
CARLOS CARVALHO WITTE

DANIEL ZACARIAS FREITAS

PROJETO DE CONSTRUÇÃO E CONTROLE DE
MOVIMENTO DE UM ROV

PROJETO FINAL DE GRADUAÇÃO

Rio de Janeiro, Julho de 2011

AGRADECIMENTOS:

Ao nosso orientador, Professor Marco Antônio Meggiolaro, pela confiança, estímulo, paciência, e parceria para a realização deste trabalho.

Ao Professor Mauro Shwanke, pela ajuda no momento da construção e projeto.

A PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos nosso amigos da Riobotz, que ajudaram sempre quando foi preciso.

Aos amigos ex-alunos da PUC-RIO que ajudaram com toda sua experiência.

Aos nossos amigos da PUC-Rio, que sempre me ajudaram e incentivaram nessa difícil tarefa.

SUMÁRIO:

| | |
|---|----|
| LISTA DE ILUSTRAÇÕES: ----- | 4 |
| LISTA DE TABELAS:----- | 6 |
| LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS: ----- | 6 |
| RESUMO:----- | 7 |
| 1. INTRODUÇÃO ----- | 7 |
| 1.1. VEÍCULOS SUBMERSÍVEIS ----- | 8 |
| 1.1.1. OS VEÍCULOS SUBMERSÍVEIS NÃO TRIPULADOS----- | 9 |
| 1.1.2. RESUMO DAS TECNOLOGIAS UTILIZADAS EM VEÍCULOS SUBMERSÍVEIS NÃO TRIPULADOS----- | 12 |
| 1.1.3. SUBMERSÍVEIS NÃO TRIPULADOS CONSTRUIDOS NO BRASIL ----- | 12 |
| 1.2. ROV - VEÍCULOS OPERADOS REMOTAMENTE ----- | 13 |
| 1.2.1. CLASSIFICAÇÃO DOS ROV ----- | 13 |
| 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS ----- | 19 |
| 2.1. Teoria de Controle:----- | 19 |
| 2.1.1. Controle ----- | 19 |

| | | |
|--------|---|----|
| 2.1.2. | Malha de Controle | 19 |
| 2.2. | Conceito de Retroação | 20 |
| 2.2.1. | Controle em Malha Aberta (MA) | 20 |
| 2.2.2. | Controle em Malha Fechada (MF) | 21 |
| 3. | DESENVOLVIMENTO | 22 |
| 3.1. | Modelagem Dinâmica: | 22 |
| 3.1.1. | Definindo Coordenadas: | 22 |
| 3.1.2. | Definindo a Matriz de Rotação: | 23 |
| 3.1.3. | Modelando o Fluido: | 23 |
| 3.1.4. | Velocidade Linear: | 24 |
| 3.1.5. | Velocidade Angular: | 24 |
| 3.2. | Descrevendo o movimento do ROV considerando 6 graus de liberdade: | 25 |
| 3.2.1. | O Movimento de um Corpo Rígido | 26 |
| 3.3. | Propulsores e Posicionamento: | 28 |
| 3.3.1. | Propulsores | 28 |
| 3.3.2. | Posicionamento | 30 |
| 3.4. | Componentes | 34 |
| 3.4.1. | Propulsores | 34 |
| 3.4.2. | Eletrônica de Controle | 38 |
| 3.4.3. | Rádio Transmissor e Receptor RC | 41 |
| 3.4.4. | Sensores | 41 |
| 3.5. | Estrutura do ROV e Montagem: | 42 |
| 3.5.1. | Validação de um Projeto | 42 |
| 3.5.2. | Material da Estrutura: | 44 |
| 3.5.3. | Versões dos protótipos: | 45 |
| 3.5.4. | Montagem | 47 |
| 4. | RESULTADOS | 49 |
| 4.1. | Simulação da dinâmica | 49 |

| | | |
|--------|--|----|
| 4.2. | Aquisição e Controle ----- | 53 |
| 4.2.1. | Testes da comunicação com os sensores usando o Hyperterminal ----- | 53 |
| | Descrição geral do HyperTerminal: ----- | 53 |
| 4.2.2. | Aquisição e Controle PID usando o LABVIEW----- | 57 |
| 4.3. | Testes do ROV com controle RC----- | 62 |
| 5. | CONCLUSÕES----- | 64 |
| 6. | BIBLIOGRAFIA----- | 65 |
| 7. | APÊNDICES----- | 66 |

LISTA DE ILUSTRAÇÕES:

| | | |
|------------|--|----|
| FIGURA 1: | Resumo dos veículos não-tripulados e seus níveis de autonomia..... | 12 |
| FIGURA 2: | LCROV- Exemplos de ROV de baixo custo utilizados em inspeções e observações subaquáticas. | 14 |
| FIGURA 3: | ROV Stealth 17 da <i>HITEC</i> | 16 |
| FIGURA 4: | ROV Tiburon do <i>Monterey Bay Aquarium Research Institute (MBARI)</i> | 17 |
| FIGURA 5: | ROV KAIKO desenvolvido no Japão. | 18 |
| Figura 6: | Exemplificação dos elementos de uma malha fechada de controle | 20 |
| Figura 7: | diagrama do controle em malha aberta | 21 |
| Figura 8: | diagrama do controle em malha fechada..... | 21 |
| FIGURA 9: | Funcionamento da bomba | 30 |
| FIGURA 10: | Vista isométrica das forças dos propulsores | 31 |
| FIGURA 11: | Forças Exercidas na Direção Z | 32 |
| FIGURA 12: | Saída da tubulação de descarga anguladas de 45 GRAUS..... | 32 |
| FIGURA 13: | Bombas de Porão de Barco | 34 |
| FIGURA 14: | Propulsores Convencionais..... | 35 |
| FIGURA 15: | Detalhes da bomba Tsunami | 36 |
| FIGURA 16: | Posicionamento dos modelos distintos das bombas | 37 |

| | |
|--|----|
| FIGURA 17: Attwood® Tsunami T800 Bilge Pump | 37 |
| FIGURA 18: Attwood® Tsunami T1200 Bilge Pump | 38 |
| FIGURA 19: Organização dos componentes em uma mala | 41 |
| Figura 20: Razor IMU e a dimensões | 42 |
| FIGURA 21: Avaliação do modelo 3d | 43 |
| FIGURA 22: Projeto renderizado no solidworks | 44 |
| FIGURA 23: ESTRUTURA DA PRIMEIRA VERSÃO DO ROV..... | 45 |
| FIGURA 24: ESTRUTURA DA SEGUNDA VERSÃO DO ROV..... | 46 |
| FIGURA 25: ESTRUTURA DA VERSÃO FINAL DO ROV | 47 |
| FIGURA 26: PRÉ-MONTAGEM DA PRIMEIRA VERSÃO DO ROV..... | 48 |
| FIGURA 27: VISTA DO TOPO COM O POSICIONAMENTO DEFINIDO DAS BOMBAS..... | 49 |
| FIGURA 28: Sistema de Malha Aberta representado no Simulink..... | 50 |
| FIGURA 29: Simulação das velocidades X-Y em um intervalo de 0 a 400 segundos, a velocidade em m/s..... | 52 |
| FIGURA 30: Simulação da posição X-Y em um intervalo de 0 a 400 segundos, deslocamento em metros..... | 53 |
| Figura 31: Hiperterminal Identificação da porta de comunicação..... | 53 |
| Figura 32: Configurações da porta com5..... | 54 |
| Figura 33: Firmware da central inercial 9dof IMU | 55 |
| Figura 34 : Valores de saída do acelerômetro | 55 |
| Figura 35: valores apresentados pelo Magnetômetro | 56 |
| Figura 36: Valores apresentados pelo giroscópio..... | 57 |
| Figura 37: Todos os valores dos sensores Representados no hyperterminal | 57 |
| Figura 38: Programa no Labview para aquisição e controle PID | 58 |
| Figura 39: Interface com o Usuário | 59 |
| Figura 40: Calibrando o PID pelos setpoints..... | 60 |
| Figura 41: Resposta PID ao se aproximar do setpoint..... | 61 |
| Figura 42: Saída positiva para estabilização do Setpoint | 62 |
| Figura 43: Velocidade de resposta do controle PID..... | 62 |

| | |
|--|----|
| FIGURA 44: Protótipo Montado..... | 63 |
| FIGURA 45: Movimentação do protótipo | 63 |
| FIGURA 46: iniciando processo de submersão | 64 |
| FIGURA 47: Protótipo submerso..... | 64 |
| FIGURA 48: Rádio Spectrum DX6 | 67 |
| FIGURA 49: Receptor Spectrum BR6000 | 68 |

LISTA DE TABELAS:

| | |
|--|----|
| TABELA 1: Alguns submersíveis existentes | 12 |
| TABELA 2: Classificação dos Veículos Operados Remotamente..... | 14 |
| TABELA 3: especificações da bomba utilizada | 29 |
| TABELA 4: Especificação Attwood® Tsunami Bilge Pump..... | 67 |
| Tabela 5 : eEspecificações do ADXI345, Acelerometro Digital..... | 69 |
| Tabela 6: eEspecificações do Magnetometro Digital, HMC5843 | 70 |
| Tabela 7 : eEspecificações do girometro, ITG-3200 | 71 |

LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS:

ROV = Remote Operated Vehicle

UUV = Untethered Underwater Vehicle

AUV = Autonomous Underwater Vehicle

I = matriz identidade

α = ângulo de rotação

v = vetor unidade

$(\gamma)^\circ$ = ângulo do Yaw

$(\theta)^\circ = \text{ângulo do Pitch}$

$(\varphi)^\circ = \text{ângulo do Roll}$

$R_C = \text{matriz de rotação}$

$R_f = \text{matriz de rotação do fluido}$

$V_{C/T} = \text{velocidade linear}$

$\omega_{C/T} = \text{velocidade angular}$

$\eta = \text{vetor posição}$

$J(\eta) = \text{matriz jacobiana}$

$\tau = \text{vetor de forças}$

$\mu = \text{densidade do fluido}$

$Q = \text{vazão da bomba}$

$CG = \text{centro de gravidade}$

RESUMO:

Neste trabalho são apresentados o projeto conceitual, o desenvolvimento, e a construção de um veículo submersível remotamente operado (ROV), este possuindo controle de estabilidade por meio de uma central inercial com 9 graus de liberdade. Os principais aspectos que foram considerados no modelo são: Propulsão e vetorização do empuxo, assim como seu comportamento em um meio sem instabilidade. O objetivo foi desenvolver um protótipo de baixo custo, para que o controle seja implementado sem que houvesse aquisição de um veículo já existente no mercado. Os resultados e testes realizados foram em uma piscina onde é possível desprezar influências externas de correntezas no sistema.

1. INTRODUÇÃO

O objetivo do projeto é guiar e controlar um ROV (Remote Operated Vehicle), ou seja, veículo submarino de operação remota. Os ROVs geralmente são equipados de sensores e câmeras de vídeo de alta definição, o operador realiza o controle em um local seguro, onde consegue localizar o seu equipamento por algum sistema de posicionamento dinâmico, pelas imagens ou informações dos sensores geradas pelo ROV. É um equipamento muito utilizado em diversos setores da indústria, a sua versatilidade permite atuar em áreas de difícil acesso do inspetor ou operador humano. No Brasil, os ROVs podem ser aplicados no promissor mercado de petróleo e gás, com a exploração de recursos em águas profundas e ainda na área portuária, em inspeções de cascos de navios e do cais. O profissional, piloto de ROV, também pode atuar em operações de segurança, inspeção de obras de engenharia sob a água, e missões de resgate subaquático.

A orientação é a ação de determinar o curso, atitude e velocidade do veículo, em relação a algum sistema de referência (normalmente a terra), a ser seguida pelo veículo.

O controle é o desenvolvimento e a aplicação de forças e momentos adequados a um veículo para o acompanhamento do ponto de controle e estabilização. Trata-se de conceber as leis de controle *feedforward* e *feedback*.

1.1. VEÍCULOS SUBMERSÍVEIS

Os veículos submersíveis existentes hoje podem ser classificados de uma forma geral, segundo Jimenez (2004), em:

Submersíveis Tripulados:

- Submersíveis Militares;
- Submersíveis de Pesquisa.

Submersíveis Não Tripulados:

- Veículos rebocados
- Veículos Operados Remotamente – ROV (*remotely operated vehicle*);
- Veículos Submersíveis Semi-Autônomos – UUV (*untethered underwater vehicle*).

- Veículos Submersíveis Autônomos – AUV (*autonomous underwater vehicle*) ;

1.1.1. OS VEÍCULOS SUBMERSÍVEIS NÃO TRIPULADOS

Segundo a Marine Technology Society of USA (1984), os méritos pelo desenvolvimento dos primeiros veículos submersíveis não tripulados podem ser atribuídos à empresa *Luppis-Whitehead Automobile* e à Dimitri Rebikoff. Esta empresa *Luppis-Whitehead Automobile*, desenvolveu em 1864, na Áustria, um veículo submersível que apresentava a forma de um torpedo que foi intitulado de PUV (veículo subaquático programado). Em 1953, o francês Dimitri Rebikoff (1921-1997) desenvolveu o “*Poodle*” para observação em águas profundas.

Desde então, inúmeros submersíveis foram construídos para as mais diversas atividades, entre as quais a inspeção e vistoria de estruturas submersas. A necessidade de realizar manutenção em equipamentos e estruturas localizadas a grandes profundidades e a exploração de áreas subaquáticas inacessíveis ao ser humano, principalmente para atividade petrolífera, levou ao desenvolvimento de equipamentos capazes de realizar com precisão e eficácia estes trabalhos sem oferecer risco ao ser humano. Estes equipamentos abrangem uma vasta gama de veículos, que vai dos mais simples submersíveis aos mais complexos (HOVER, 2002 e YUH, 1995).

Os ROV são veículos tele-operados equipados normalmente com vários propulsores e que utilizam um cabo, denominado umbilical, responsável pela troca de informações entre o veículo e a estação de terra (WASSERMAN et. al., 2003). Estes veículos são usados principalmente para tarefas de inspeção, observação e manutenção (JIMENEZ, 2004 e KIM et. al., 1999). Os ROV são basicamente equipamentos controlados por uma estação e que são capazes de se deslocarem de acordo com a necessidade do operador. Normalmente os sistemas embarcados nestes equipamentos são constituídos por conjuntos de transdutores, sistemas de vídeo, sistemas atuadores, sistema de iluminação, sistemas de potência, sistema de flutuação e sistemas de controle.

Os UUV representam os veículos submersíveis semi-autônomos, que são veículos não tripulados capazes de realizar uma missão subaquática pré-estabelecida, mas que dependem em parte de operadores externos para executarem a missão. Estes veículos não utilizam cabo na comunicação com os operadores externos e sim sinais enviados à estação de terra ou a antenas de retransmissão posicionadas ao longo da área de inspeção.

A etapa seguinte na evolução dos equipamentos submersíveis corresponde ao desenvolvimento dos veículos submersíveis autônomos (AUV). Os AUV mostraram-se tecnologicamente mais avançados e apresentaram uma grande vantagem sobre os ROV: o fato de não estarem limitados por um cabo preso à superfície. Além disso, dispõem de uma semi-inteligência proporcionada pela integração da arquitetura de hardware e de softwares capazes de fornecerem uma semi-autonomia. Normalmente são utilizados em missões subaquáticas de longa duração, sem intervenção humana. Os AUV são dispositivos pré-programados, capazes de realizarem com certa precisão um re-planejamento de suas tarefas, caso necessário. Os sistemas embarcados em um AUV se equiparam aos sistemas embarcados nos UUV e nos ROV, diferenciando-se por apresentarem o subsistema de potência também embarcado. A limitação destes equipamentos reside na capacidade de carga extra que o AUV suporta. Esta limitação reflete na tendência atual de que os ROV evoluirão para um sistema híbrido, situação em que se pretende alcançar a capacidade de carga suportada pelos ROV aliada à autonomia dos AUV.

