilizado no teste.

Tabela 5 – Resultados do ensaio de bancada do propulsor

<i>Referência (rpm)</i>	<i>Rotação na saída do redutor (rpm)</i>	<i>Rotação no eixo do motor (rpm)</i>	<i>Erro (rpm)</i>	<i>Erro percentual (%)</i>
100	22.4	96.32	3.68	3.68%
200	44.8	192.64	7.36	3.68%
300	67.1	288.53	11.47	3.82%
400	89.7	385.71	14.29	3.57%
500	112	481.6	18.4	3.68%
600	134.5	578.35	21.65	3.61%
700	156.8	674.24	25.76	3.68%
800	179.3	770.99	29.01	3.63%
900	201.7	867.31	32.69	3.63%
1000	224.1	963.63	36.37	3.64%
1100	246.5	1059.95	40.05	3.64%
1200	269	1156.7	43.3	3.61%
1300	291.4	1253.02	46.98	3.61%
1400	313.9	1349.77	50.23	3.59%

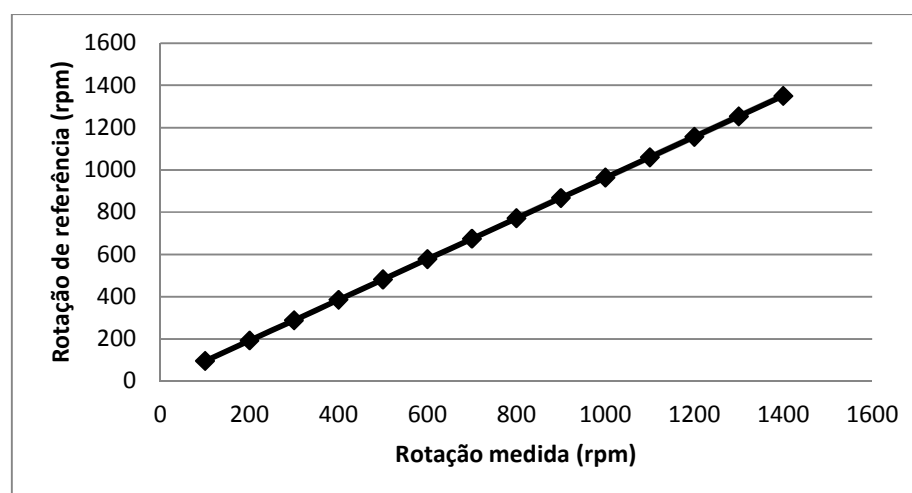


Figura 28 - Gráfico da rotação do motor em função da rotação de referência

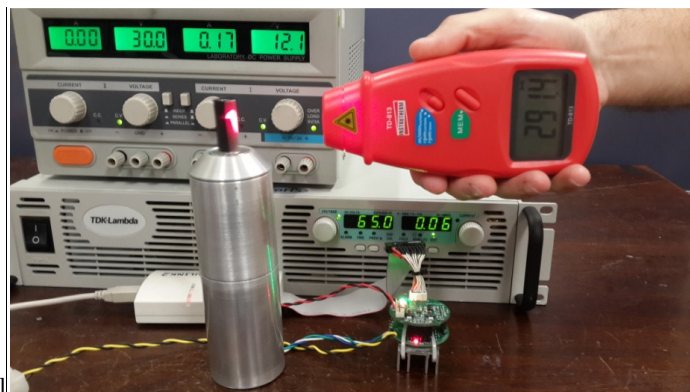


Figura 29 - Ensaio de bancada do propulsor

A rotação máxima atingida nos ensaios foi de aproximadamente 1400 rpm devido à limitações na tensão de alimentação do sistema.

Através da análise dos dados levantados é possível verificar um erro sistemático de, em média, 3.65% na rotação em relação à rotação de referência. Esse erro poderá ser eliminado através de um ajuste mais preciso nos controladores e nos parâmetros do algoritmo.

Foi feito um teste para verificar a resposta do controlador à um degrau de 1400 rpm, cujo gráfico pode ser visto na Figura 30. e a Figura 31 mostra o controle de rotação quando aplicado um torque resistivo no eixo do motor, sendo possível verificar o aumento da corrente total para manter a rotação constante.

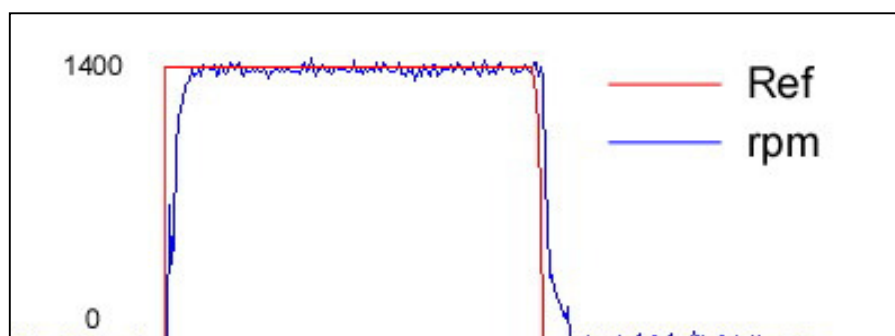


Figura 30 - Resposta ao degrau de 1400 rpm

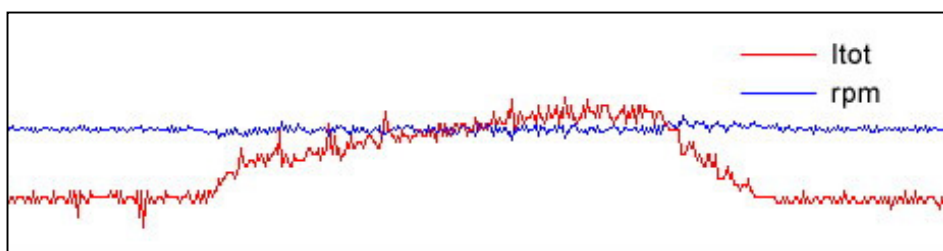


Figura 31 - Controle de rotação

7. CONCLUSÃO

O projeto de um propulsor desenvolvido teve grande importância para o desenvolvimento de atividades do Laboratório de Veículos não tripulados e forneceu um protótipo para iniciar o desenvolvimento de uma nova geração de propulsores com diversas vantagens sobre os propulsores desenvolvidos anteriormente.

Com este projeto foi possível obter uma grande redução nas dimensões finais do propulsor, comparativamente com as versões desenvolvidas anteriormente, viabilizando assim o projeto de veículos mais compactos.

O uso de um motor sem escovas, ao invés dos motores de corrente contínua com escovas utilizados anteriormente, confere maior confiabilidade e eficiência ao propulsor. Além disso, é possível efetuar testes de operação do propulsor imerso em óleo para resistência a maiores profundidades.

A integração do sistema de acionamento na estrutura do motor evita ocupar volumes em outros vasos de pressão dos veículos, permitindo que o propulsor seja utilizado em veículos com restrições de espaço. A integração do sistema de acionamento numa estrutura compacta foi favorecida pela sofisticação do algoritmo de controle vetorial com realimentação de corrente através de um único sensor. Além de apresentar maior eficiência do que sistemas baseados em comutação trapezoidal ou senoidal, o algoritmo utilizado permite reduzir o tamanho e o custo do sistema, por não necessitar de sensores caros e com grandes dimensões.

O projeto mecânico separado em duas estruturas resultou num propulsor com grande flexibilidade para modificações futuras, seja no sistema de atuação, motor e controlador, ou no redutor e sistema de vedação, facilitando futuros desenvolvimentos e novas evoluções do projeto.

Com a realização de testes do sistema de acionamento, foi possível verificar a importância de desenvolver um sistema para auxiliar na calibração de seus controladores e estimador, permitindo que seja atingida a eficiência máxima do sistema.

A fabricação e montagem do protótipo permitiu identificar as deficiências do projeto mecânico referentes a ajustes e interferências entre as peças. Em futuras versões estes problemas poderão ser corrigidos facilmente, reduzindo a interferência na montagem das peças e utilizando adesivos para fixação quando necessário.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] VALAVANIS, K.P.; GRACANIN, D.; MATIJASEVIC, M.; KOLLURU, R.; DEMETRIOU, G.A., 1997 . Control architectures for autonomous underwater vehicles. *Control Systems, IEEE*, vol.17, no.6, pp.48,64. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=642974&isnumber=13983>>
- [2] PATRÍCIA RAMOS, AND MÁRIO V. NEVES, 2009. Environmental Impact Assessment and Management of Sewage Outfall Discharges Using AUV'S, Underwater Vehicles. *Alexander V. Inzartsev (Ed.), InTech*, Disponível em: <http://www.intechopen.com/books/underwater_vehicles/environmental_impact_assessment_and_management_of_sewage_outfall_discharges_using_aUvs>
- [3] WANG, W.H.; CHEN, X.Q.; MARBURG, A.; CHASE, J.G.; HANN, C.E., 2008. A Low-Cost Unmanned Underwater Vehicle Prototype for Shallow Water Tasks. *Mechatronic and Embedded Systems and Applications, MESA 2008. IEEE/ASME International Conference on*, vol., no., pp.204,209, Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4735649&isnumber=4735645>>
- [4] JOHANSSON, B.; SIESJO, J.; FURUHOLMEN, M., 2010. Seaeye Sabertooth A Hybrid AUV/ROV offshore system. *OCEANS*, vol., no., pp.1,3, 20-23. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5663842&isnumber=5663781>>
- [5] MEINECKE, G.; RATMEYER, V.; RENKEN, J., 2011. HYBRID-ROV - Development of a new underwater vehicle for high-risk areas. *OCEANS 2011* , vol., no., pp.1,6, 19-22 Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6106913&isnumber=6106891>>
- [6] SAUNDERS, A.; NAHON, M., 2002. The effect of forward vehicle velocity on through-body AUV tunnel thruster performance. *OCEANS '02 MTS/IEEE* , vol.1, no.,