Alguns submersíveis existentes e seus dispositivos de propulsão e vetorização de empuxo.

| Submersíveis | Desenvolvedor | Class. | Tipo de Propulsor | Tipo de Vetorização de Empuxo | Velocidade (m/s) | Peso (kg) |
|----------------------------|---------------------------|--------|--------------------------------------|--|---|-----------|
| <u>Odsseya Iib 1995</u> | MIT | AUV | 1 Hélice | Planos direcionais | 1,00 | - |
| <u>Autosub-1 1995</u> | Southampton Oc. Center | AUV | 1 Hélice | Planos Direcionais | 1,80 | - |
| <u>Albac 1992</u> | IIS, Univ.Tokyo | AUV | Deslizamento | Deslocamento C.G. | 0,50 – 1,00 | 45 |
| <u>Remus 1997</u> | W. H. O. I. | AUV | 1 Hélice | Planos Direcionais | 0,25 – 2,80 | 37 |
| <u>ARCS</u> | ISE Research | AUV | 1 Hélice | Planos Direcionais | 1,50 | 1360,80 |
| <u>SAILARS</u> | ISE GROUP | AUV | 2 Hélice | Planos Direcionais | - | - |
| <u>KORAL-AT</u> | Fac.Ocean Tech. | ROV | 5 Hélices | 4 Horizontais e 1 Vertical | 1,00 | 60 |
| <u>VORAM 1997</u> | Korea Research | AUV | 3 Hélices | 2 Horizontais e 1 Vertical | 1,25 | 375 |
| <u>VSI-02</u> | CPH / UFMG | ROV | 6 Hélices | 2 Horizontais e 4 Verticais | - | 245 |
| <u>NEKTOR</u> | Nektor | AUV | Planos Flexíveis | 4 Horizontais e 4 Verticais | - | - |
| <u>Mini Max 2000</u> | DeepSea System | ROV | 4 Hélices | 2 Horizontais Popa 2 Vert./Transv. 45° | Lat – 0,75 Vert – 0,75 Hor – 1,90 | 636 |
| <u>Power III</u> | | AUV | 1 Hélice | Leme | - | - |
| <u>Stingray</u> | Benthos | ROV | 4 hélices | 2 horizontais 1 vertical e 1 lateral | 2,5 (horiz.) 0,40 – 0,50 | 86,8 |
| <u>Phoenix 1992</u> | N. P. S. Monterey – CA | AUV | 6 Hélices | 8 superfícies de controle (2 hélices longitudinais, 2 transversais e 2 verticais) | 1,75 | 225 |
| <u>JHU</u> | Johns Hopkins University | ROV | 6 Hélices | 2 horizontais / 2 transversais Opostas e 2 verticais | - | 140 |
| <u>SubjuGator</u> | | ROV | 4 propulsores de hélice | 2 horizontais e 2 verticais | - | 40,82 |
| <u>ANIMIDA (TUVAAQ)</u> | | AUV | 3 hélices | 2 horizontais e 1 vertical | 1,00 | 90 |
| <u>TALON</u> | THETIS | ROV | 4 hélices | 2 horizontais e 2 verticais | 0,50 | 50 |
| <u>MARIDAN</u> | | AUV | 2 propulsores de hélice | Aileron | 0,25 – 2,00 | 1700 |
| <u>MiniRover Mk-II</u> | Benthos | ROV | 3 hélices | Controle de Empuxo das hélices | 0,50 | 35 |
| <u>Phantom 300</u> | UNCW | ROV | 3 hélices | - | 0,25 | 32 |
| <u>Phantom S2</u> | UNCW | ROV | 6 hélices | 4 horizontais / 2 verticais | 1,00 | 145 |
| <u>Mk-I (2002)</u> | NURC | ROV | 6 hélices | 4 horizontais e 2 verticais | 1,00 | 820 |
| <u>C-Scout (2002)</u> | | UUV | 1 hélice | 4 superfícies de controle | 3,00 - 4,00 | - |
| <u>MAGELLAN™ 725</u> | Oceaneering | ROV | 7 propulsores de hélices | 2 axial / 3 vertical 2 lateral e (reversíveis) | - | 2100 |
| <u>MAGELLAN 825</u> | Oceaneering | ROV | 7 propulsores de hélices | 2 axial / 3 vertical 2 lateral e (reversíveis) | - | 3000 |
| <u>PHOENIX</u> | DOE | ROV | 8 propulsores de hélices | 2 axial / 4 vertical 2 lateral e (reversíveis) | 1,50 | 670 |
| <u>QUEST</u> | Alstom Schilling Robotics | ROV | 7 propulsores de hélices (elétricos) | 3 Vertical 4 horizontais (reversíveis) | 1,50 Lat. 1,25 Vert. 1,00 | 2000 |
| <u>Xanthos Odyssey IIX</u> | MIT | AUV | 1 hélice | Planos direcionais | 0,50 – 1,50 | 200 |
| <u>Odyssey III</u> | MIT | AUV | 1 propulsor de hélice | - | 1,50 – 2,00 | 400 |
| <u>ODIN (1995)</u> | ASL Hawaii | AUV | 8 propulsores de hélice | 4 horizontais 4 verticais | 1,00 | - |
| <u>SHINKAI 6500</u> | JAMSTEC | AUV | 1 hélice princ. e 3 hélices aux. | 1 hélice principal / 1 transversal ao eixo e 2 verticais | 0,70 | - |

FONTE – Adaptada de YUH (2000)

1.1.2. RESUMO DAS TECNOLOGIAS UTILIZADAS EM VEÍCULOS SUBMERSÍVEIS NÃO TRIPULADOS

Segundo Jimenez (2004), todos os sistemas desenvolvidos e utilizados até hoje em processos de inspeção submersa apresentam vantagens e limitações. Por isso é necessário definir previamente as aplicações específicas que se pretende realizar a fim de que se possa estabelecer com clareza o tipo de sistema a adotar.

A FIGURA (1) permite uma visualização geral de todos os sistemas e seus níveis de automação.

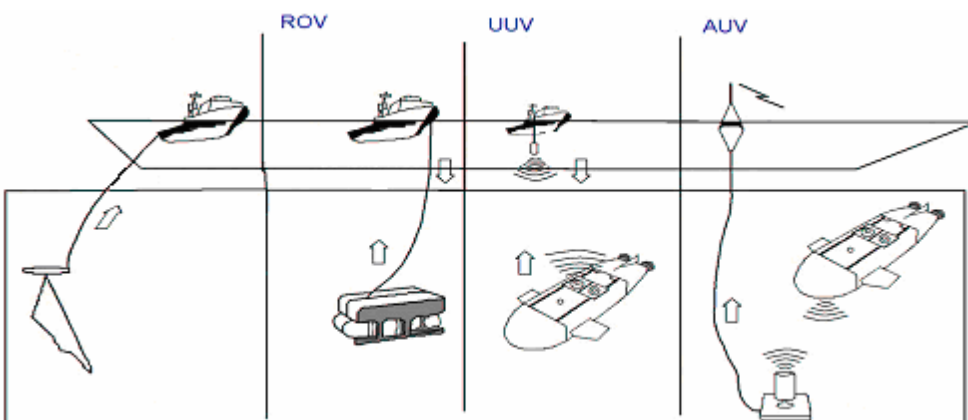


FIGURA 1: RESUMO DOS VEÍCULOS NÃO-TRIPULADOS E SEUS NÍVEIS DE AUTONOMIA.

FONTE – JIMENEZ, 2004.

Este trabalho tratará especificamente dos ROV (veículos submersíveis não tripulados e remotamente operados).

1.1.3. SUBMERSÍVEIS NÃO TRIPULADOS CONSTRUÍDOS NO BRASIL

No Brasil existem poucos trabalhos na área de robótica subaquática. Dentre os trabalhos encontrados, as principais temáticas abordadas foram sobre dinâmica e controle. Dominguez

(1989) apresenta um estudo sobre modelagem e desenvolvimento de um programa para simulação dinâmica de veículos submarinos. Cunha (1992) propõe um sistema de controle à estrutura variável de um ROV. Hsu et al.(2000) apresentam um procedimento para identificação do modelo dinâmico dos propulsores. Souza e Maruyama (2002) apresentam diferentes técnicas de controle para posicionamento dinâmico. Tavares (2003) desenvolveu um estudo sobre modelos cinemáticos e dinâmicos de veículos subaquáticos. Bastos (1998) apresentam o desenvolvimento e construção de veículo submersível de inspeção.

1.2. ROV - VEÍCULOS OPERADOS REMOTAMENTE

Segundo a Marine Technology Society of USA (1984) e o National Research Council of USA (1996), o veículo remotamente operado (ROV) é descrito como um robô subaquático que permite que o operador permaneça em um ambiente confortável enquanto o ROV executa o trabalho subaquático. O ROV é controlado por um cabo umbilical (tether) que interliga os sinais do comando e de controle do veículo, enviando as informações dos sensores aos operadores. Em sistemas mais complexos, uma garagem submersa composta pelo cabo umbilical e o sistema de gerência (Tether Management System - TMS) é freqüentemente incluída.

1.2.1. CLASSIFICAÇÃO DOS ROV

Os ROV podem ser classificados quanto ao tamanho, à capacidade de submersão, à potência embarcada, dentre outras características, tais como os sistemas de atuadores: elétricos, hidráulicos ou eletro-hidráulicos. Suas dimensões são diretamente relacionadas com o número de funções e conseqüentemente quantidade de sistemas embarcados. Existem pequenos ROV que são equipados apenas com uma câmera de vídeo, sendo geralmente utilizados em tarefas específicas de observação. E existem veículos maiores, equipados com sistemas mais complexos, como por exemplo: manipuladores, sistema de captação de imagem por diversas câmeras, ferramentas mecânicas e outros equipamentos embarcados.

A TABELA 2 apresenta uma classificação fornecida pela *Marine Technology Society of USA* (1984), que relaciona a capacidade de submersão, o tipo de trabalho, a potência demandada pelos sistemas embarcados e os sistemas de atuadores.

Classificação dos Veículos Operados Remotamente (ROV)

| Classe (Atuadores) | Trabalho (Capacidade de Submersão) | Potência (kW) |
|---------------------------------------|--|---------------|
| LCROV (Elétrico) | Observação (<100 metros) | < 3,75 |
| Pequenos (Elétrico) | Observação (< 300 metros) | < 7,5 |
| Grandes (Elétrico) | Observação/Trabalho Leve (< 3.000 metros) | < 15 |
| Ultra-Profundos (Elétrico) | Observação/Coleta de Dados (>3.000 metros) | < 18,75 |
| Médios (Elétrico/Hidráulico) | Trabalho Mediano (+-Pesado) (<2.000 metros) | < 75 |
| Grandes (Elétrico/Hidráulico) | Trabalho Pesado/Grande Carga Extra (<3.000 metros) | < 225 |
| Ultra-Profundos (Elétrico/Hidráulico) | Trabalho Pesado/Grande Carga Extra (>3.000 metros) | < 90 |

FONTE – Comitê da Sociedade de Tecnologia Marinha dos EUA, 1984.

TABELA 2: CLASSIFICAÇÃO DOS VEÍCULOS OPERADOS REMOTAMENTE

Os veículos considerados pequenos incluem a maioria dos ROV de baixo custo ("low-cost"-LCROV). Estes veículos são usados primeiramente para tarefas de inspeção e de observação. Os ROV de baixo custo (LCROV) apareceram em 1981 com o RASCL da *International Submarine Engineering's* (ISE,2000). Em 1990, trinta e cinco novas versões de LCROV, FIG. 2 podiam ser encontradas, sendo construídas por vinte e sete fabricantes diferentes. Os

LCROV representam hoje aproximadamente 22% de todos os ROV desenvolvidos no mundo (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1996).



FIGURA 2: LCROV- EXEMPLOS DE ROV DE BAIXO CUSTO UTILIZADOS EM INSPEÇÕES E OBSERVAÇÕES SUBAQUÁTICAS.

FONTE – <http://www.rov.org/educational/pages/Small%20Vehicles.html> acessado em 01/06/2011.

A classe dos ROV médios engloba veículos eletro-hidráulicos que variam de 15 a 75 kW de potência, e que podem carregar cargas extras moderadas. Esta escala de ROV pesam de 1.000a 2.200 quilogramas, com capacidade de carga extra (*payload*) entre 100 e 200 quilogramas.

Geralmente possuem um único manipulador, mas podem ser equipados com até dois. Estes veículos compreendem a classe mais extensamente usada de ROV e foi desenvolvida para executar trabalhos considerados moderados. As tarefas típicas desta classe de ROVS são: perfuração, inspeção de tubulações e manutenção.

Os ROV Super Scorpio, Cobra e Viper, que representam esta classe, foram desenvolvidos utilizando tecnologias mais antigas, consideradas ultrapassadas quando comparadas às utilizadas hoje em veículos com a mesma potência.

Os ROV classificados como grandes representam os que estão sendo usados para operações em até 3000 metros de profundidade com potências que variam de 15 a 225 kW. Os ROV desta classe, tais como o TRITON XLS da *Perry Trittech*, pesam aproximadamente (sem cargas de trabalho), de 2.000 a 6.500 quilogramas. São capazes de executar operações submersas em instalações profundas e de carregar e levantar grandes cargas.

Como exemplo de ROV utilizados especificamente para aplicações na exploração de óleo pode-se citar: o Stealth 17 da *HITEC*, FIG.3, o TRITON XL da *Perry Trittech*, o HiROV 3000 e o HiROV 3500, o SCV-3000 da *Stolt Comex Seaway*, o Olympian da *Slingsby* e o Magnum do *Oceaneering*.

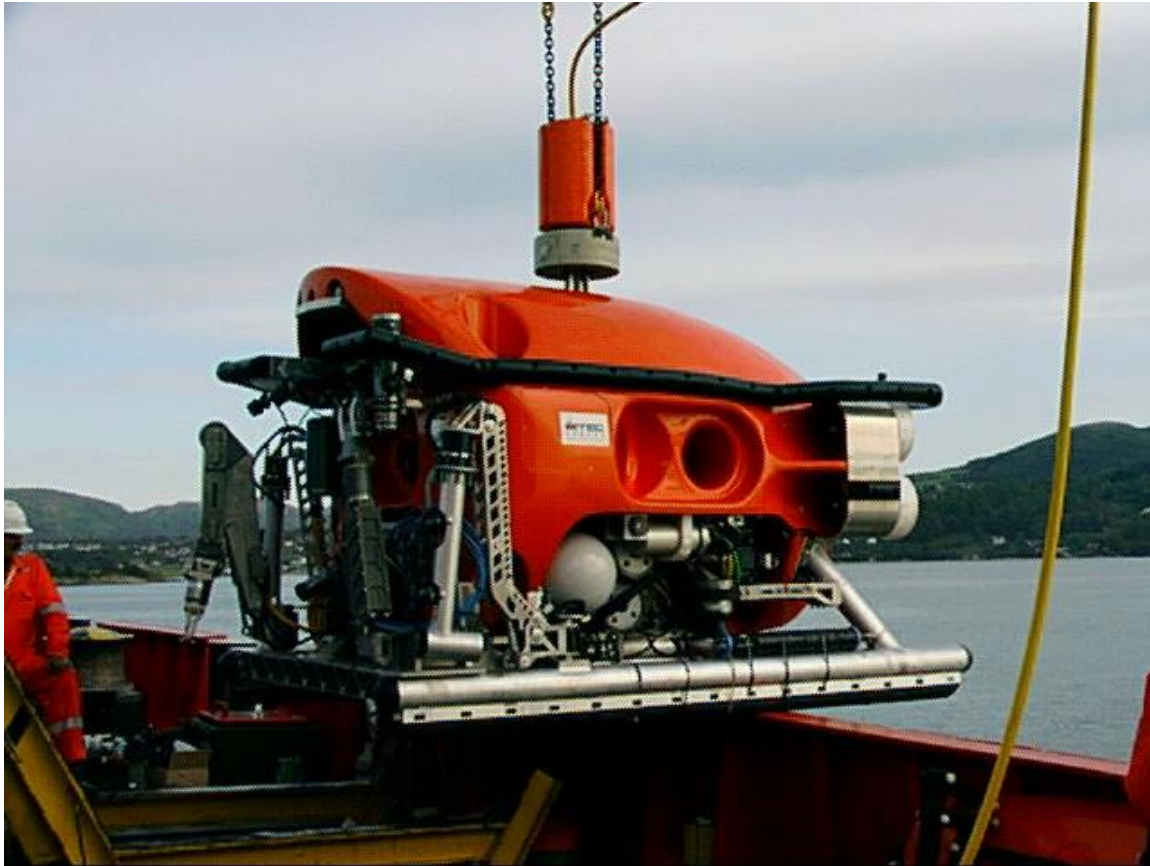


FIGURA 3: ROV STEALTH 17 DA HITEC.