- pp.250,259 vol.1, 29-31. Disponível em:
<<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1193280&isnumber=26720>>
- [7] DE BARROS, E. A., L. O. FREIRE, J.L.D. DANTAS, 2010. Development of the Pirajuba AUV. *Proc. Of CAMS*. Rostock. Germany.
- [8] DE BARROS, E.A.,DANTAS, J.L.D. FREIRE, L.O.,OLIVEIRA, L.M.; ZANONI, F.D., VALE, R.T.S, 2011. New Aspects in the Pirajuba AUV. *Project Proc. Of the Brazilian Conference of Mechanical Engineering*. Natal. Brasil.
- [9] DE BARROS, E.A.; DANTAS, J.L.D., FREIRE, L. O. STOETERAU, R.L., 2012. An AUV Project Applied to Studies on Manoeuvrability of Underwater Vehicles. “*Further Advances in Unmanned Marine Vehicles*”. G.N. Roberts, R. Sutton. The Institution of Engineering and Technology.
- [10] Notícia publicada na seção de Comunicação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. *Poli/USP desenvolve veículos subaquáticos não tripulados*. Disponível em:
<<http://www3.poli.usp.br/pt/comunicacao/noticias/1174-poliusp-desenvolve-veiculos-subaquaticos-nao-tripulados.html>>. Acesso em Maio de 2013.
- [11] BRADLEY, A.M.; FEEZOR, M.D.; SINGH, H.; SORRELL, F. YATES, 2001. Power systems for autonomous underwater vehicles. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of* , vol.26, no.4, pp.526,538,. Disponível em:
<<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=972089&isnumber=20953>>
- [12] HERMAN, D.A.; KOSTENKO, V. V.; MOKEEVA, I. G., 1994. Choice of ROV's thruster set power according to footprint's radius on steady motion. *OCEANS '94. 'Oceans Engineering for Today's Technology and Tomorrow's Preservation.'* *Proceedings*, vol.3, no., pp.III/453,III/456 vol.3, 13-16. Disponível em:
<<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=364241&isnumber=8344>>
- [13] ASSIS, FÁBIO HENRIQUE DE., 2006. *Projeto mecânico de um veículo autônomo submarino de baixo custo baseado em ferramentas numéricas*. Monografia, Mestrado em Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, USP, São Paulo.

- [14] VILLAS BOAS, FÁBIO, 2006. *Desenvolvimento de uma ferramenta de CAD aplicada ao projeto de hélices para veículos aquáticos não tripulados*. Monografia, Mestrado em Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, USP, São Paulo.
- [15] Panfleto de dados dos propulsores modelo 300 da Tecnadyne. Disponível em <<http://www.tecnadyne.com/cms/images/products/pdf/Model%20300%20Brochure.pdf>>. Acesso em Abril de 2013
- [16] Descrição dos propulsores da sub-Atlantic. Disponível em <http://www.f-e-t.com/our_products_technologies/subsea-solutions/components-and-tooling/thrusters/brushless-dc-electric-thrusters/>. Acesso em Abril de 2013
- [17] Descrição dos propulsores da SeaBotix. Disponível em <http://www.seabotix.com/products/auv_thrusters.htm>. Acesso em Abril de 2013.
- [18] Descrição dos propulsores da DSSI “SEA MAX 2000 Series Thrusters”. Disponível em: <<http://www.deepseasystems.com/2000.htm>>. Acesso em Maio de 2013.
- [19] Descrição dos propulsores da SeaEye. Disponível em <<http://www.seaeye.com/thrusters.html>>. Acesso em Maio de 2013.
- [20] JUN RONG; YIMING LI, 2011. Modeling and simulation of the double-closed loop control system of counter rotating permanent magnet brushless DC motor. *Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT), 2011 International Conference on* , vol.7, no., pp.3309,3313, 12-14. Disponível em <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6023793&isnumber=6023053>>
- [21] STEVENSON, P.; HUNTER, C. A., 1994. Development of an efficient propulsion motor and driver for use in the deep ocean. *Electronic Engineering in Oceanography, 1994., Sixth International Conference on* , vol., no., pp.51,55, 19-. Disponível em <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=337084&isnumber=7916>>

- [22] FENGGE ZHANG; GUANGWEI LIU; YONGSHAN SHEN; FENGXIANG WANG, 2007. Characteristic study on a novel PMSM with opposite-rotation dual rotors. *Electrical Machines and Systems, 2007. ICEMS. International Conference on*, vol., no., pp.805,809, 8-11. Disponível em <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4412195&isnumber=4411938>>
- [23] ZAMANI, H.; KARIMI, M.H.; KANZI, K.; VASHEGHANI, Q., 2013. Vector control of Counter-Rotating Permanent Magnet Synchronous Motor for underwater propulsion application. *Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC), 2013 4th*, vol., no., pp.44,48. Disponível em <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6506670&isnumber=6506654>>
- [24] ABU SHARKH, S. M.; HARRIS, M.R.; STOLL, R.L., 1995. Design and performance of an integrated thruster motor. *Electrical Machines and Drives, 1995. Seventh International Conference on* (Conf. Publ. No. 412) , vol., no., pp.395,399, 11-13 Sep 1995. Disponível em <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=497763&isnumber=10613>>
- [25] MIN-FU HSIEH; JENG-HORNG CHEN; YU-HAN YEH; CHI-LU LEE; PO-HSUN CHEN; YOU-CHIUAN HSU; YEN-HUNG CHEN. 2007. Integrated Design and Realization of a Hubless Rim-driven Thruster. *Industrial Electronics Society. IECON 2007. 33rd Annual Conference of the IEEE* , vol., no., pp.3033,3038, Disponível em <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4460298&isnumber=4459874>>
- [26] ABU-SHARKH, S.; HARRIS, M., 1996. Electric thrusters for autonomous underwater vehicles. *Autonomous Underwater Vehicles and their Systems - Recent Developments and Future Prospects, IEE Colloquium on*, vol., no., pp.5/1,5/6. Disponível em <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=543750&isnumber=11830>>

- [27] E.A. DE BARROS, J.L.D. DANTAS, 2012. Effect of a propeller duct on AUV maneuverability. *Ocean Engineering, Volume 42*, Pages 61-70. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801812000297>>
- [28] FISH, F E., 2006. Limits of nature and advances of technology: What does biomimetics have to offer to aquatic robots?. *Appl. Bion. Biomech.* 3(1), 49-60.
- [29] KOPMAN, V.; PORFIRI, M., 2013. Design, Modeling, and Characterization of a Miniature Robotic Fish for Research and Education in Biomimetics and Bioinspiration. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on* , vol.18, no.2, pp.471,483. Disponível em <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6353936&isnumber=6410053>>
- [30] DAIBING ZHANG; LOW, K. H.; HAIBIN XIE; LINCHENG SHEN, 2009. Advances and Trends of Bionic Underwater Propulsors. *Intelligent Systems, 2009. GCIS '09. WRI Global Congress on* , vol.1, no., pp.13,19, 19-21. Disponível em <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5209036&isnumber=5208951>>
- [31] MAN, S.G.K.; PHILLIPS, A.B.; BOYD, S.W.; BLAKE, J.I.R.; GRIFFITHS, G., 2012. Bio-inspired aquatic flight propulsion system for agile and manoeuvrable underwater vehicles. *OCEANS, 2012 - Yeosu*, vol., no., pp.1,10, 21-. Disponível em <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6263515&isnumber=6263358>>
- [32] CHUNLIN ZHOU; LOW, K. H., 2012. Design and Locomotion Control of a Biomimetic Underwater Vehicle With Fin Propulsion. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, vol.17, no.1, pp.25,35. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6104154&isnumber=6126206>>
- [33] SFAKIOTAKIS, M.; KAZAKIDI, A.; PATEROMICHELAKIS, N.; EKATERINARIS, J.A.; TSAKIRIS, D.P., 2012. Robotic underwater propulsion inspired

- by the octopus multi-arm swimming. *Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on*, vol., no., pp.3833,3839. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6225301&isnumber=6224548>>
- [34] GIORGIO SERCHI, F.; ARIENTI, A.; LASCHI, C., 2013. Biomimetic Vortex Propulsion: Toward the New Paradigm of Soft Unmanned Underwater Vehicles. *Mechanics, IEEE/ASME Transactions on*, vol.18, no.2, pp.484,493. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6329967&isnumber=6410053>>
- [35] BACHMAYER, R.; LEONARD, N.E.; GRAVER, J.; FIORELLI, E.; BHATTA, P.; PALEY, D., 2004. Underwater gliders: recent developments and future applications. *Underwater Technology, 2004. UT '04. 2004 International Symposium on*, vol., no., pp.195,200. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1405540&isnumber=30458>>
- [36] DE CARVALHO, D.; FILHO, T.F.B.; SCHEENEBELI, H.A., 2000. Adapting a PMDC brush motor to work like a thruster in a ROV. *Circuits and Systems, 2000. Proceedings of the 43rd IEEE Midwest Symposium on*, vol.2, no., pp.738,741. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=952862&isnumber=20602>>
- [37] IWANOWSKI, M.; JOHNSTON, J., 1981. Development of Immersible Electric Motors for a Small Inspection Class Remote Controlled Vehicle. *OCEANS 81*, vol., no., pp.1168,1169. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1151534&isnumber=25889>>
- [38] LYSHEVSKI, S.E.; EGAN, C.J.; RAPOSA, J.R.; MENOZZI, A.; THIVIERGE, D.; GODDU, G.; SMITH, L., 2000. Control of high-performance permanent-magnet synchronous motors for underwater vehicles. *American Control Conference, 2000. Proceedings of the 2000*, vol.1, no.6, pp.90,94 vol.1. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=878778&isnumber=19018>>