FONTE- <http://www.btinternet.com/~derek.mackay/offshore/images/rov/stealth17.jpg> acessado em 01/06/2011.

Uma outra classe de veículos é representada por aqueles ROV especiais (*Ultra-Deep*), construídos com a capacidade de trabalhar em profundidades acima de 3.000 metros. Estes veículos tendem a ter um menor consumo de potência o que permite manter um diâmetro pequeno do cabo umbilical sendo usados principalmente para pesquisa oceânica, busca e missões de salvamento.



FIGURA 4: ROV TIBURON DO *MONTEREY BAY AQUARIUM RESEARCH INSTITUTE* (MBARI).

FONTE: <http://www.soest.hawaii.edu/hannides/galleries/Calbasins/Tiburon.html> acessado em 01/06/2011.

Finalmente, com a tecnologia desenvolvida para os ROV, estes veículos quebraram em 1990 a barreira dos 6.000 metros de profundidade. O primeiro ROV capaz de alcançar esta profundidade foi o veículo CURV III, operado pela *Eastport International* (agora *Oceanering Technologies Inc.*), que alcançou uma profundidade de 6.128 metros. Uma semana mais tarde, o registro anterior foi quebrado pelo mergulho do *Advanced Tethered Vehicle* (ATV) a uma profundidade de 6.279 metros.

O ROV KAIKO (FIG.5), desenvolvido no Japão, alcançou um dos pontos mais profundo da terra a 10.911,4 metros em 1995.



FIGURA 5: ROV KAIKO DESENVOLVIDO NO JAPÃO.

FONTE– <http://www.whoi.edu/science/GG/people/adeschamps/cruises/cruise.html> acessado em 01/06/2011.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. TEORIA DE CONTROLE:

2.1.1. CONTROLE

Supervisionar e manter o processo em um determinado ponto de operação. Tomada de decisão, envia sinais de correção para os atuadores.

Medir o valor da variável controlada e aplicar o valor conveniente a variável manipulada (sinal de correção) de modo a limitar o erro ou desvio.

Benefícios do controle bem realizado: diminuição de funções repetitivas, melhora de produtividade, diminuição de erros e perdas no processo.

Variável Controlada é a grandeza que é medida e controlada.

Variável Manipulada é a grandeza variada pelo controle de modo a afetar a variável controlada.

Distúrbio é a perturbação que afeta de modo adverso a variável controlada. Ruído.

2.1.2. MALHA DE CONTROLE

Abaixo será mostrado os elementos de uma malha de controle.

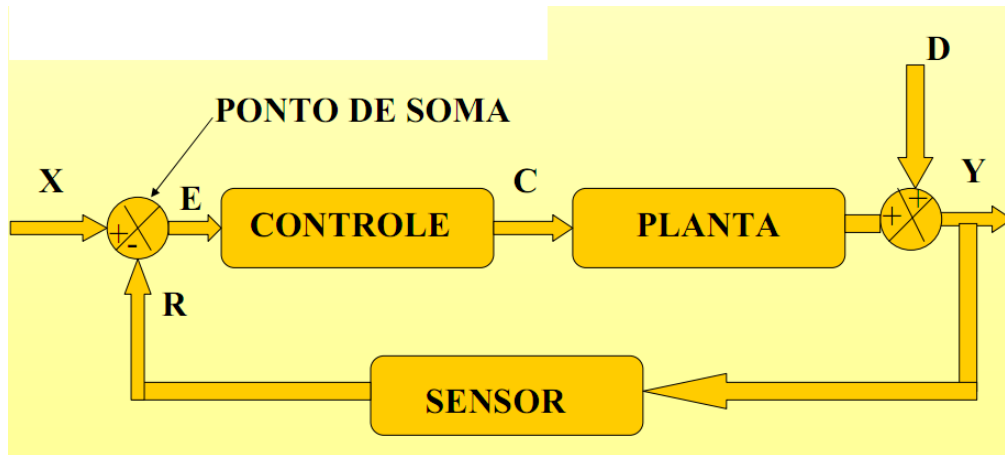


FIGURA 6: EXEMPLIFICAÇÃO DOS ELEMENTOS DE UMA MALHA FECHADA DE CONTROLE

X – sinal de referência (set-point).

Y – variável controlada.

C – variável manipulada.

E – sinal de erro.

R – sinal medido (sinal de retroação).

D – distúrbio do sistema.

2.2. CONCEITO DE RETROAÇÃO

Trata-se de um sistema que mantém uma relação entre a grandeza sinal de saída e um valor de referência. A grandeza variável controlada é medida e é comparada com um valor de referência (set-point), a diferença obtida a partir desta comparação é informada ao controle que atua na planta de modo a diminuir ou anular tal desvio.

Sistemas em Malha Fechada são Sistemas com Retroação

Sistemas em Malha Aberta, o valor do sinal de saída não afeta o controle.

2.2.1. CONTROLE EM MALHA ABERTA (MA)

Nestes sistemas o sinal de saída não é medido, e não afeta a ação de controle. A exatidão do sistema depende de uma calibração. Portanto são usados quando não existe distúrbio atuando.

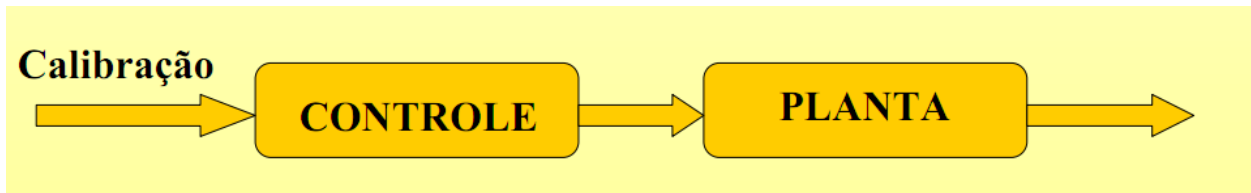


FIGURA 7: DIAGRAMA DO CONTROLE EM MALHA ABERTA

2.2.2. CONTROLE EM MALHA FECHADA (MF)

Nestes sistemas o sinal de retroação da variável controlada é comparado com o set-point. A diferença obtida desta comparação (o erro) é utilizada como parâmetro de entrada do controle, que então atua na planta com o objetivo de diminuir o próprio erro.

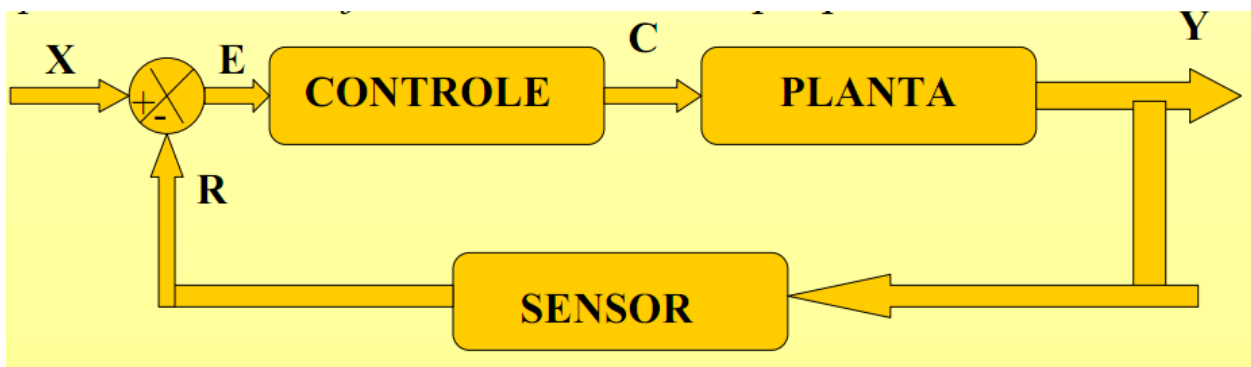


FIGURA 8: DIAGRAMA DO CONTROLE EM MALHA FECHADA

Este tipo de controle torna o sistema insensível as perturbações externas. A partir da medição da variável controlada e da comparação do seu valor com o set-point atua para garantir a estabilidade. Contudo esta estabilidade nem sempre é fácil de garantir, e para isto torna-se necessário sintonizar o controle de tal modo que atue o suficiente para corrigir os erros, nem mais nem menos.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1. MODELAGEM DINÂMICA:

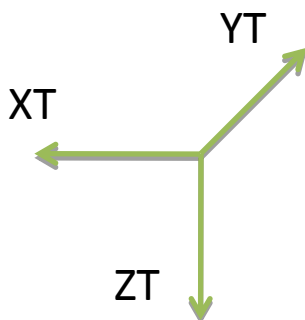
3.1.1. DEFININDO COORDENADAS:

Na modelagem é considerado o empuxo igual ao peso então o ROV é considerado como um corpo rígido no espaço.

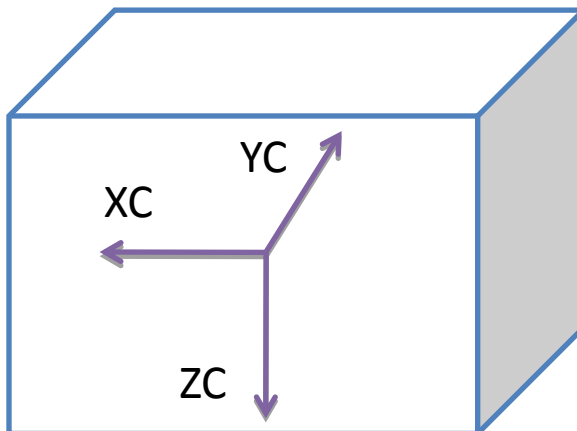
Inicialmente se determina os sistemas de coordenadas a serem utilizados na modelagem dinâmica.

Seguem os sistemas de coordenadas utilizados:

Coordenadas representando a Terra (T):



Coordenadas representando o corpo rígido (C):



Xc – Ré pra frente

Yc – Coordenada Transversal

Zc – Topo pro fundo

3.1.2. DEFININDO A MATRIZ DE ROTAÇÃO:

$${}^T_V = {}^T_{R_C} C_v$$

$${}^T_{R_C} = e^{\alpha S(v)} = \cos(\alpha) I + (1 - \cos(\alpha)) v v^T + \text{sen}(\alpha) S(v)$$

Onde:

$I =$ matriz identidade

$\alpha =$ ângulo de rotação

$v =$ vetor unidade

$X_3 Y_3 Z_3 =$ Yaw (γ)°

$X_2 Y_2 Z_2 =$ Pitch (θ)°

$X_1 Y_1 Z_1 =$ Roll (φ)°

$${}^T_{R_C} = e^{\gamma S\left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}\right)} e^{\theta S\left(\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}\right)} e^{\phi S\left(\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}\right)} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos(\theta) \cos(\gamma) & \cos(\theta) \text{sen}(\Phi) & -\text{sen}(\theta) \\ \text{sen}(\gamma) \text{sen}(\theta) \cos(\Phi) - \cos(\gamma) \text{sen}(\Phi) & \text{sen}(\gamma) \text{sen}(\theta) \text{sen}(\Phi) + \cos(\gamma) \text{sen}(\Phi) & \text{sen}(\gamma) \cos(\theta) \\ \cos(\gamma) \text{sen}(\theta) \cos(\Phi) + \text{sen}(\gamma) \text{sen}(\Phi) & \cos(\gamma) \text{sen}(\theta) \text{sen}(\Phi) - \text{sen}(\gamma) \cos(\Phi) & \cos(\gamma) \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

3.1.3. MODELANDO O FLUÍDO:

Considerando a Matriz de Rotação do Fluido:

$${}^c R_f = e^{-\alpha S \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}} e^{\beta S \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) \cos(\beta) & -\cos(\alpha) \text{sen}(\beta) & -\text{sen}(\alpha) \\ \text{sen}(\beta) & \cos(\beta) & 0 \\ \text{sen}(\alpha) \cos(\beta) & -\text{sen}(\alpha) \cos(\beta) & \cos(\alpha) \end{bmatrix}$$

Vetor velocidade do fluido: $[V \ 0 \ 0]^T$

3.1.4. VELOCIDADE LINEAR:

Derivando o vetor posição: ${}^T O_C$

$${}^T V_{C/T} = {}^T \dot{O}_C$$

Velocidade no sistema de coordenadas do corpo:

$${}^c V_{C/T} = {}^c R_T {}^T V_{C/T} = {}^c R_T {}^T \dot{O}_C$$

3.1.5. VELOCIDADE ANGULAR:

$${}^c \omega_{C/T} = {}^c R_T {}^T \omega_{C/T}$$

$${}^c \omega_{C/T} = {}^T k_3 \dot{\gamma} + {}^T j_3 (\gamma) \dot{\theta} + {}^c i_3 (\theta, \gamma) \dot{\Phi}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\text{sen}\theta \\ 0 & \cos\Phi & 0 \\ 0 & -\text{sen}\Phi & \cos\theta \text{sen}\Phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\Phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix}$$

Então:

$$\begin{bmatrix} \dot{\Phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \text{sen}\Phi \tan\theta & \cos\Phi \tan\theta \\ 0 & \cos\Phi & -\text{sen}\Phi \\ 0 & \text{sen}\Phi / \cos\theta & \cos\Phi / \cos\theta \end{bmatrix} {}^c \omega_{C/T}$$

Vale lembrar que esta matriz não está definida para $\theta = \pm 90$, mas como o ROV dificilmente chegará a um a um ângulo tão grande, não teremos problemas com essa modelagem.

3.2. DESCREVENDO O MOVIMENTO DO ROV CONSIDERANDO 6 GRAUS DE LIBERDADE:

Representando o vetor posição do corpo em relação ao sistema de coordenadas T:

$$\eta = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix}$$

onde:

$$\eta_1 = {}^T O_C = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

$$\eta_2 = \begin{bmatrix} \varphi \\ \theta \\ \gamma \end{bmatrix}$$

Representando o vetor velocidade do corpo em relação ao sistema de coordenadas T:

$$\eta = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$$

onde:

$$v_1 = {}^T V_{C/T} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}$$

$$v_2 = {}^T \omega_{C/T} = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}$$

$\dot{\eta} = J(\eta)v$ onde:

$$J(\eta) =$$

$$\begin{bmatrix} \cos(\theta) \cos(\gamma) & \cos(\theta) \operatorname{sen}(\Phi) & -\operatorname{sen}(\theta) & 0 & 0 & 0 \\ \operatorname{sen}(\gamma) \operatorname{sen}(\theta) \cos(\Phi) - \cos(\gamma) \operatorname{sen}(\Phi) & \operatorname{sen}(\gamma) \operatorname{sen}(\theta) \operatorname{sen}(\Phi) + \cos(\gamma) \operatorname{sen}(\Phi) & \operatorname{sen}(\gamma) \cos(\theta) & 0 & 0 & 0 \\ \cos(\gamma) \operatorname{sen}(\theta) \cos(\Phi) + \operatorname{sen}(\gamma) \operatorname{sen}(\Phi) & \cos(\gamma) \operatorname{sen}(\theta) \operatorname{sen}(\Phi) - \operatorname{sen}(\gamma) \cos(\Phi) & \cos(\gamma) \cos(\theta) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \operatorname{sen}\Phi \tan\theta & \cos\Phi \tan\theta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos\Phi & -\operatorname{sen}\Phi \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \operatorname{sen}\Phi / \cos\theta & \cos\Phi / \cos\theta \end{bmatrix}$$

Vetor de forças e momentos em relação ao sistema de coordenadas C:

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}$$

onde:

$$\tau_1 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

$$\tau_2 = \begin{bmatrix} K \\ M \\ N \end{bmatrix}$$

3.2.1. O MOVIMENTO DE UM CORPO RÍGIDO

O movimento de um corpo rígido no espaço pode ser descrito pela seguinte equação :

$$M_{RB}\dot{v} + C_{RB}(v)v = \tau_{RB}$$

Com v e τ previamente definidos:

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} mI_3 & -mS({}^cG) \\ mS({}^cG) & {}^cI_{O_c} \end{bmatrix}$$

Onde I_3 é a matriz identidade 3x3, m é a massa do corpo, cG é a posição do centro de massa em relação ao eixo de coordenadas C, e ${}^cI_{O_c}$ é a inércia em relação ao eixo de coordenadas do corpo.