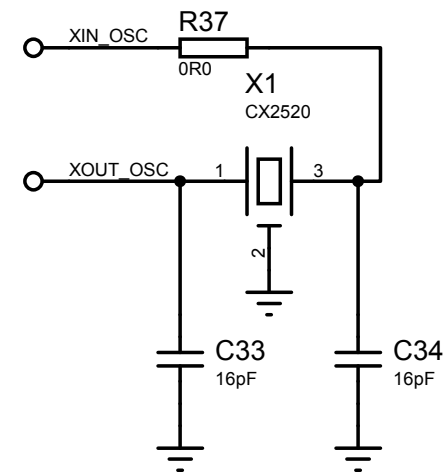
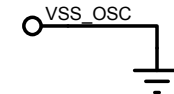
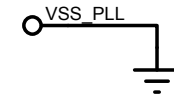
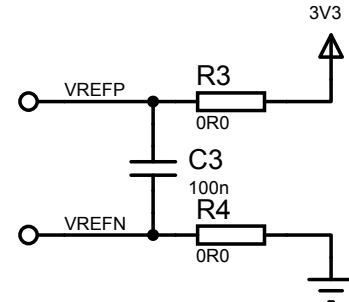
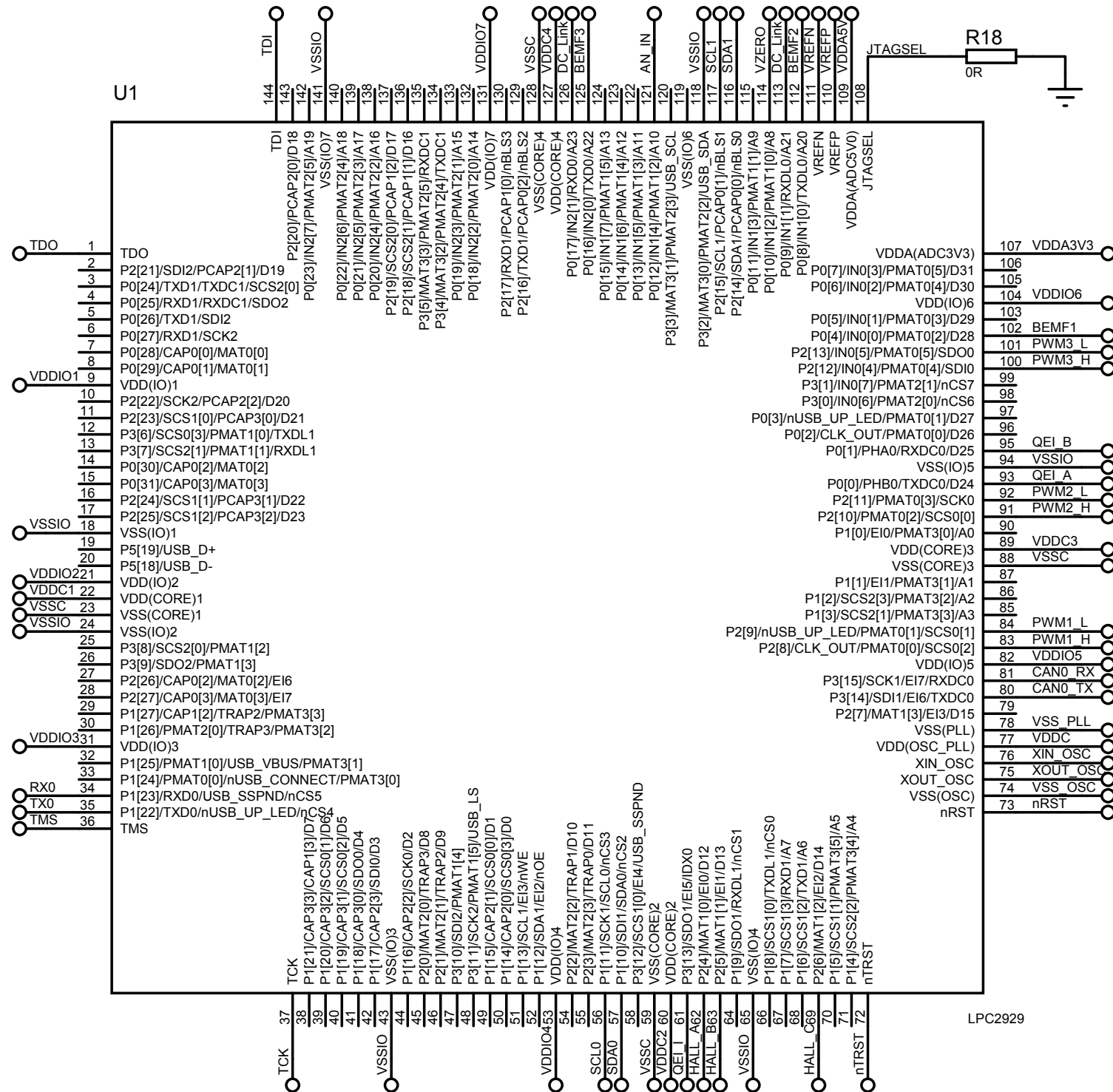
- [39] LEE, S.; LEMLEY, T. *A Comparison Study of The Commutation Methods For The Three-Phase Permanent Magnet Brushless DC Motor*. Disponível em: <http://www.magnetlab.com/uploads/4c51d9ba6fe5a.pdf>. Acesso em Junho 2013
- [40] IIZUKA, KENICHI; UZUHASHI, HIDEO; KANO, MINORU; ENDO, T.; MOHRI, KATSUO, 1985. Microcomputer Control for Sensorless Brushless Motor. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol.IA-21, no.3, pp.595,601. Disponível em <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4158031&isnumber=4158021>>
- [41] Application Note. AN10899 - Sensorless single-shunt FOC on LPC2900. NXP: Disponível em <www.nxp.com/documents/application_note/AN10899.pdf>. Acesso em Junho de 2013.
- [42] MAN-KEE KIM; HYUN-SOO BAE; BUM-SEOK SUH, 2006. Comparison of IGBT and MOSFET Inverters in Low-Power BLDC Motor Drives. *Power Electronics Specialists Conference, 2006. PESC '06. 37th IEEE*, vol., no., pp.1,4. Disponível em <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1712140&isnumber=36090>>
- [43] Blake, C. Bull, C. *IGBT or MOSFET: Choose Wisely*. International Rectifier. Disponível em < <http://www.irf.com/technical-info/whitepaper/choosewisely.pdf>>
- [44] Application Note. AN10899 - Sensorless single-shunt FOC on LPC2900. NXP: Disponível em <www.nxp.com/documents/application_note/AN10899.pdf>. Acesso em Setembro de 2013.
- [45] Folha de dados do componente STGIPN3H60A. ST Microelectronics: Disponível em <<http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/DM00032612.pdf>>. Acesso em Setembro de 2013.
- [46] Manual do Usuário dos motores da série Frameless Kit Motors. Parker: Disponível em <http://divapps.parker.com/divapps/emn/download/Gearheads/motor_manual.pdf>. Acesso em Setembro de 2013.

- [47] Catálogo Vedabrás de vedação: Disponível em <http://www.vedabras.com.br/website/pt_br/catalogo_vedabras.zip>. Acesso em Setembro de 2013.
- [48] Livro de referência para O-Rings. Parker : Disponível em <http://www.parker.com/literature/ORD%205700%20Parker_O-Ring_Handbook.pdf>. Acesso em Setembro de 2013.
- [49] Application Note. AN4043 - SLLIMM™-nano small low-loss intelligent molded module. ST Microelectronics: Disponível em < http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/application_note/DM00047102.pdf>. Acesso em Setembro de 2013.

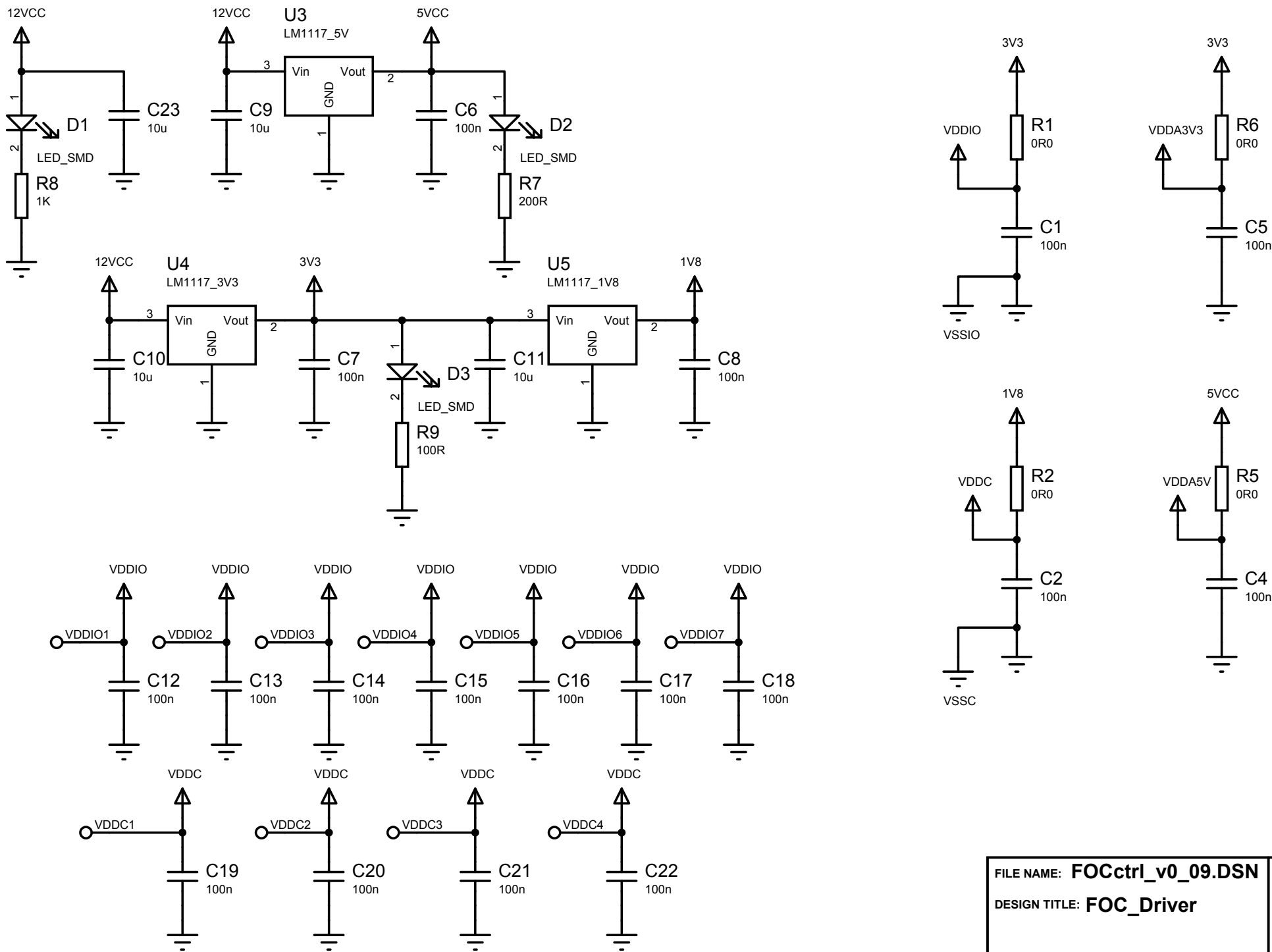
Apêndice I – Desenho de conjunto da estrutura mecânica do propulsor