Teoricamente os parâmetros da matriz M_{RB} podem ser definidos pelas seguintes equações:

$$m = \int_{VOL} \rho({}^cP)dP$$

$${}^cG = \frac{1}{m} \int_{VOL} {}^cP\rho({}^cP)dP$$

$${}^cI = - \int_{VOL} S^2({}^cP)\rho({}^cP)dP$$

A matriz C_{RB} representa os termos que como a força de Coriolis e Centrífugas, isto é:

$$C_{RB} = \begin{bmatrix} 0 & -S([M_{RB11}M_{RB12}])v \\ -S([M_{RB11}M_{RB12}])v & -S([M_{RB21}M_{RB22}])v \end{bmatrix}$$

O vetor τ pode ser representado por uma soma de diferentes componentes, cada componente com sua influencia específica:

$$\tau = \tau_{REST} + \tau_{DAMP} + \tau_{ADD} + \tau_{FK} + \tau_{WAVE} + \tau_{WIND} + \tau_{EXT}$$

τ_{REST} são as forças devido a flutuabilidade e ao peso do ROV, pode ser descrito pela seguinte equação:

$$\tau_{REST} = \begin{bmatrix} m^c g \\ S(^cG)m^c g \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \rho_m Vol^c g \\ S(^cF)\rho_m Vol^c g \end{bmatrix}$$

Onde F é o centro de flutuabilidade em relação ao eixo de coordenadas do corpo.

τ_{DAMP} são as forças devido a diferentes tipos de amortecimentos, como as ondas geradas pelo próprio deslocamento do ROV. Este pode ser descrito pela seguinte equação:

$$\tau_{DAMP} = -D(Vr, \delta)v_r$$

τ_{ADD} são as forças e momentos devida inércia gerada pelos entornos do fluido. Este pode ser descrito pela seguinte equação:

$$\tau_{ADD} = -M_A \dot{v}_r - C_A(v_r)v_r$$

τ_{FK} as forças definidas por Froude-Kriloff, a inércia do fluido deslocado, descrito pela seguinte equação:

$$\tau_{FK} = M_{FK}\dot{v}_c$$

τ_{wind} são as forças devidos a inércia gerada pelo vento, depende da velocidade do corpo e outros fatores.

Neste caso, como se trata de um ROV operando submerso pode se desprezar τ_{wind} e τ_{wave} .

E finalmente, τ_{EXT} são forças externas genéricas, por exemplo, as forças geradas pelas bombas (propulsores) do nosso ROV.

Definindo a força de Coriolis:

$$\tau_{COR} = -C_{RB}(v)v - C_A(v_r)v_r$$

Assim tem-se a equação:

$$M_{RB}\dot{v} + M_A\dot{v}_r - M_{FK}\dot{v}_c = \tau_{REST} + \tau_{DAMP} + \tau_{COR} + \tau_{EXT}$$

Como o ROV está neutro, imerso na água (Empuxo=Peso) e as massas uniformemente distribuídas, pode-se considerar $M_{FK} = M_{RB}$, então:

$$[M_A + M_{RB}]\dot{v}_r = \tau_{REST} + \tau_{DAMP} + \tau_{COR} + \tau_{EXT}$$

Concluindo, as equações finais de dinâmica e movimento do ROV são:

$$\dot{\eta} = J(\eta)v$$

$$\dot{v} = \dot{v}_c[M_A + M_{RB}]^{-1}(\tau_{REST} + \tau_{DAMP} + \tau_{COR} + \tau_{EXT})$$

3.3. PROPULSORES E POSICIONAMENTO:

3.3.1. PROPULSORES

Os propulsores utilizados no projeto são bombas, geralmente utilizadas em porão de barco, da marca TSUNAMI de um total de 6 bombas, quatro T400 e duas T1200 com as seguintes especificações:

TSUNAMI T800:

Pump Capacity: 800 gal/hour (aproximadamente $2,50E-3 \text{ m}^3/\text{hora}$)

Bag Fill Rate: 150 lbs/minute

Hose size: 1-1/8"

Hose Length: 9'

Power Source: cigarette lighter

Power Cord Length: 12ft.

TSUNAMI T1200:

Pump Capacity: 1200 gal/hour (aproximadamente $3,758E-3 \text{ m}^3/\text{hora}$)

Bag Fill Rate: 150 lbs/minute

Hose size: 1-1/8"

Hose Length: 9'

Power Source: cigarette lighter

Power Cord Length: 12ft.

TABELA 3: ESPECIFICAÇÕES DA BOMBA UTILIZADA

A bomba centrífuga é constituída essencialmente de duas partes:

- a) Uma parte móvel: rotor solidário a um eixo (denominado conjunto girante)
- b) Uma parte estacionaria carcaça (com os elementos complementares)

O rotor é a peça fundamental de uma bomba centrífuga, a qual tem a função de receber o líquido e fornecer-lhe energia. O seu formato e dimensões são relativos as características de funcionamento da bomba.

A carcaça é o componente que envolve o rotor. Apresenta aberturas para a entrada do líquido até o centro do rotor e saída do mesmo para a tubulação de descarga.

A figura abaixo exemplifica o funcionamento:

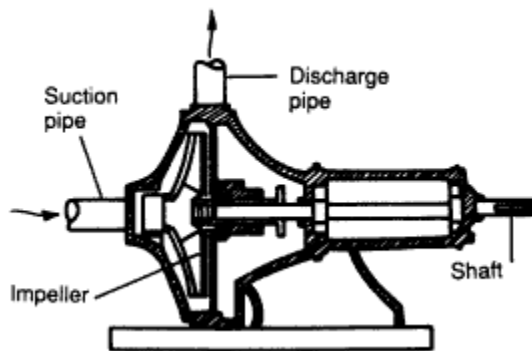


FIGURA 9: FUNCIONAMENTO DA BOMBA

A propulsão é então realizada pela descarga da bomba.

A força T feita pela bomba pode ser descrita pela seguinte equação:

$$T = \mu Q \Delta u$$

Onde:

μ é a densidade do fluído.

Q é a vazão da bomba.

u é a velocidade.

3.3.2. POSICIONAMENTO

Como são 6 graus de liberdade no ROV, a configuração seguinte foi adotada para conseguir realizar a movimentação:

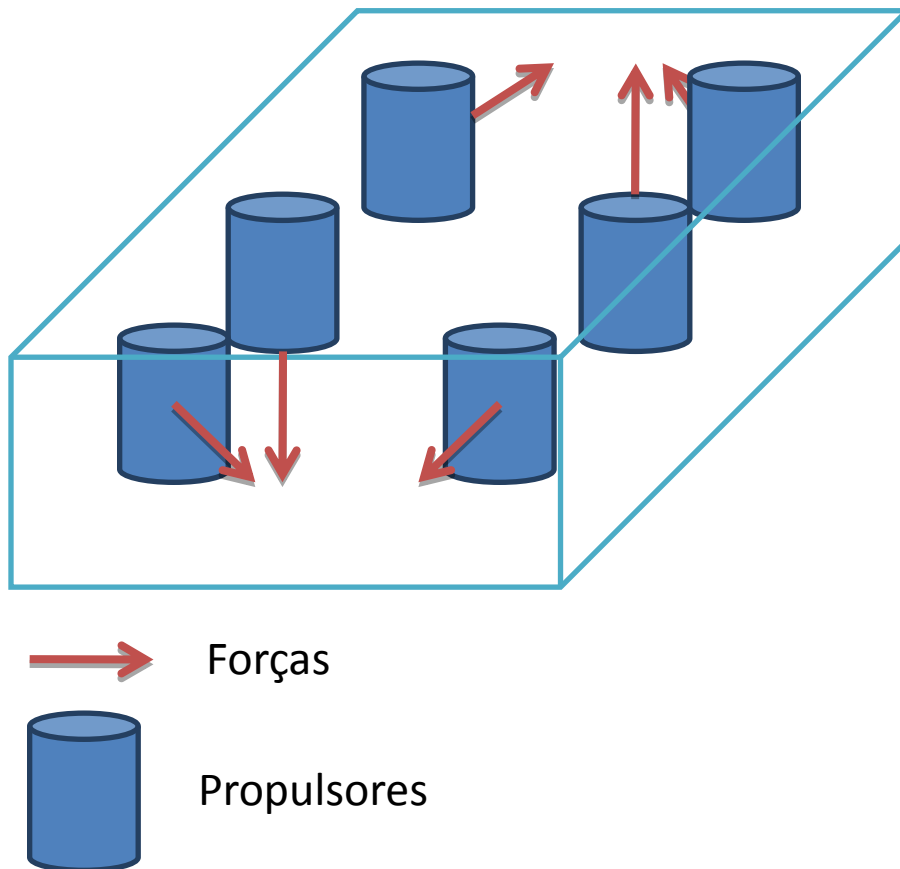


FIGURA 10: VISTA ISOMÉTRICA DAS FORÇAS DOS PROPULSORES

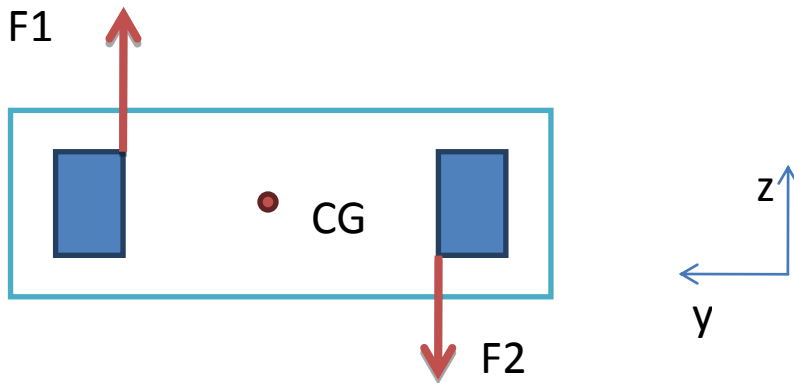


FIGURA 11: FORÇAS EXERCIDAS NA DIREÇÃO Z

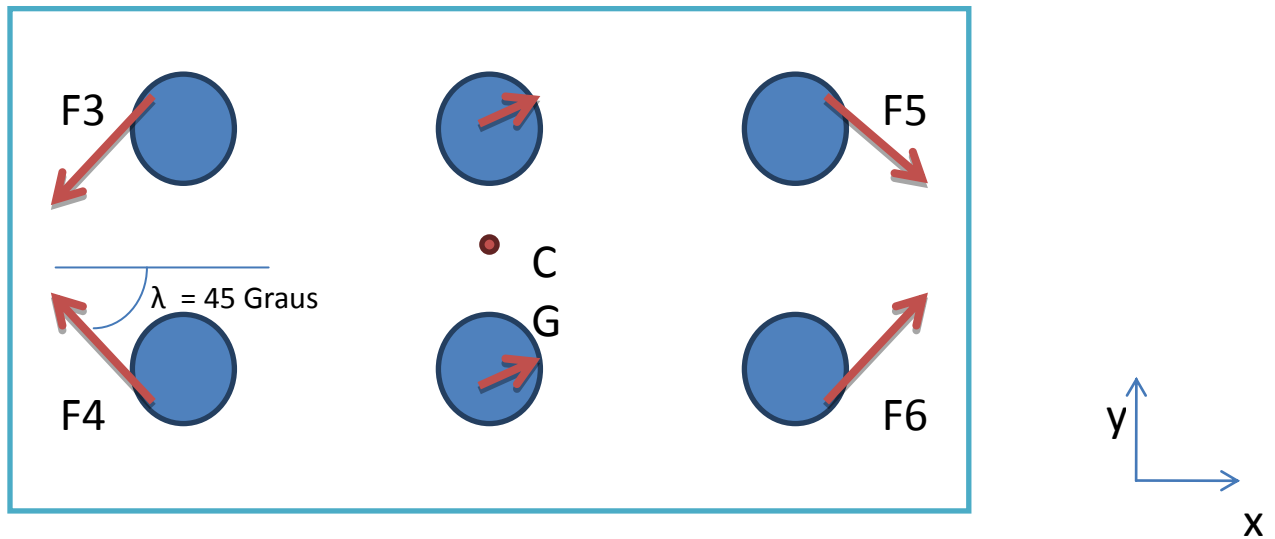


FIGURA 12: SAÍDA DA TUBULAÇÃO DE DESCARGA ANGULADAS DE 45 GRAUS

Chamando o ângulo de λ , pode-se então considerar as seguintes forças:

Na direção x:

$$F_{3,4} = -F3\text{sen}(\lambda) - F4\text{sen}(\lambda)$$

$$F_{5,6} = F5\text{sen}(\lambda) + F6\text{sen}(\lambda)$$

$$x = F_{x(3,4)} + F_{x(5,6)}$$

Na direção y:

$$F_{3,4} = -F_3 \cos(\lambda) - F_5 \cos(\lambda)$$

$$F_{5,6} = F_4 \cos(\lambda) + F_6 \sin(\lambda)$$

$$y = F_{y(5,6)} + F_{y(3,4)}$$

Na direção z:

$$z = F_1 - F_2$$

Rotação no eixo z (Yaw):

$$N = d(F_5 + F_4 - F_3 - F_6)$$

Rotação no eixo x (Roll):

$$K = d(F_1 + F_2)$$

Onde d é a distância da força pro CG do ROV.

Assim o vetor de atuação do modelo fica:

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}$$

onde:

$$\tau_1 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{x(3,4)} + F_{x(5,6)} \\ F_{y(5,6)} + F_{y(3,4)} \\ F1 - F2 \end{bmatrix}$$

$$\tau_2 = \begin{bmatrix} K \\ M \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d(F1 + F2) \\ 0 \\ d(F5 + F4 - F3 - F6) \end{bmatrix}$$

3.4. COMPONENTES

3.4.1. PROPULSORES

Após vasta pesquisa, decidiu-se usar como propulsores, bombas de porão de barcos (Figura 10). Para o projeto as bombas foram mais viáveis economicamente que os propulsores convencionais (Figura 11), que são compostos de um motor DC e hélices.



FIGURA 13: BOMBAS DE PORÃO DE BARCO



FIGURA 14: PROPULSORES CONVENCIONAIS

Abaixo segue uma figura esquemática onde podemos visualizar todos os componentes que constituem o propulsor utilizado na construção do ROV.

DESIGN FEATURES

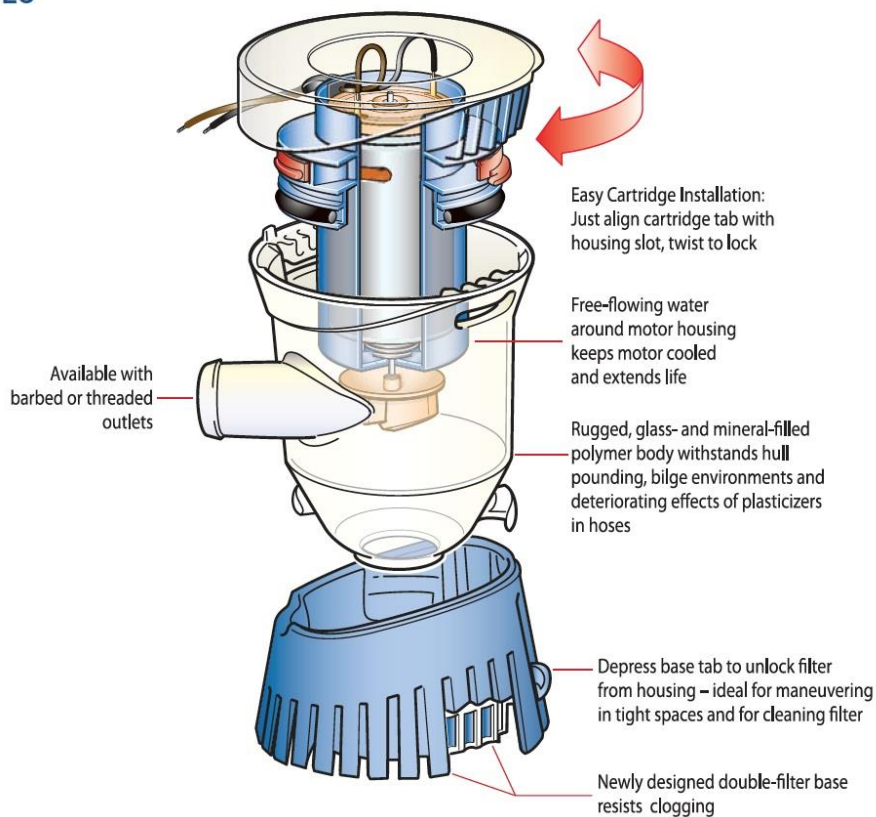


FIGURA 15: DETALHES DA BOMBA TSUNAMI

Para o projeto de construção do ROV dois modelos distintos de bombas foram utilizados, pois se precisou de vazões diferentes para desempenhar a função de propulsão. Na Figura 13 podemos ver este posicionamento.