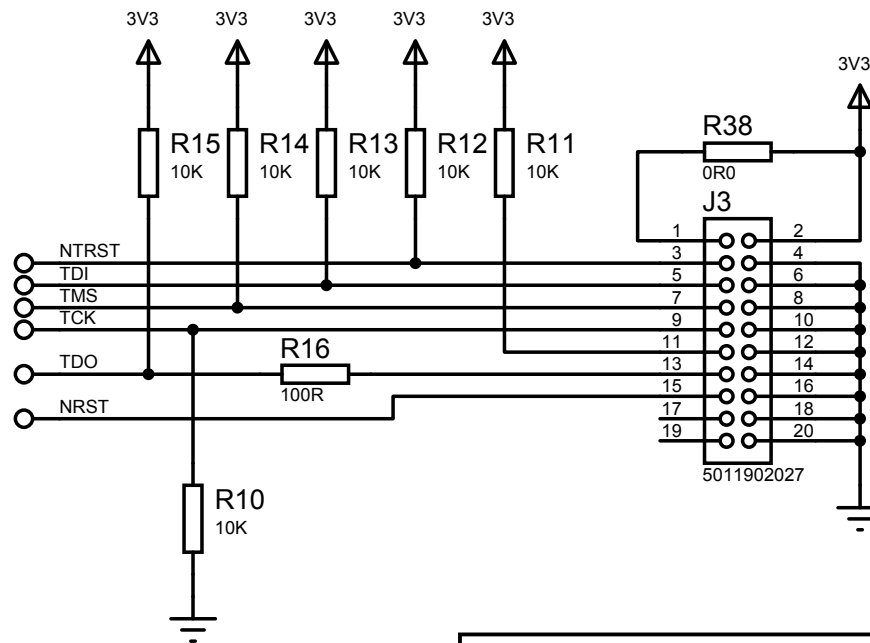
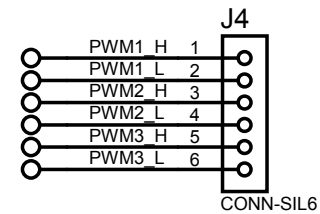
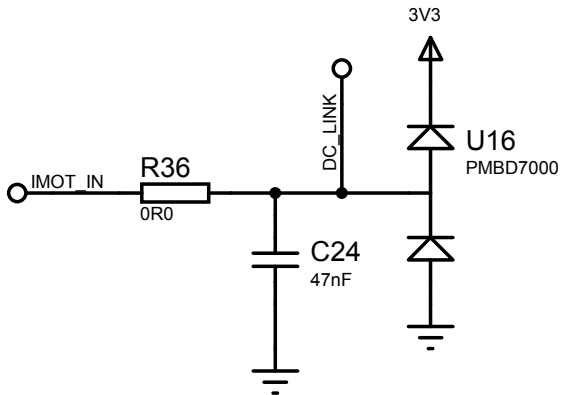
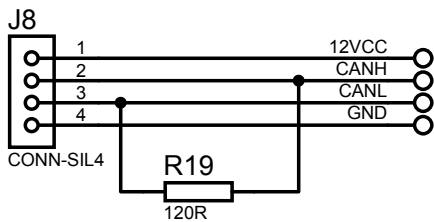
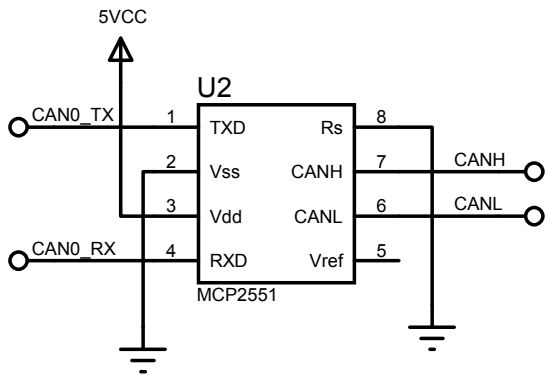
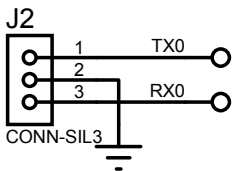
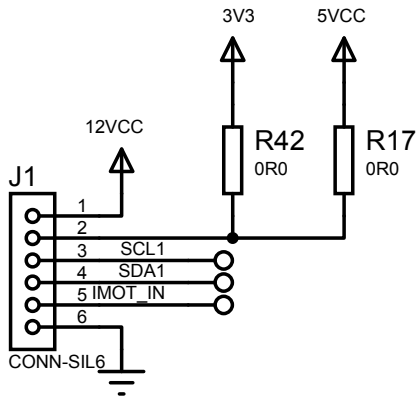
Apêndice II – Circuito da placa de controle do sistema de acionamento

U1



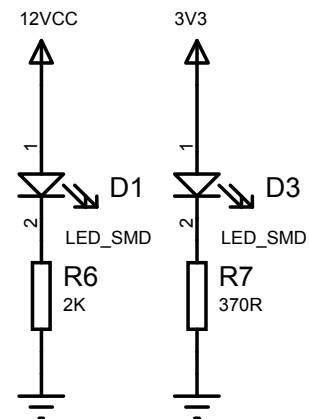
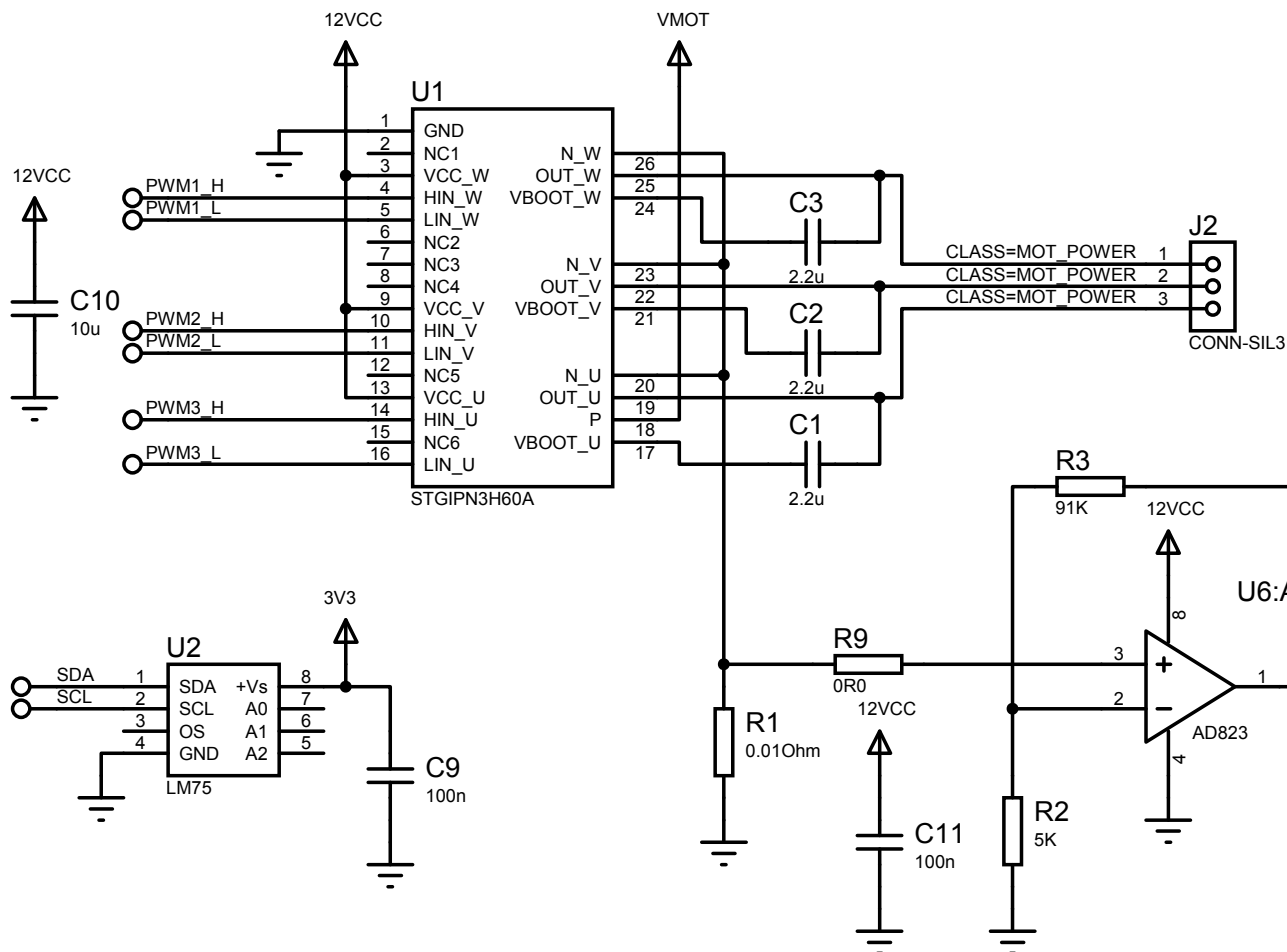
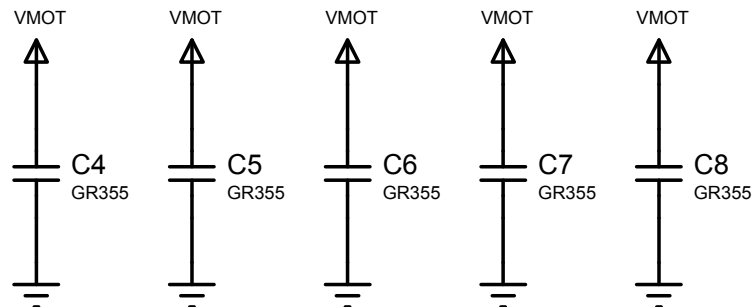
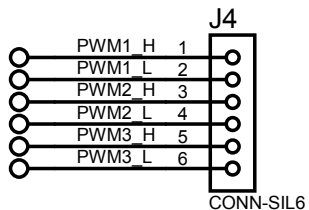
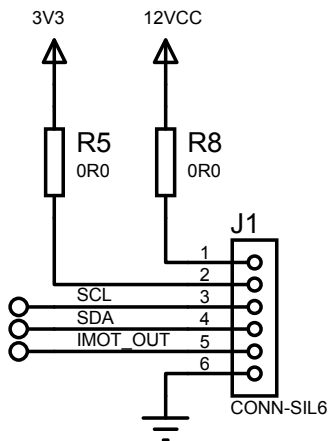
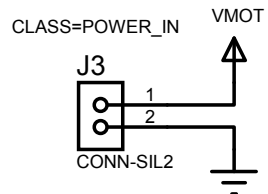
FILE NAME: FOCctrl_v0_09.DSN	DATE: 8/5/2013
DESIGN TITLE: FOC_Driver	PAGE: 1 of 3
BY: L. Machado	REV: 1.0
	TIME: 9:26:20 AM