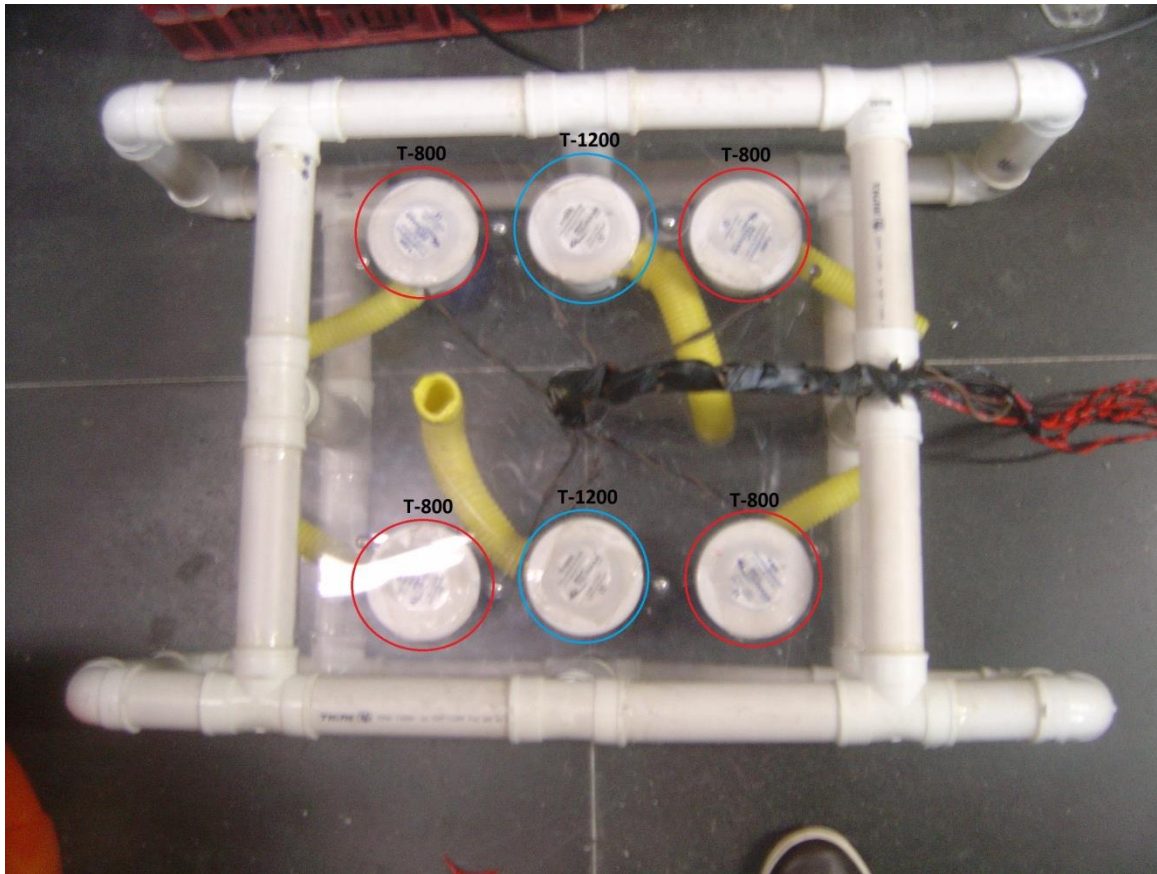


FIGURA 16: POSCIONAMENTO DOS MODELOS DISTINTOS DAS BOMBAS

Modelo T-800, proporciona uma vazão de 800 galões por minuto, foram usadas quatro desse modelo, para conseguirmos os movimentos.



FIGURA 17: ATTWOOD® TSUNAMI T800 BILGE PUMP

Modelo T 1200, proporciona uma vazão de 1200 galões por minuto, e foram utilizados 2 unidades, para proporcionar os movimento de subida e descida do ROV.



FIGURA 18: ATTWOOD® TSUNAMI T1200 BILGE PUMP

3.4.2. ELETRÔNICA DE CONTROLE

É utilizado como controlador dos motores das bombas uma eletrônica desenvolvida pelo Alexandre Ormiga denominada de LEXTRONIC. Este controlador possui as seguintes especificações:

ESPECIFICAÇÕES:

TENSÃO (V+ - V-): 0 a 40V

TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO DA PARTE LÓGICA: 4,8 a 5,3V

CORRENTE CONTÍNUA: 15A (<3min sem dissipador)

CORRENTE DE PICO (<0,5s): 50ª

PROTEÇÕES:

SOBRETENPERATURA

SOBRETENSÃO

CURTO CIRCUITO NOS TERMINAIS DOS MOTORES

LIMITAÇÃO DE “SLEW RATE” ELETRÔNICO E POR SOFTWARE PARA SUPRESSÃO DE RUÍDOS

CONSIDERAÇÕES GERAIS:

A inversão na tensão de alimentação acarretará na inutilização da eletrônica.

O conector de sinal deve ser ligado corretamente ao receptor, que deverá fornecer 5V à placa.

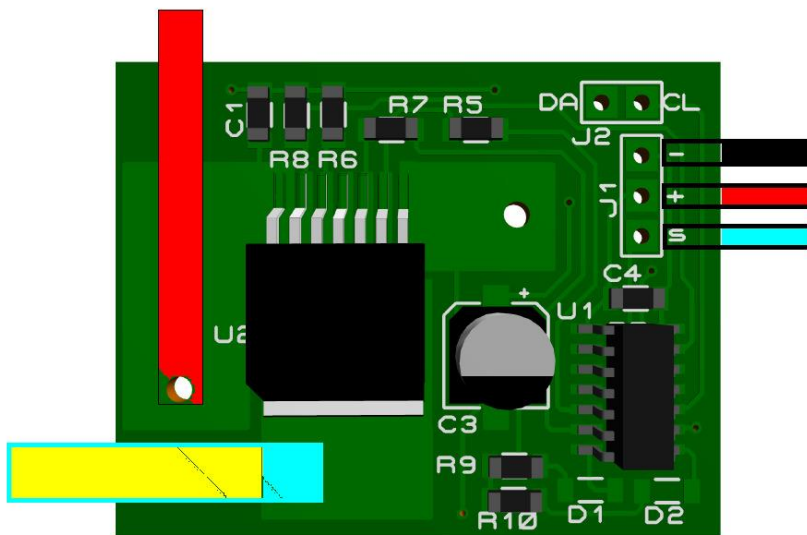
É recomendável o uso de capacitores (0.1uF) nos terminais dos motores para redução de ruído.

É recomendável o uso de reguladores de tensão chaveados no para alimentar a parte lógica.

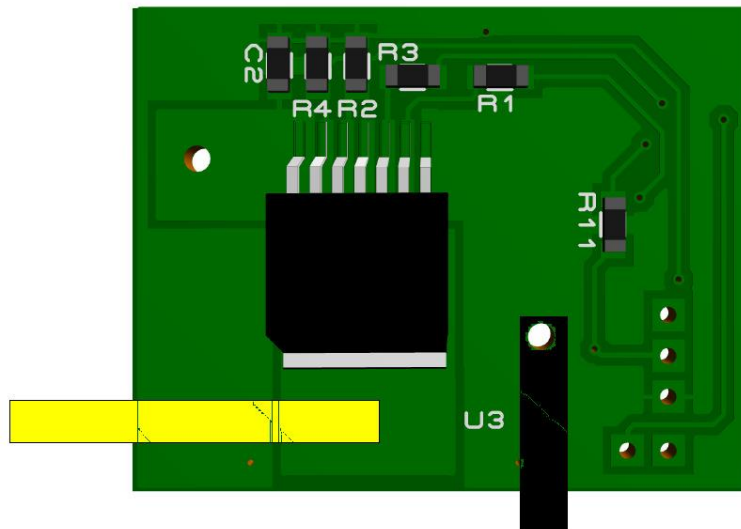
Caso a eletrônica entre em proteção térmica, a mesma irá parar o seu funcionamento durante apenas 1 segundo, cabendo ao usuário diminuir consideravelmente a corrente drenada. Sucessíveis proteções térmicas acarretarão na inutilização da eletrônica.

Abaixo temos a representação esquemático do controlador:

V+



MOTOR+



MOTOR -

V-

Para o projeto do ROV foram utilizados 6 controladores, um controlador para cada bomba, assim conseguiu-se o acionamento independente de cada propulsor.

Abaixo a Figura 16 representa como foram utilizados no projeto.

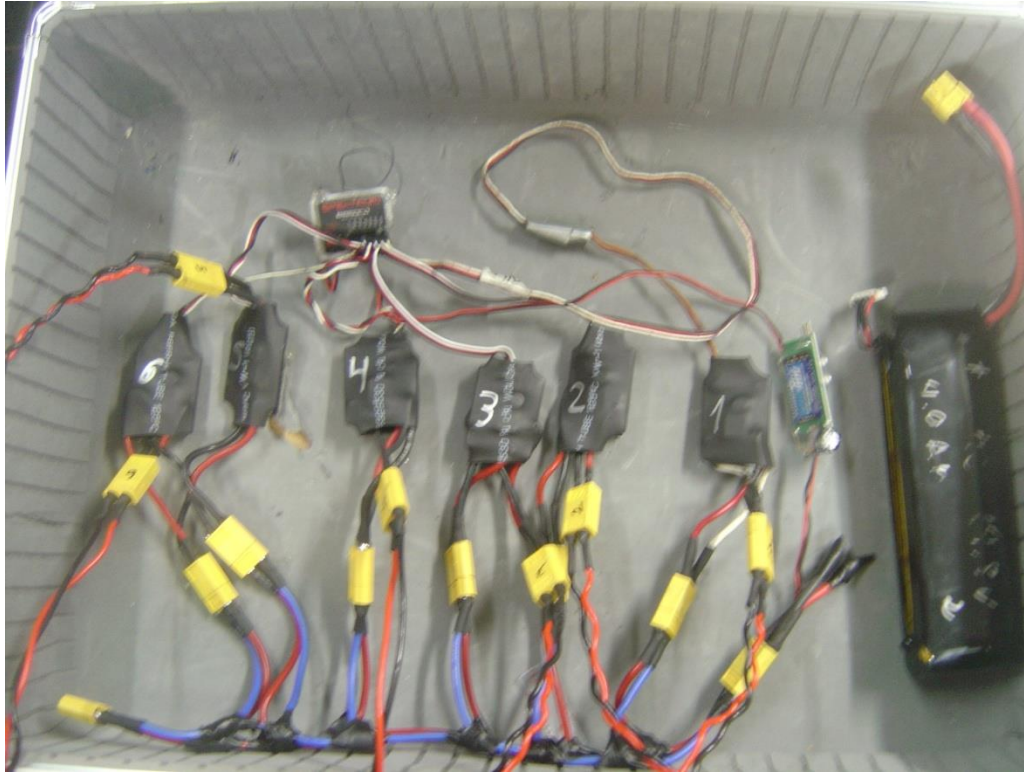


FIGURA 19: ORGANIZAÇÃO DOS COMPONENTES EM UMA MALA

3.4.3. RÁDIO TRANSMISSOR E RECEPTOR RC

É utilizado no projeto do ROV RC, o rádio transmissor Spectrum DX6 (Figura 28) e o Receptor BR 6000 (Figura 29).



3.4.4. SENSORES

Os sensores utilizados é uma central inercial Razor IMU de 9 graus de liberdade (Figura 20). Três sensores estão embutidos:

- Acelerômetro de três eixos ADXL345, 13-bit de resolução, $\pm 16g$;
- Giroscópio ITG-3200, três eixos digitais;
- Magnetômetro HMC5843, três eixos digitais;

As especificações estão no capítulo Apêndice (Tabelas 5,6 e 7).

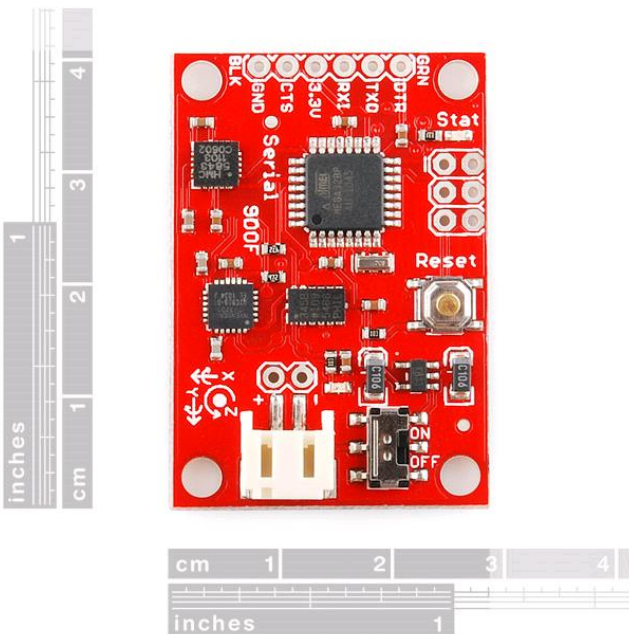


FIGURA 20: RAZOR IMU E A DIMENSÕES

3.5. ESTRUTURA DO ROV E MONTAGEM:

O ROV no projeto é considerado como um cubo simples totalmente simétrico e com as massas uniformemente distribuídas.

3.5.1. VALIDAÇÃO DE UM PROJETO

A utilização de um software de modelagem, como o solidworks, ajudou na validação de um conceito da estrutura do protótipo do ROV. A Figura 17 representa uma das versões validadas antes da construção no software.

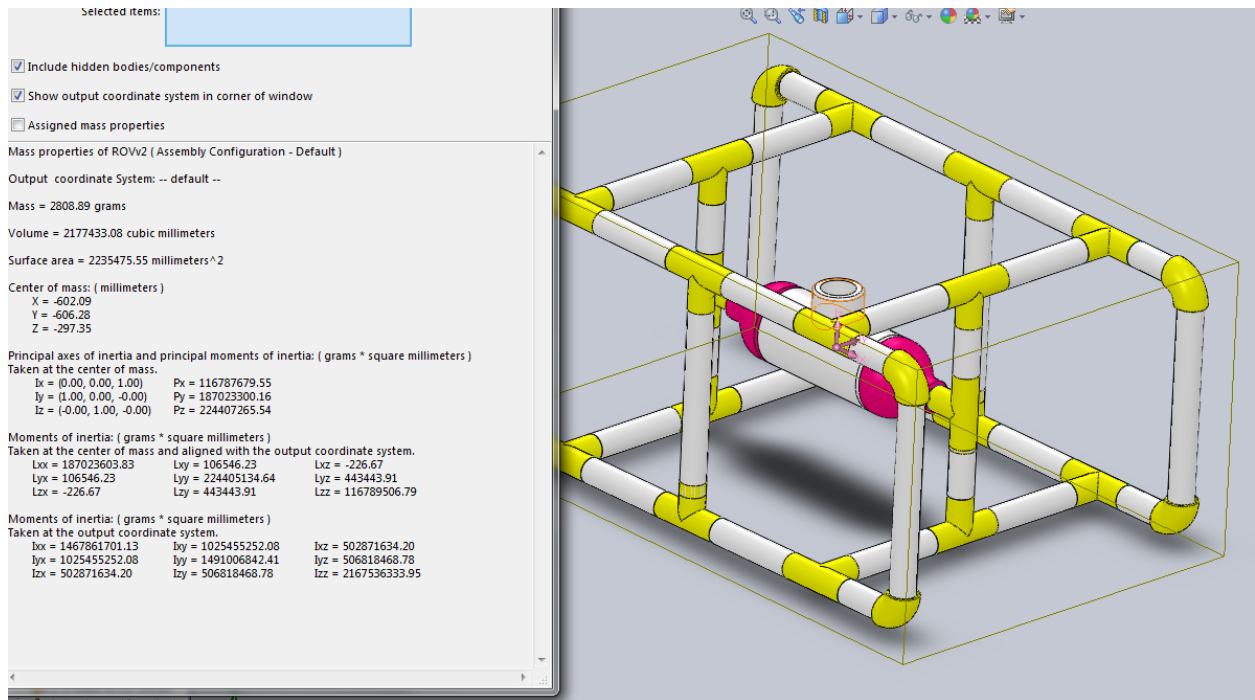


FIGURA 21: AVALIAÇÃO DO MODELO 3D

O software também permitiu simular o CG, e os momentos de inércia da estrutura (Figura 18). Isto permitiu validar um projeto antes da construção.