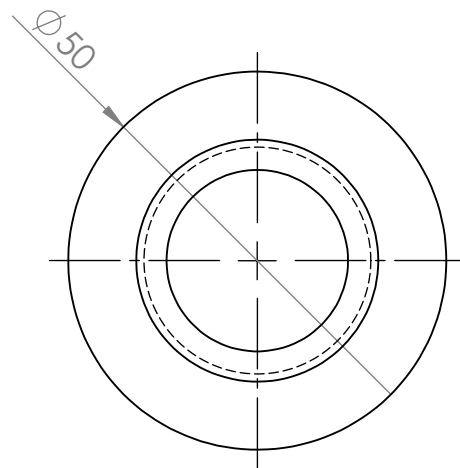
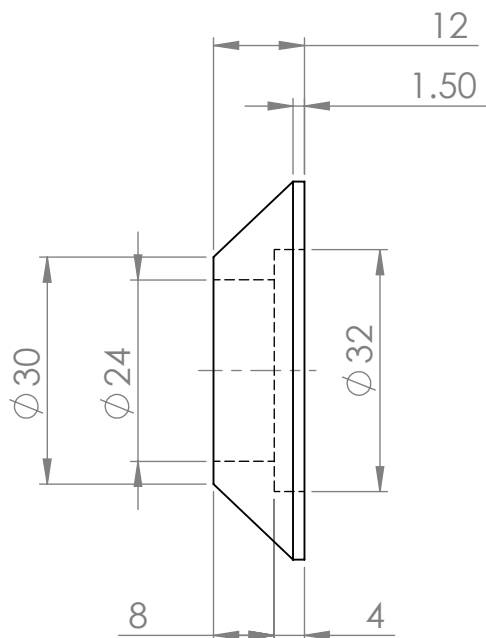
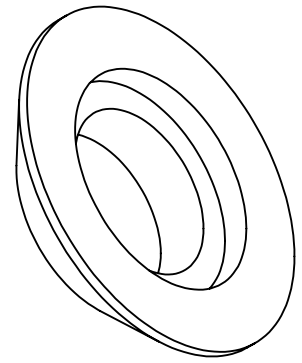
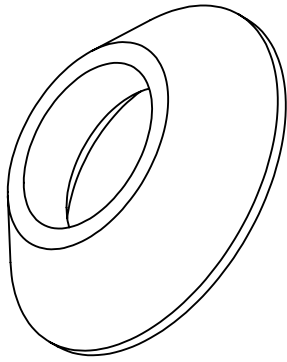
FILE NAME: FOCctrl_v0_09.DSN		DATE:
DESIGN TITLE: FOC_Driver		8/5/2013
BY: L. Machado		PAGE:
REV: 1.0		3 of 3
		TIME: 9:26:20 AM

Apêndice III – Circuito da placa de amplificação do sistema de acionamento

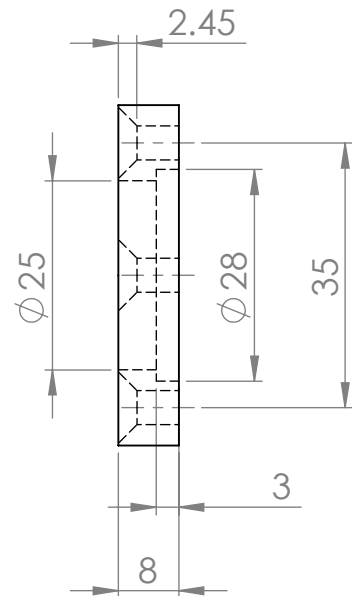


FILE NAME: FOCamp_v0_04.DSN	DATE: 9/28/2013
DESIGN TITLE: FOCamp	PAGE: 1 of 1
BY: L. Machado	REV: 1.0
	TIME:11:51:47 AM

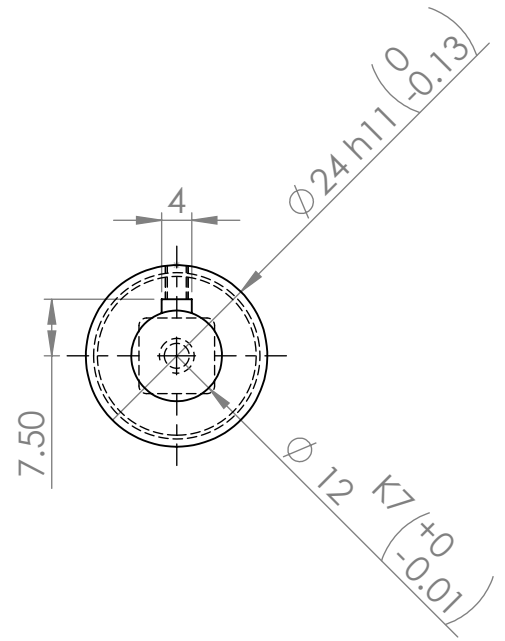
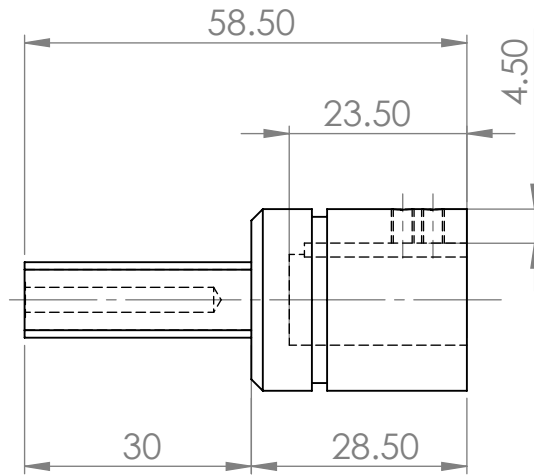
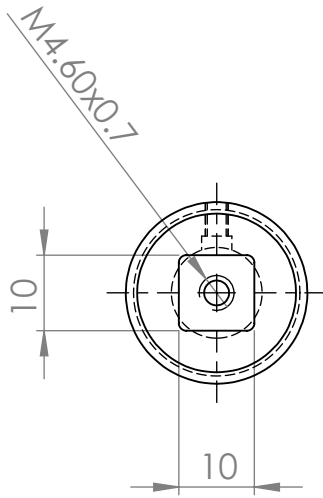
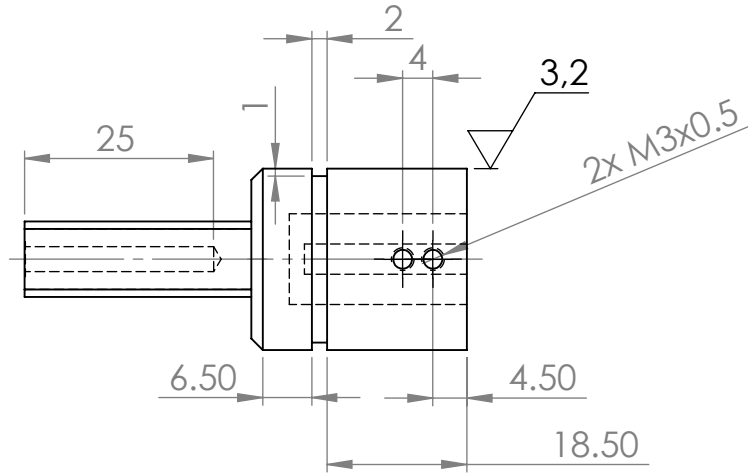
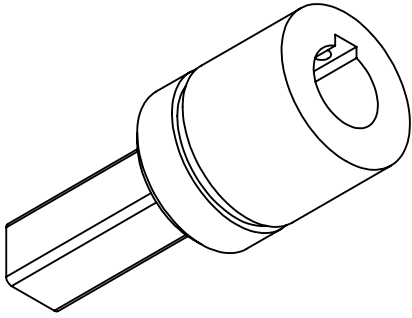
Apêndice IV – Desenhos de fabricação das partes da estrutura mecânica