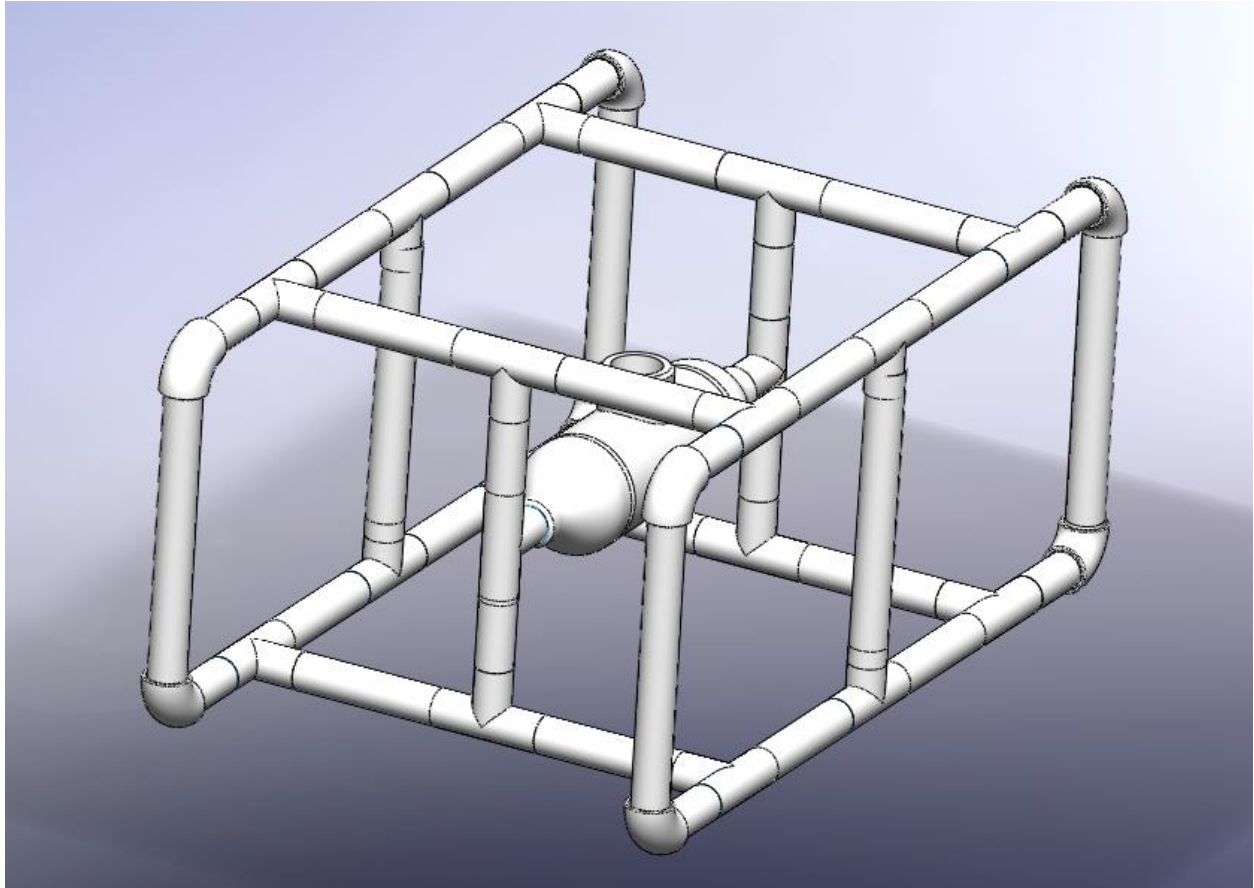


FIGURA 22: PROJETO RENDERIZADO NO SOLIDWORKS

3.5.2. MATERIAL DA ESTRUTURA:

A opção do material foi decidida pelo uso do PVC, pois além de ser um material de baixo custo, também nos providência uma estrutura rígida de fácil montagem e confiável para a realização dos diversos testes do protótipo.

3.5.3. VERSÕES DOS PROTÓTIPOS:

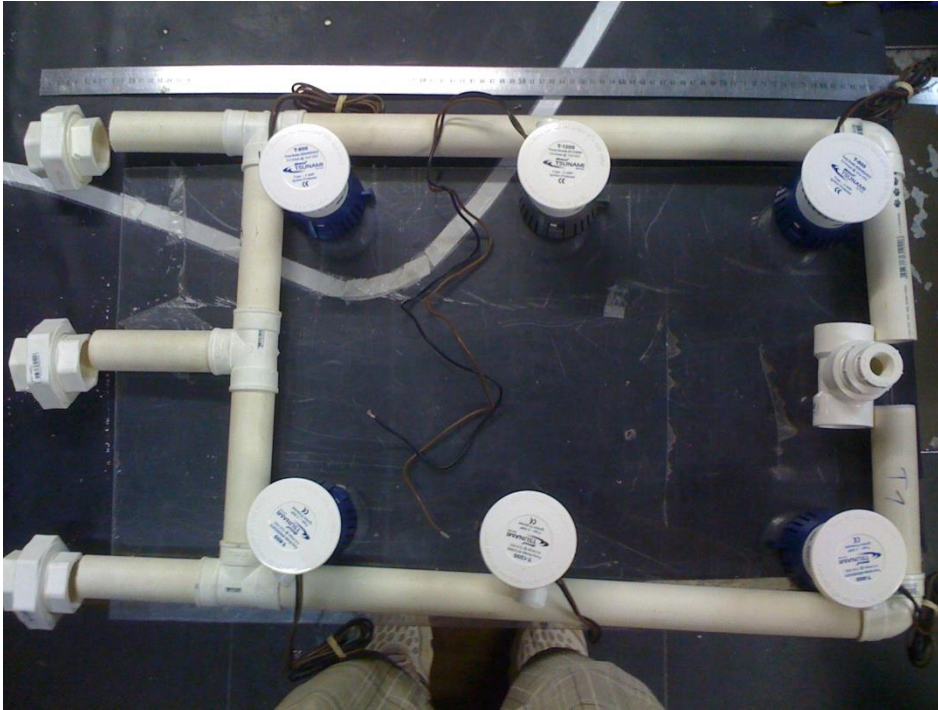


FIGURA 23: ESTRUTURA DA PRIMEIRA VERSÃO DO ROV

Na FIGURA 19 temos a primeira versão do protótipo, inicialmente ele iria ter apenas um andar com uma chapa de acrílico prendendo as bombas.

Foi necessária a modificação do projeto, pois não se obteve pontos de apoios confiáveis para prender as bombas, também foi confirmada a inviabilidade para instalar a central inercial.



FIGURA 24: ESTRUTURA DA SEGUNDA VERSÃO DO ROV

Na FIGURA 20, a segunda versão do protótipo, onde o conceito foi de criar um ROV com estrutura cúbica, para facilitar o controle e providenciar espaço para câmeras, e a Central Inercial ser posicionada no Centro de Gravidade do Corpo.

A dificuldade encontrada foi a fragilização da estrutura por estar relativamente grande, e também poucos pontos de apoio para prender as bombas.



FIGURA 25: ESTRUTURA DA VERSÃO FINAL DO ROV

A versão final do protótipo está representada na FIGURA 21, esta versão permitiu imprimir duas chapas de acrílico para prender as bombas, e deu o espaço suficiente para prender uma Central Inercial no Centro de Gravidade do ROV.

Esta versão foi testada e obteve sucesso nos testes realizados, controlado via RC, conseguindo realizar todos os movimentos esperados.

3.5.4. MONTAGEM

A montagem da estrutura do ROV foi realizada da maneira mais simples encontrada. Como a estrutura é simétrica, tubos de PVC de 40 mm foram cortados do mesmo tamanho para padronizar a montagem. A estrutura tubular foi fixada, com cola de silicone e a maior dificuldade encontrada foi na fixação das bombas. Por ser uma estrutura tubular, a fixação é feita por duas chapas de acrílico, prensadas por 8 parafusos. Na Figura 21 é possível visualizar as chapas de acrílico prensando os motores. A Figura 16 mostra a distribuição das bombas na estrutura.



FIGURA 26: PRÉ-MONTAGEM DA PRIMEIRA VERSÃO DO ROV



FIGURA 27: VISTA DO TOPO COM O POSICIONAMENTO DEFINIDO DAS BOMBAS

4. RESULTADOS

4.1. SIMULAÇÃO DA DINÂMICA

Para a realização da simulação do ROV, foi usada a equação em Espaço de Estado, variando no tempo, independentemente do sistema de coordenadas usado. Definindo o controle de velocidade pelo sistema de coordenadas, solidário ao veículo e o controle de trajetória solidário ao sistema de coordenadas fixo no espaço. Considerando sensores para as velocidades e deslocamentos lineares e angulares, e ainda que estes sensores não possuam ruído ou variância, então podemos fazer:

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = A(t)X(t) + B(t)U(t) \\ Y(y) = FX(t) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = A(t)X(t) + B(t)U(t) \\ Y(y) = FX(t) \end{cases}$$

Onde:

$$A(t) = -M^{-1}[C + D] \quad B(t) = -M^{-1} \quad U(t) = \tau \quad F = Id.$$

Neste caso, as equações acima servem para o cálculo da dinâmica tanto no sistema de coordenada fixo, quanto no móvel, no entanto, para cada um dos casos temos diferentes vetores de estado. Para a dinâmica no sistema móvel, $X(t)=v$, já para o sistema fixo, temos que $X(t)=\dot{\eta}$.

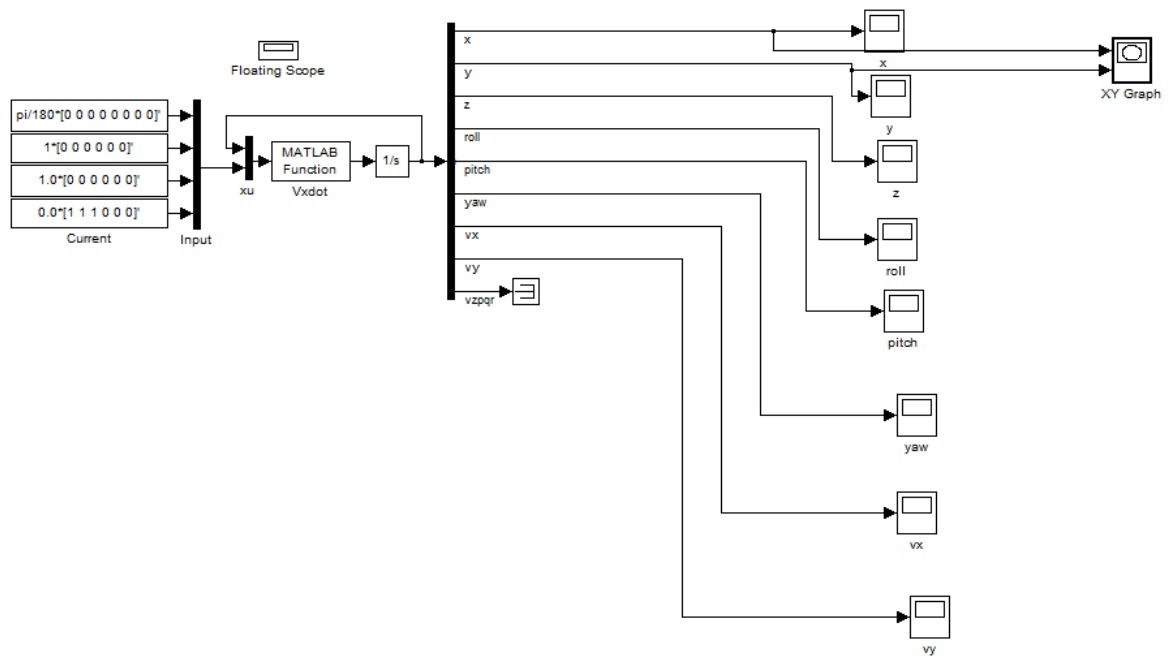


FIGURA 28: SISTEMA DE MALHA ABERTA REPRESENTADO NO SIMULINK

Funções no Matlab:

```
function J=rpy2J(rpy)
```

```
% função da matriz jacobiana
```

```
sf = sin(rpy(1));
cf = cos(rpy(1));
tt = tan(rpy(2));
ct = cos(rpy(2));
```

```
J = [ rpy2R_eb(rpy)' zeros(3,3)
      zeros(3,3)      [1 sf*tt cf*tt; 0 cf -sf; 0 sf/ct cf/ct] ];
```

```
function R_eb=rpy2R_eb(rpy)
```

```

% função da matriz de rotação

sf = sin(rpy(1));
cf = cos(rpy(1));
st = sin(rpy(2));
ct = cos(rpy(2));
sp = sin(rpy(3));
cp = cos(rpy(3));

R_eb = [          +ct*cp          +ct*sp          -st
        +sf*st*cp-cf*sp      +sf*st*sp+cf*cp      +sf*ct
        +cf*st*cp+sf*sp      +cf*st*sp-sf*cp      +cf*ct ];

function xdot=vxdot(xu)

global veh;

tau_b=xu(12+[9:14]);          % força externa e momento em b
tau_e=xu(12+[15:20]);        % força externa e momento em e

v_cee=xu(12+[21:23]);        % velocidade da corrente
a_cee=xu(12+[24:26]);        % aceleração da corrente

p=xu(1:6);                   % posição geral (eta)
v=xu(7:12);                  % velocidade geral (ni)

% matriz de rotação
R_eb=rpy2R_eb(p(4:6));

% vc e vcdot
vc=[R_eb*v_cee; zeros(3,1)];
vcdot=[R_eb*a_cee-vp(v(4:6),R_eb*v_cee); zeros(3,1)];

% state derivative
pdot=rpy2J(p(4:6))*v;
vdot=vcdot+veh.iM*(tau_cor(veh,v,v-vc)+tau_damp(veh,v-vc,de)+...
    tau_rest(veh,p)+tau_b+[R_eb*tau_e(1:3);R_eb*tau_e(4:6)]);

xdot=[pdot;vdot];

```

Considerando um modelo genérico:

Inicializando o modelo no MATLAB:

```

u0=[zeros(8,1);416;zeros(17,1)];
x0=[zeros(6,1);3;zeros(5,1)];

```

Primeiramente, é realizada simulações de malha aberta, isto é, sem controle. Os parâmetros utilizados foram de um Thrust de 416 N, e uma velocidade constante de 3m/s ao longo do eixo x no sistema de coordenadas do corpo.

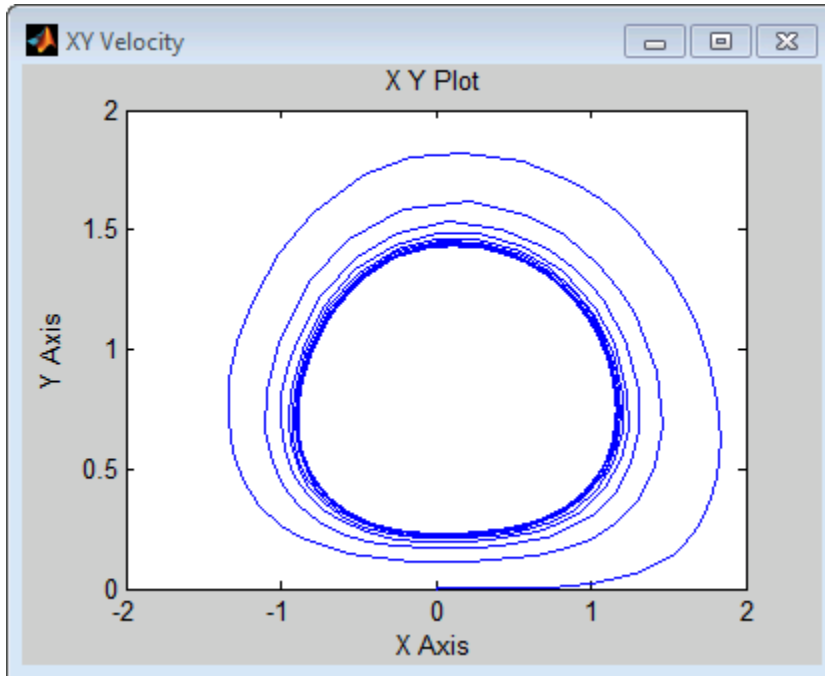


FIGURA 29: SIMULAÇÃO DAS VELOCIDADES X-Y EM UM INTERVALO DE 0 A 400 SEGUNDOS, A VELOCIDADE EM M/S.

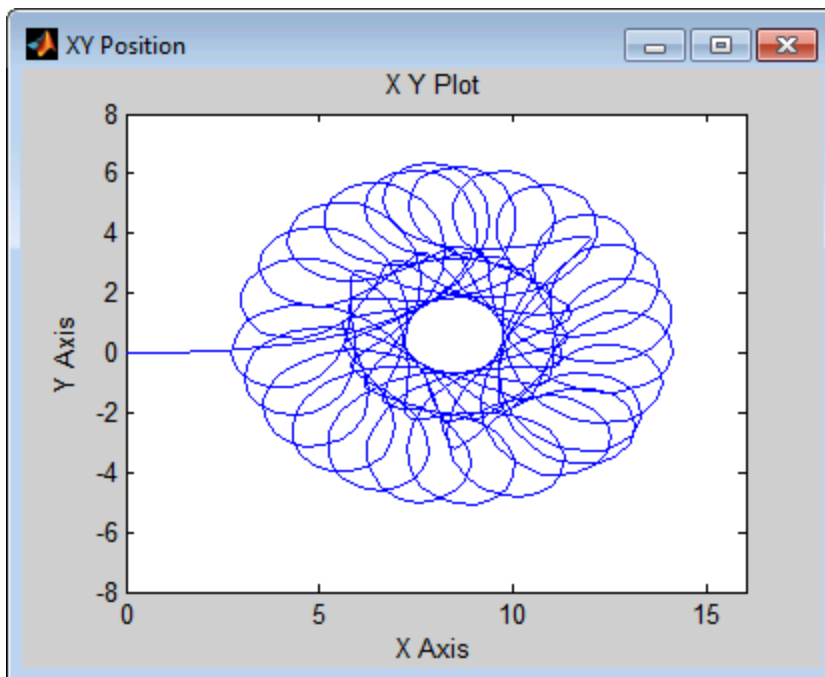


FIGURA 30: SIMULAÇÃO DA POSIÇÃO X-Y EM UM INTERVALO DE 0 A 400 SEGUNDOS, DESLOCAMENTO EM METROS.

Pode-se então confirmar um sistema instável nas condições aplicadas.

4.2. AQUISIÇÃO E CONTROLE

4.2.1. TESTES DA COMUNICAÇÃO COM OS SENSORES USANDO O HYPERTERMINAL

DESCRIÇÃO GERAL DO HYPERTERMINAL:

O HyperTerminal é um programa que pode utilizar para ligar a outros computadores, a sites de Telnet, a uma ou mais BBS (**Bulletin Board System**), a serviços online e a computadores anfitriões, através de um modem, de um cabo de modem nulo ou de uma ligação Ethernet.

Neste caso, podemos utilizar o hyperterminal para identificar os valores de saída do programa da central inercial e então testar o funcionamento dos sensores. A central inercial é conectada por um cabo USB. O passo inicial é identificar a porta de comunicação como mostrado na Figura 30.

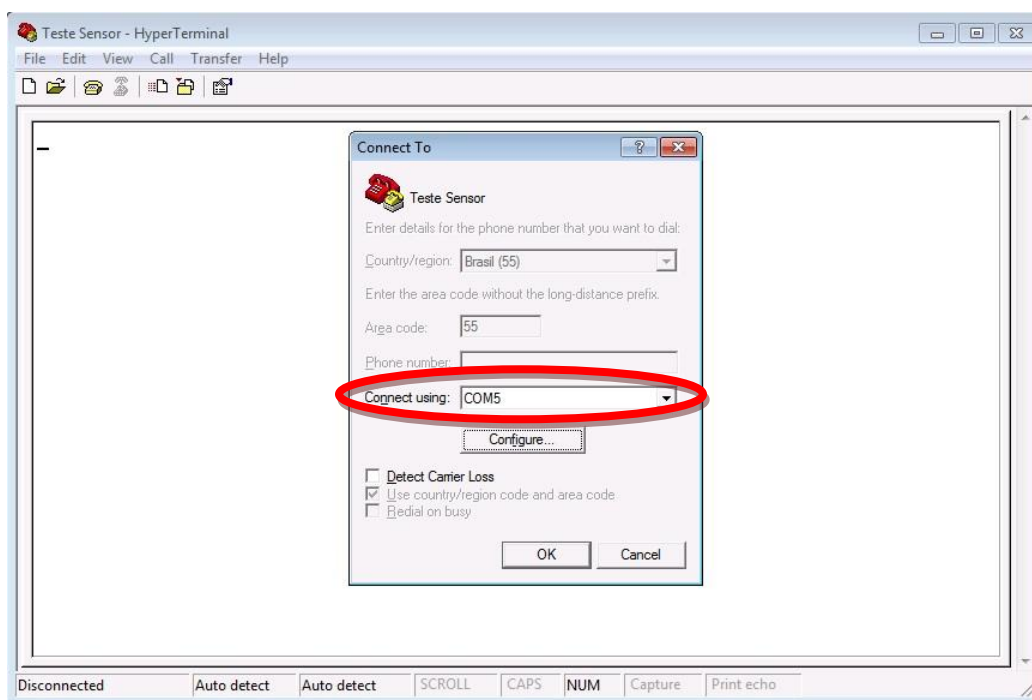


FIGURA 31: HIPERTERMINAL IDENTIFICAÇÃO DA PORTA DE COMUNICAÇÃO

Após identificar a porta de comunicação, o próximo passo é configurar a porta, apenas a quantidade de bits por segundo foi modificada para obter a melhor sincronização de resposta, todos os outros parâmetros são padrões, mostrado na Figura 31.

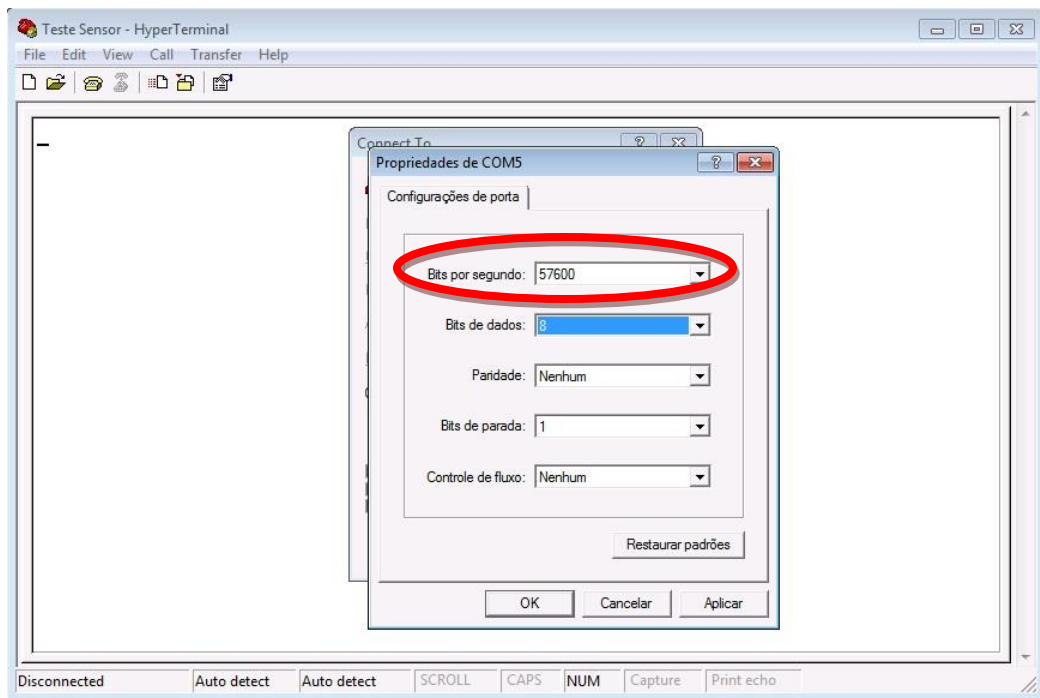


FIGURA 32: CONFIGURAÇÕES DA PORTA COM5

Em seguida, conecta-se com a central inercial, e conseguimos acessar o programa de acordo com a Figura 32. Para acessar os dados em tempo real:

- A tecla 1, seleciona os dados de saída do acelerômetro ADXL345;
- A tecla 2, seleciona os dados de saída do magnetômetro HMC 5843;
- A tecla 3, seleciona os dados de saída do giroscópio ITG-3200;
- A tecla 4, seleciona os todos os dados de saída dos sensores;
- A tecla 5 permite mudar a configuração de bits por segundo dos sensores;

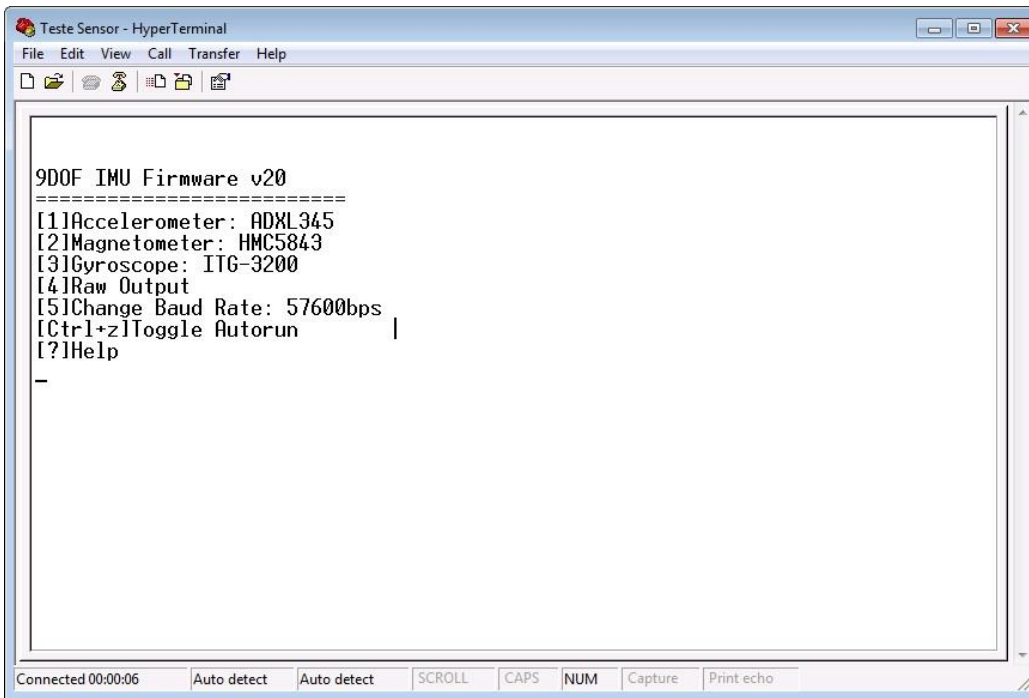


FIGURA 33: FIRMWARE DA CENTRAL INCERCIAL 9DOF IMU

Pressionando a tecla 1, tem-se os resultados abaixo da Figura 33, com isso conseguimos identificar como os valores do acelerômetro são apresentados.

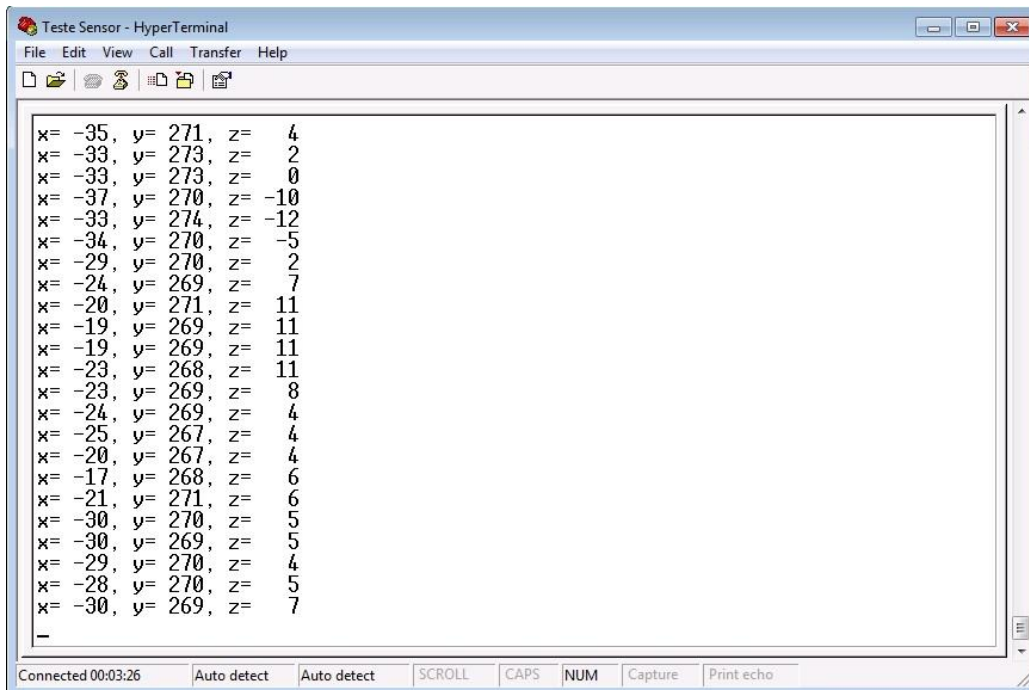


FIGURA 34: VALORES DE SAÍDA DO ACCELERÔMETRO

Pressionando a tecla 2, na Figura 34, pode-se ver os valores apresentados pelo magnetômetro.

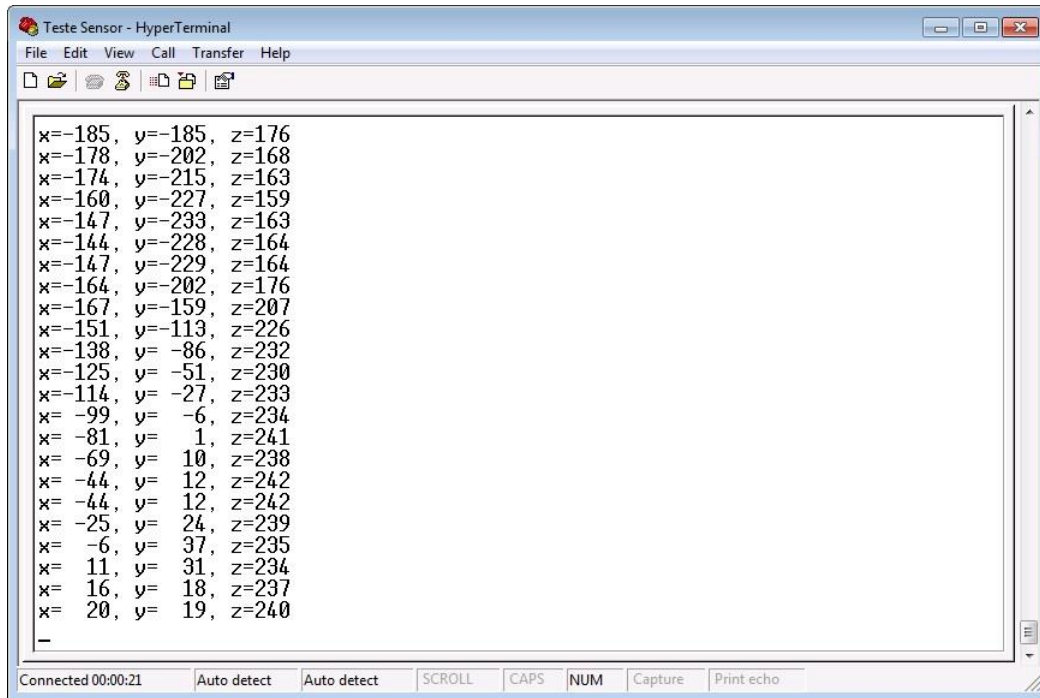


FIGURA 35: VALORES APRESENTADOS PELO MAGNETÔMETRO

A tecla 3, os valores apresentados pelo giroscópio.