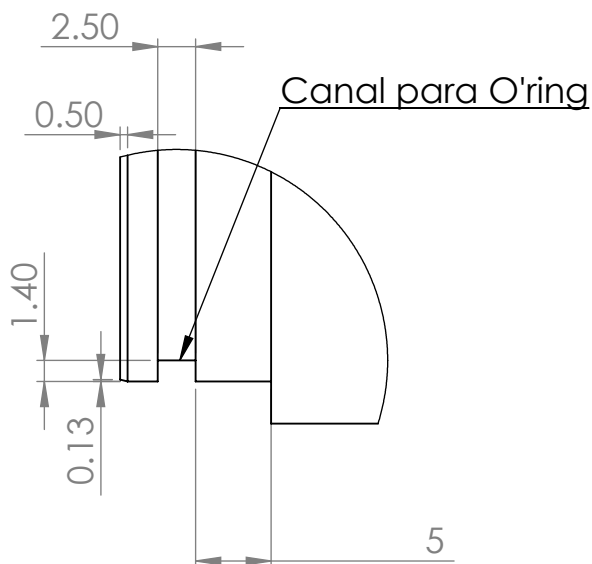
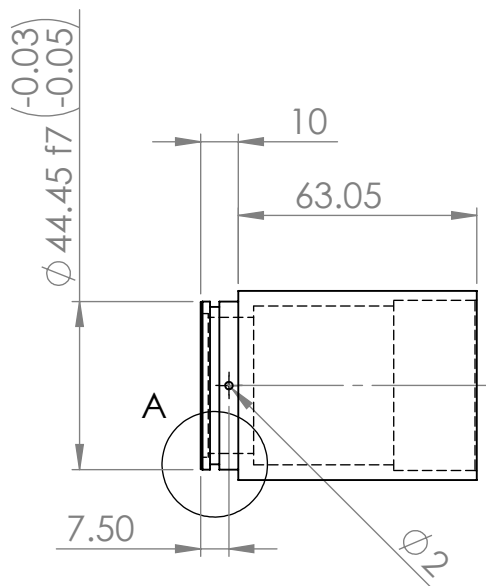
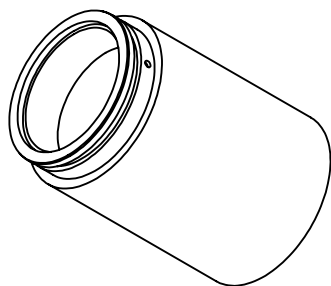
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: + 0.1mm ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN		NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:	
CHK'D								FOCThruster_Cone	
APPV'D									
MFG									
Q.A									
						MATERIAL:		DWG NO.	
						Alumínio		A4	
						WEIGHT:		SCALE:1:1	
								SHEET 1 OF 1	



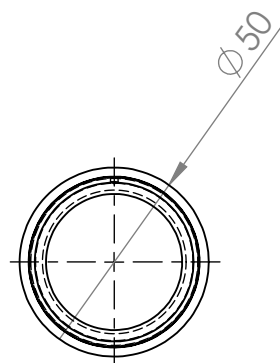
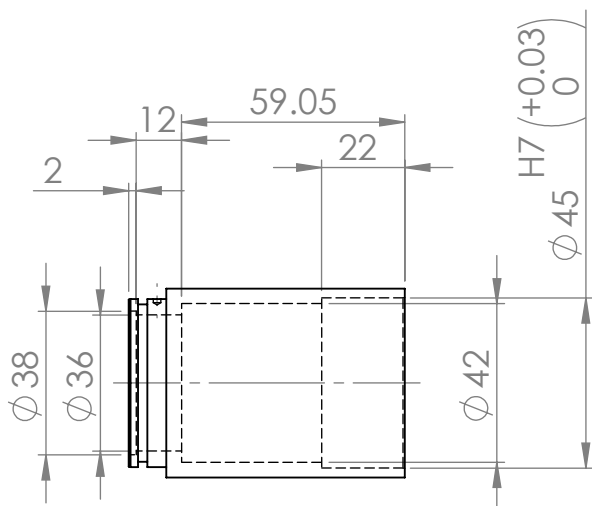
SHEET 1 OF 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: 0.1mm ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:		FOCThruster_Eixo_Hélice	
DRAWN									
CHK'D									
APPV'D									
MFG									
Q.A				MATERIAL:		DWG NO.		A4	
				WEIGHT:		SCALE:1:1		SHEET 1 OF 1	



DETAIL A
SCALE 2 : 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR: 0.1mm
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A					
			MATERIAL:		
			Alumínio		
			WEIGHT:		

TITLE:

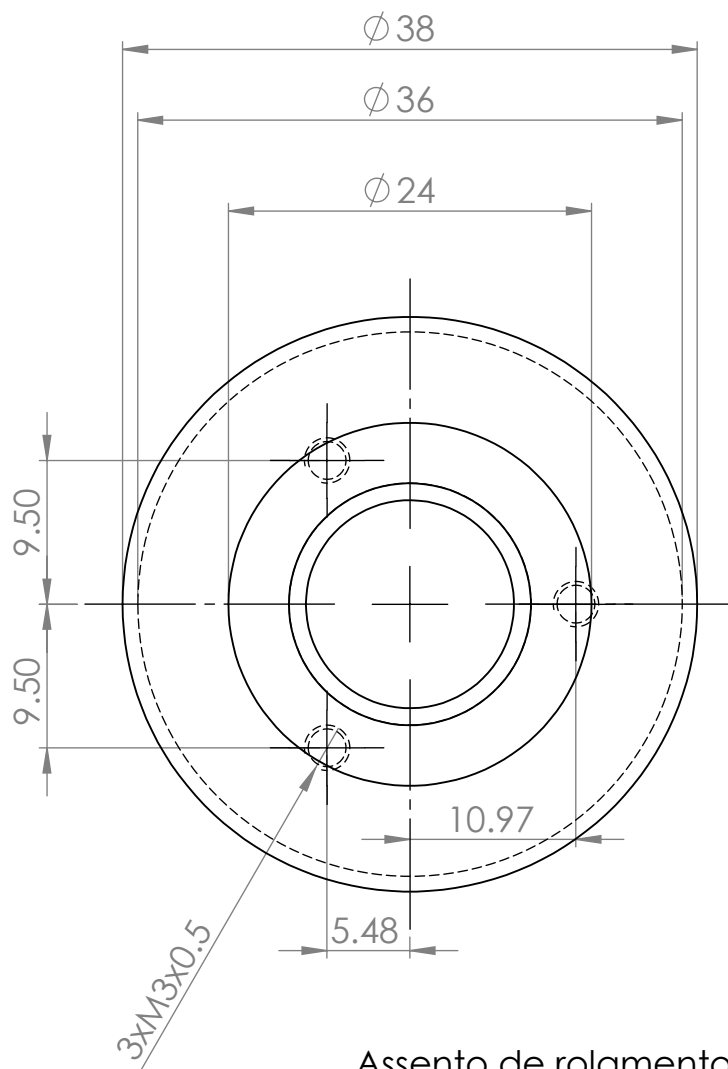
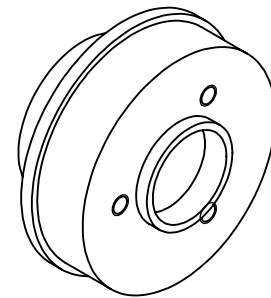
FOCThruster_Gear_Vessel

DWG NO.

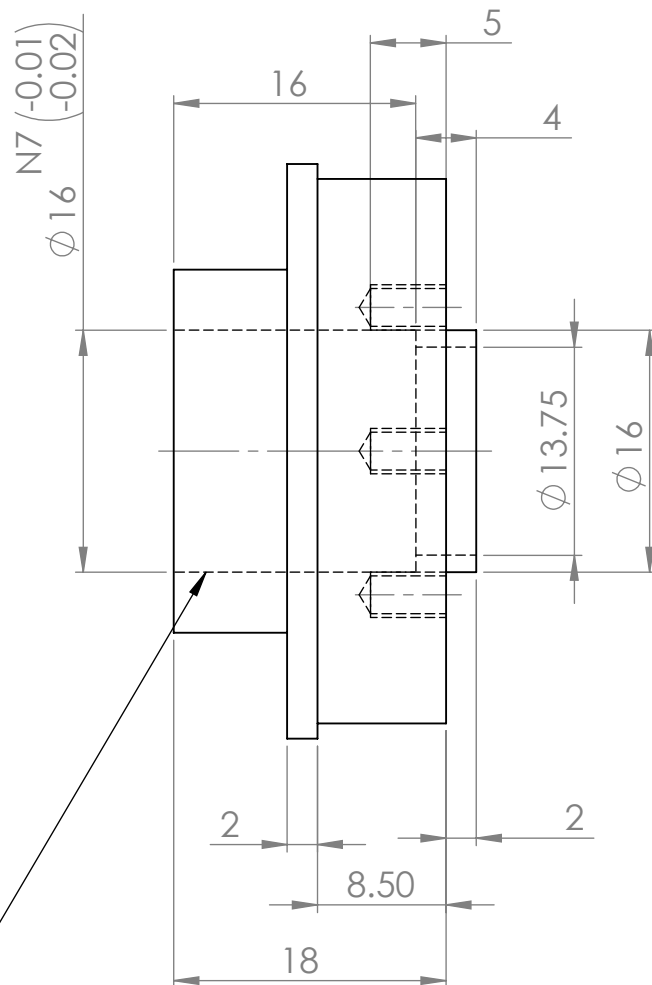
A4

SCALE:1:2

SHEET 1 OF 1



Assento de rolamentos
2x NSK 628/8-2Z



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR: 0.1mm
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A					
			MATERIAL:		
			Alumínio		
			WEIGHT:		

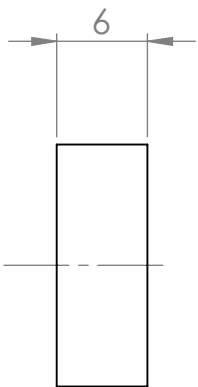
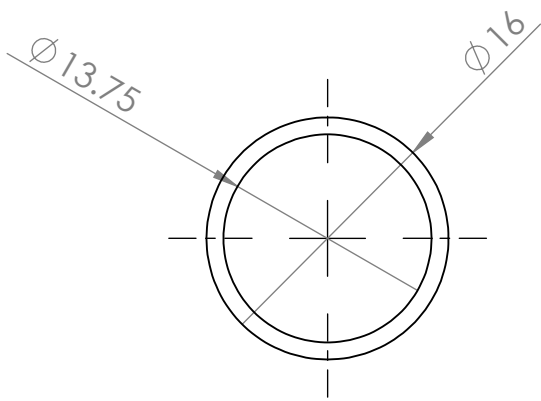
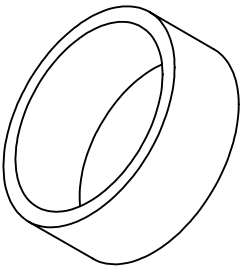
TITLE: FOCThruster_Suporte_Rolamentos_Frontal

DWG NO.

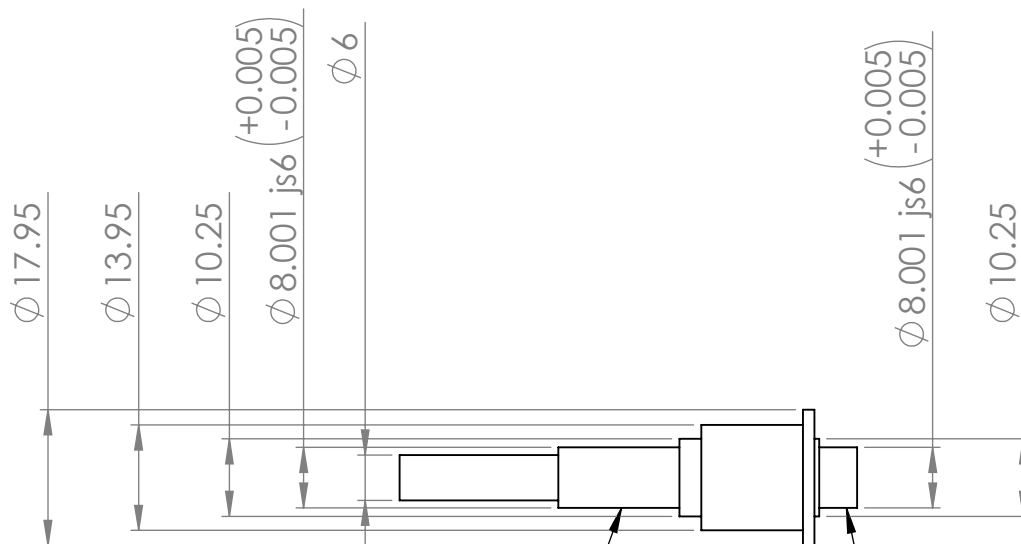
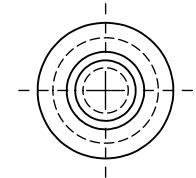
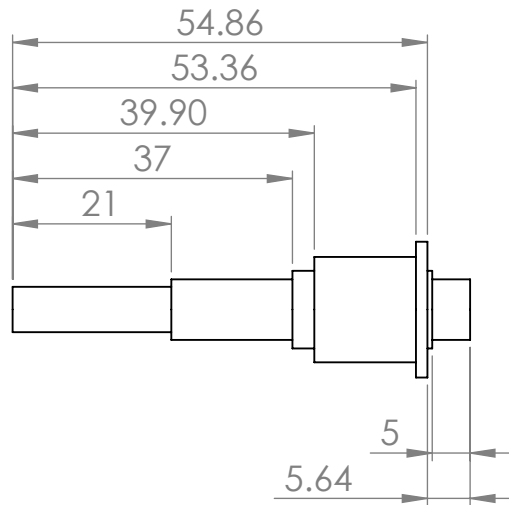
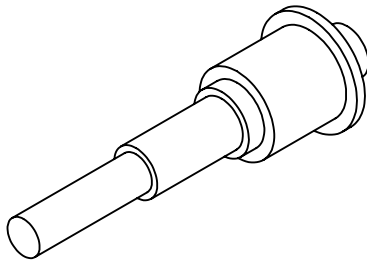
A4

SCALE:2:1

SHEET 1 OF 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:									
TOLERANCES:									
LINEAR: 0.1mm									
ANGULAR:									
	NAME	SIGNATURE	DATE			TITLE: FOCThruster_Espaçador _Rolamentos			
DRAWN									
CHK'D									
APPV'D									
MFG									
Q.A				MATERIAL: Alumínio		DWG NO.		A4	
				WEIGHT:		SCALE:2:1		SHEET 1 OF 1	



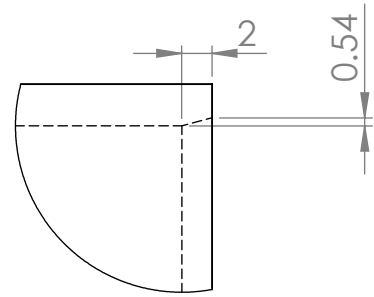
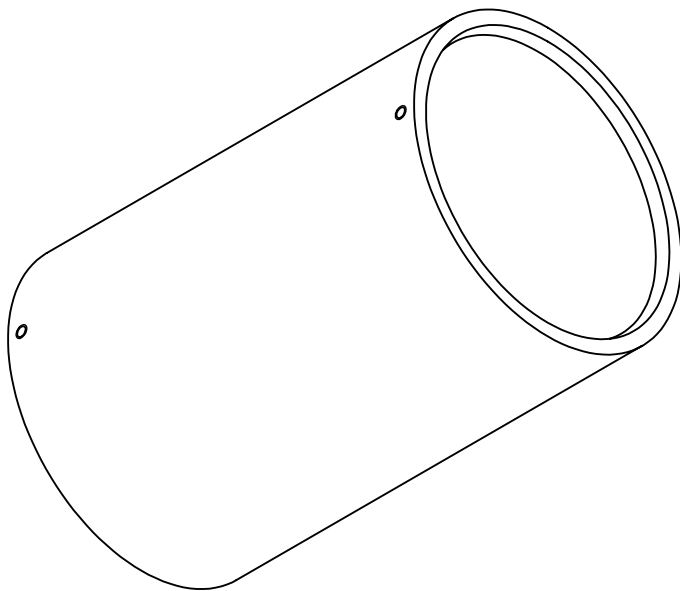
Eixo para rolamentos
2x (SKF 628/8-2Z)

Eixo para rolamento
(SKF 628/8-2Z)

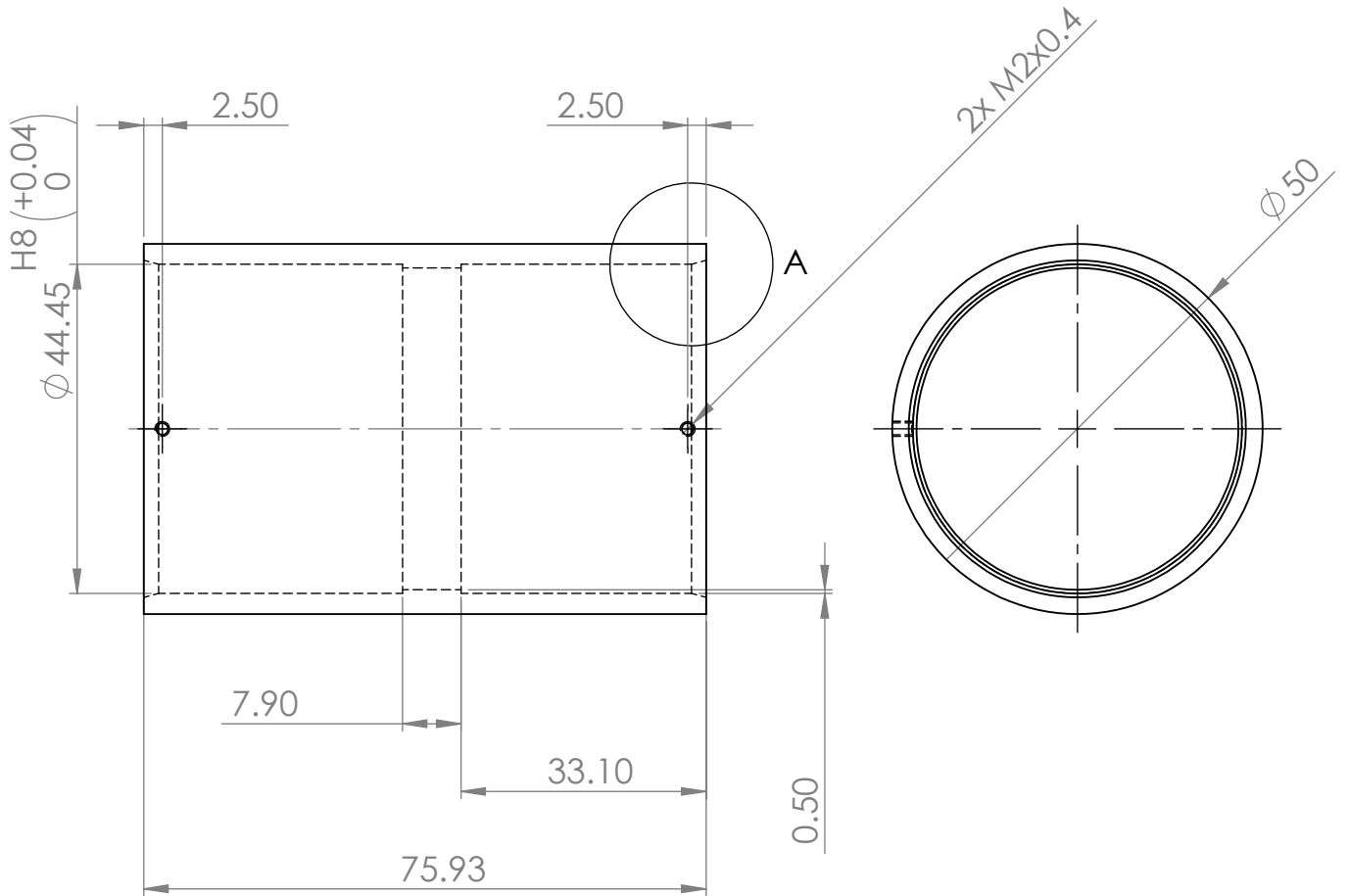
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: 0.1mm ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
						TITLE: FOCThruster_Eixo_Motor			
						DWG NO.			
						A4			
						SCALE:1:1			
						SHEET 1 OF 1			

NAME	SIGNATURE	DATE			
DRAWN					
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A					

MATERIAL:	
Aço Inox	
WEIGHT:	



DETAIL A
SCALE 2 : 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:0.1mm
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A					
			MATERIAL:		
			Alumínio		
			WEIGHT:		

TITLE:

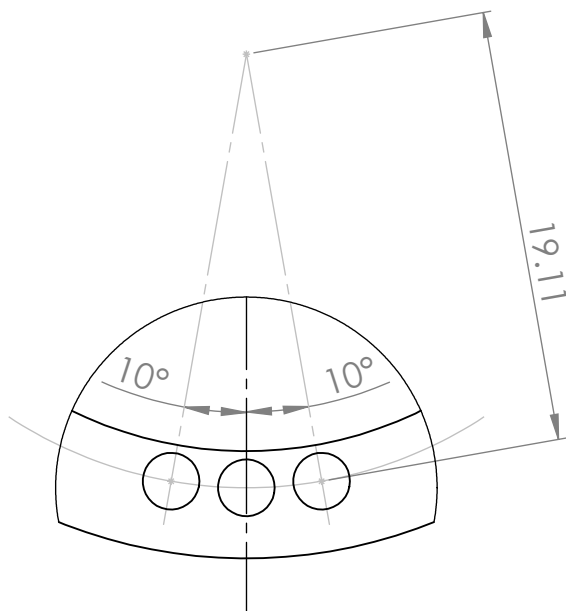
FOCThruster_Motor_Vessel

DWG NO.

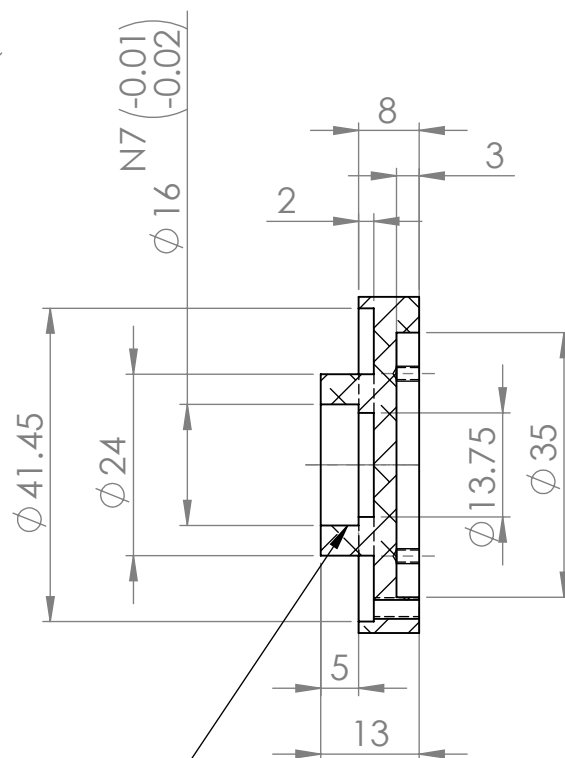
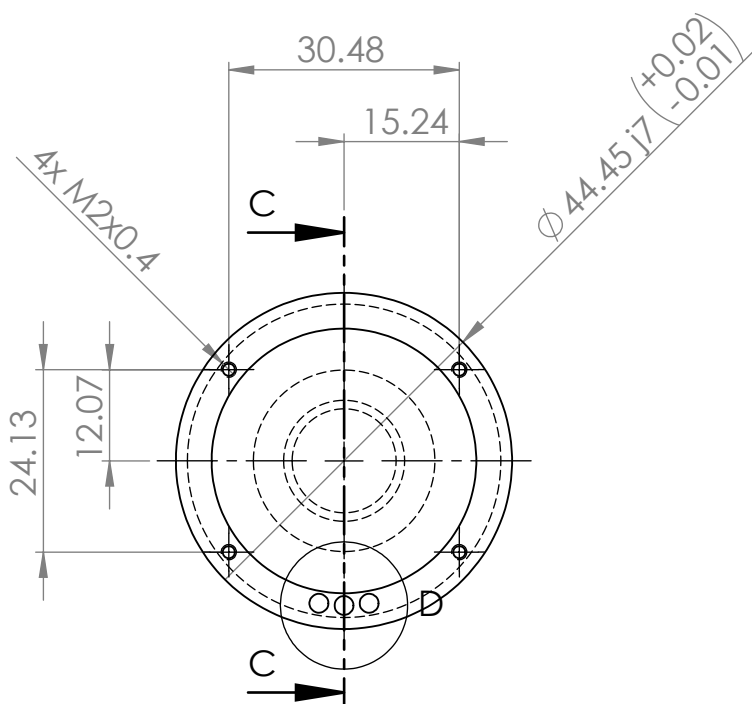
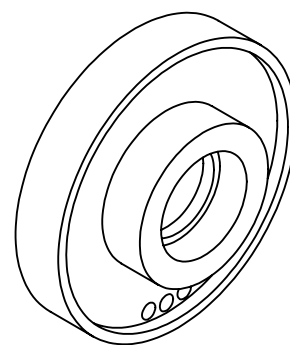
A4

SCALE:1:1

SHEET 1 OF 1



DETAIL D
SCALE 3 : 1



Alojamento de Rolamento
NSK 628/8-2Z

SECTION C-C

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR: 0.1mm
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A					
			MATERIAL:		
			Alumínio		
			WEIGHT:		

TITLE:

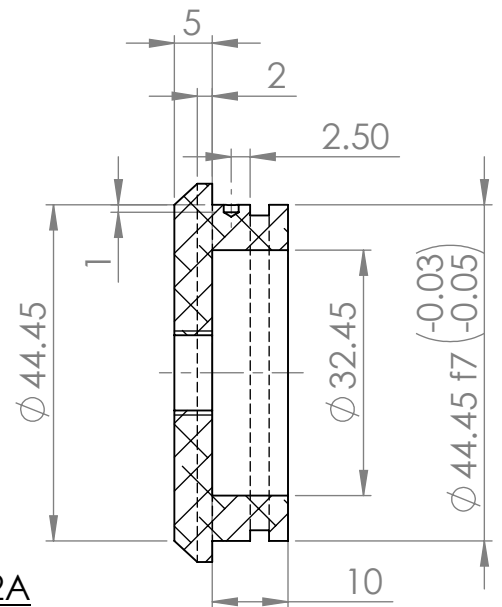
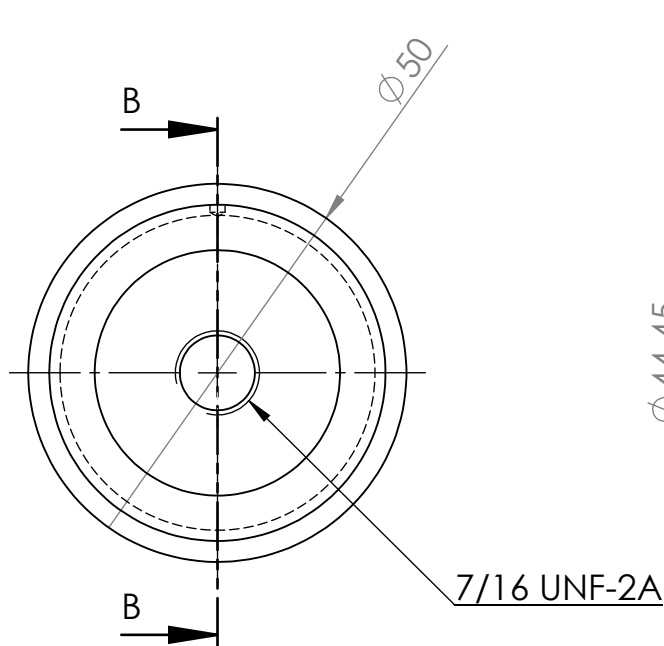
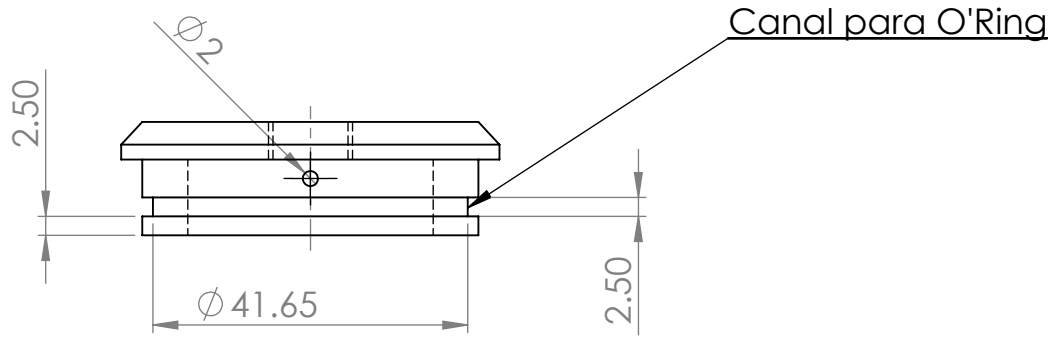
FOC Thruster_Suporte_
Rolamento_Back

DWG NO.

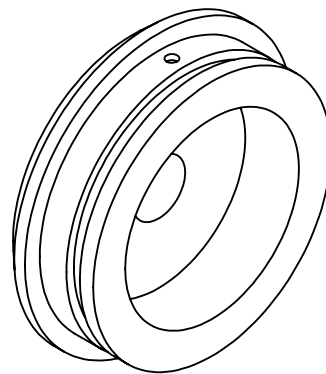
A4

SCALE:1:1

SHEET 1 OF 1



SECTION B-B



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A					

TITLE:

FOCThruster_Tampa

DWG NO.

A4

WEIGHT:

SCALE:1:1

SHEET 1 OF 1