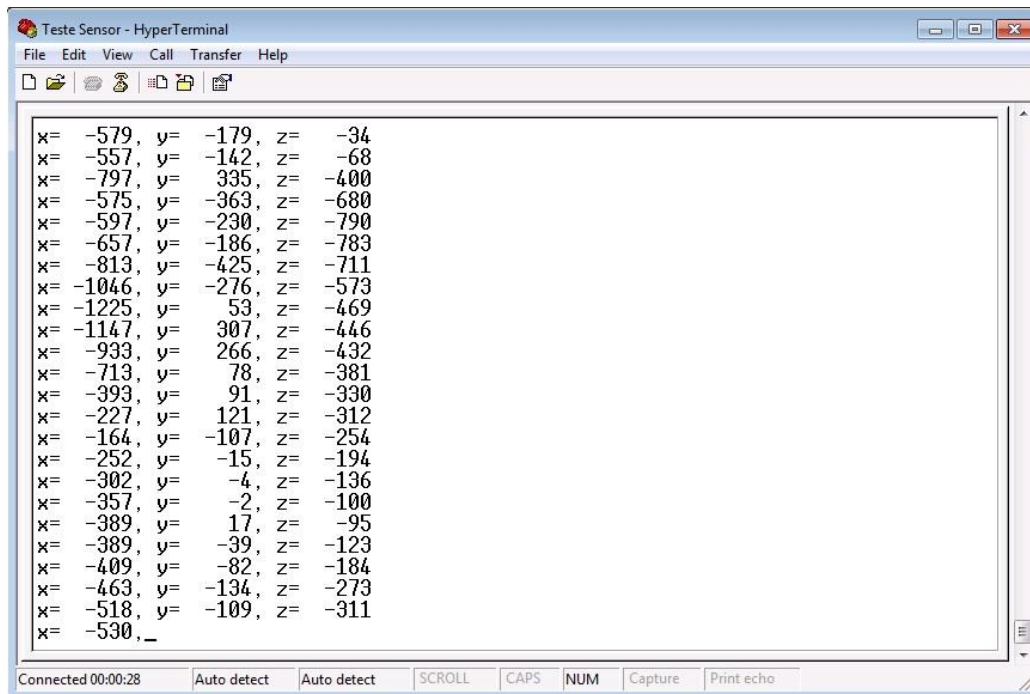


FIGURA 36: VALORES APRESENTADOS PELO GIROSCÓPIO

Finalmente, na Figura 36, com a tecla 4, tem-se todos os valores de todos os sensores, iniciando com um \$ e terminando com #.

```
$-21, -14, 233, -55, 4, -2, 32, -271, 148#
$-20, -13, 234, -56, 3, -5, 30, -272, 156#
$-19, -12, 234, -57, 24, 1, 25, -273, 148#
$-20, -13, 233, -54, 12, -4, 27, -272, 155#
$-20, -13, 232, -55, 16, -3, 27, -272, 155#
$-18, -12, 235, -58, 19, 0, 23, -272, 144#
$-18, -13, 233, -57, 21, 0, 22, -271, 156#
$-19, -12, 233, -57, 17, -4, 25, -277, 153#
$-17, -13, 234, -58, 26, 3, 34, -273, 153#
$-17, -12, 234, -57, 18, -2, 30, -270, 152#
$-19, -12, 236, -57, 21, -1, 34, -273, 151#
$-19, -13, 232, -57, 23, 0, 28, -274, 146#
$-18, -12, 234, -58, 13, 1, 36, -278, 159#
$-17, -12, 235, -54, 23, 0, 28, -269, 151#
$-17, -12, 235, -59, 30, -5, 33, -270, 151#
$-16, -12, 234, -59, 32, -1, 24, -270, 155#
$-17, -12, 235, -57, 26, 1, 29, -264, 153#
$-17, -11, 233, -59, 28, 0, 29, -264, 153#
$-17, -12, 234, -57, 27, -1, 26, -270, 155#
$-18, -13, 233, -58, 24, -3, 33, -276, 157#
$-17, -12, 236, -61, 29, 1, 28, -276, 145#
$-18, -13, 233, -58, 29, -1, 35, -281, 142#
$-16, -12, 234, -57, 26, 1, 26, -270, 150#
```

FIGURA 37: TODOS OS VALORES DOS SENSORES REPRESENTADOS NO HYPERTERMINAL

Todos os testes acima são fundamentais para conseguir identificar a aquisição dos dados em uma plataforma de programação.

4.2.2. AQUISIÇÃO E CONTROLE PID USANDO O LABVIEW

A plataforma escolhida para obtenção do sinal dos sensores e implementação do controle PID, é o LABVIEW, pois se consegue obter em tempo real os dados aquisitados e também gerar um sinal de saída do controle PID.

O programa em Labview da Figura 37 tem o seguinte processo:

- Seleciona a porta COM5 com as configurações da central inercial;
- No ponto indicado pela Figura 37, selecionamos qual saída do sensor desejamos controlar;
- Separamos os dados em saídas desejadas;
- Realiza o controle PID dos parâmetros obtidos;

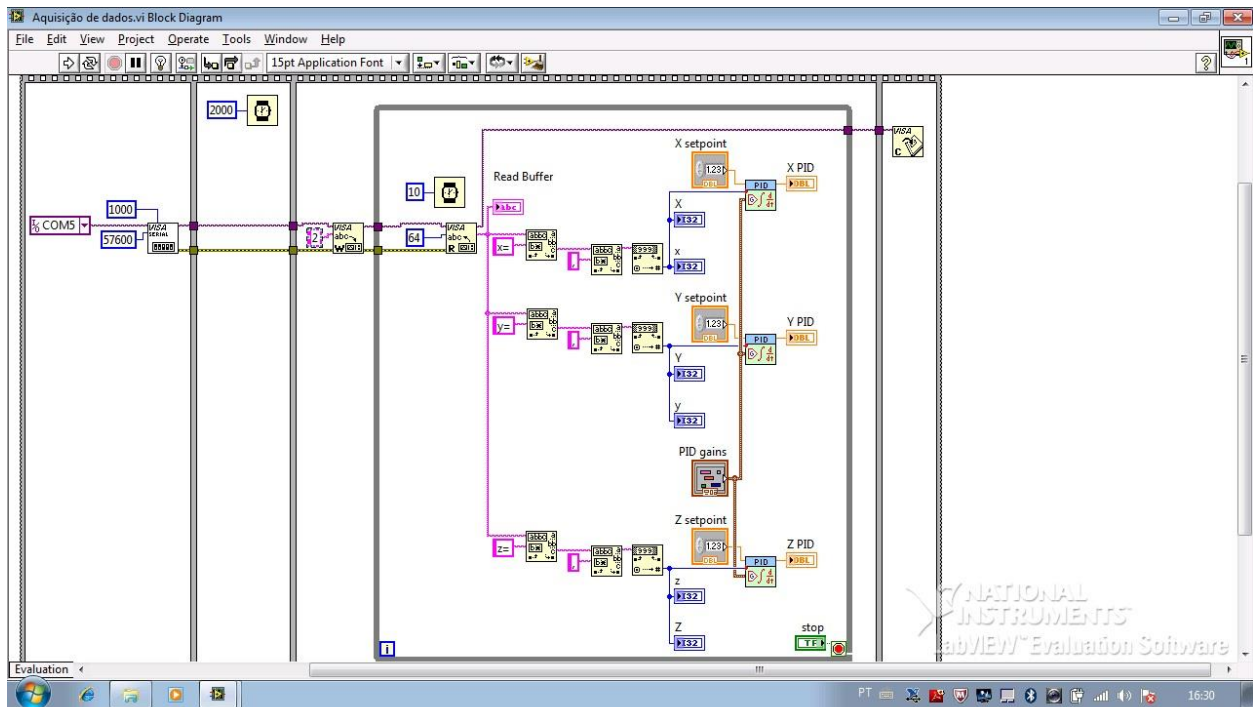


FIGURA 38: PROGRAMA NO LABVIEW PARA AQUISIÇÃO E CONTROLE PID

Na interface com o usuário, tem-se a leitura das variáveis dos sensores, o controle dos *setpoints*, o controle dos ganhos PID e a leitura da saída do controle PID (Figura 38).

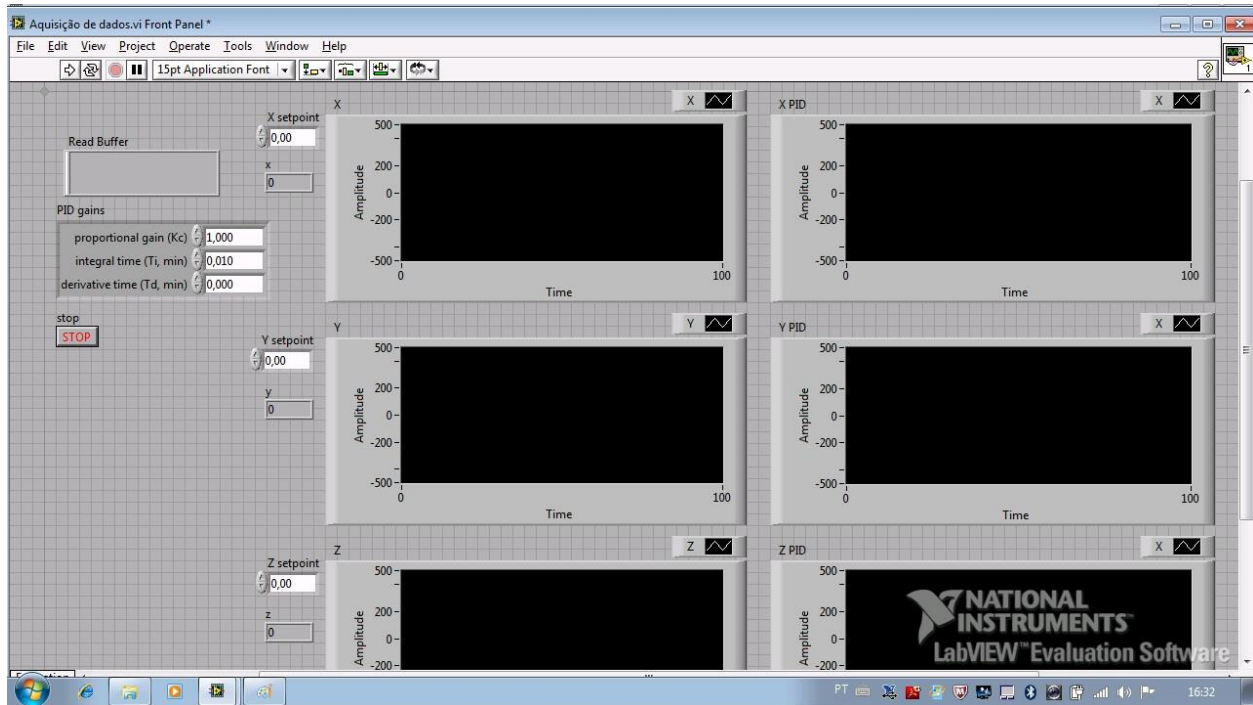


FIGURA 39: INTERFACE COM O USUÁRIO

A Figura 39 exibe os testes com o magnetômetro, o intervalo é de -240 até 240, o 0 é definido quando a direção y está na mesma direção do norte, isto é, de 0 até -240 é 180° até 360° em uma bússola. para estabilização dos setpoints. A melhor calibração dos ganhos encontrada para este caso foi um controlador PD, onde o ganho $K_c = 0,4$ e o ganho $T_d = 0,001$.



FIGURA 40: CALIBRANDO O PID PELOS SETPOINTS

O intervalo das saídas PID vai de -100 a 100 isto significa pra uma voltagem de saída de -12V a 12V. A Figura 40 mostra o comportamento da resposta do controle PD ao valor da variável se aproximar do *setpoint*. Igualando a variável x ao *setpoint* pode-se identificar uma oscilação em torno de 0 da saída após o controle PID. Enquanto que na variável y, o *setpoint* está em -267,00 e a leitura do sensor é -65, então se espera uma alimentação negativa da saída do PID na variável y para igualar a leitura do sensor ao *setpoint*, como identificado na Figura 40.

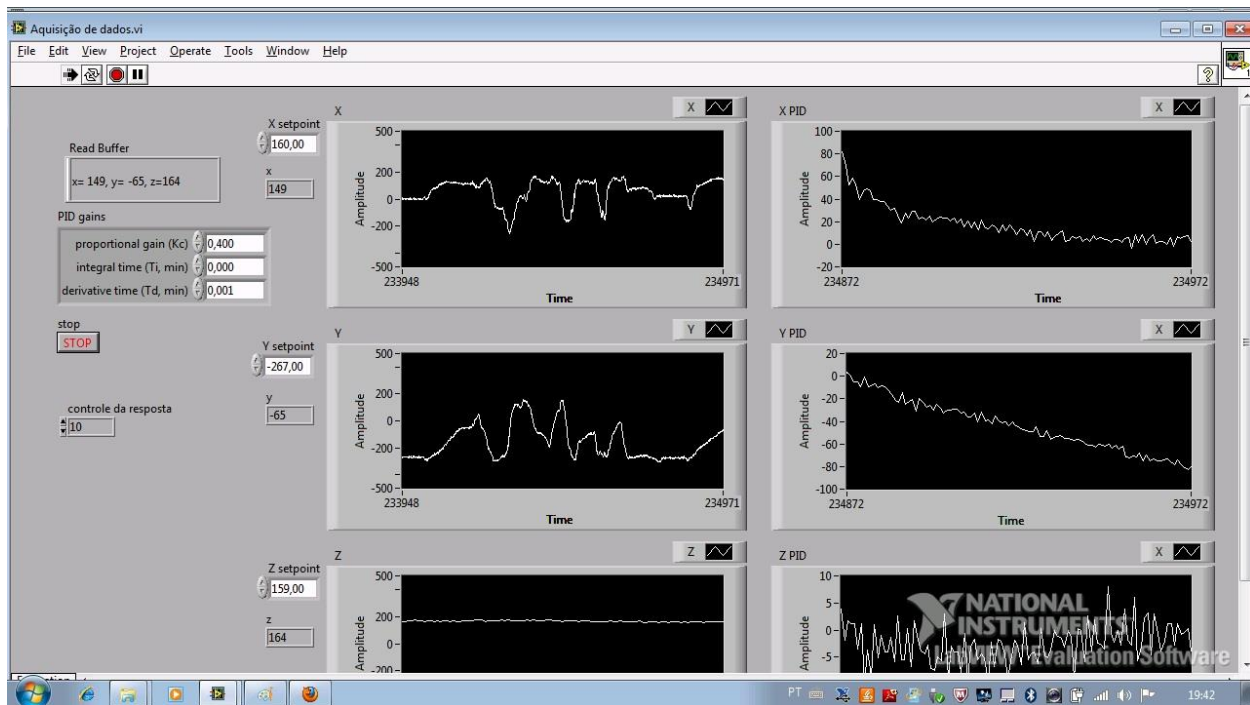


FIGURA 41: RESPOSTA PID AO SE APROXIMAR DO SETPOINT

Na Figura 41 tem-se a definição de um *setpoint* de 200 enquanto que a posição em x está -55. Isto implica em uma saída positiva pros *trusters* de 12 V.

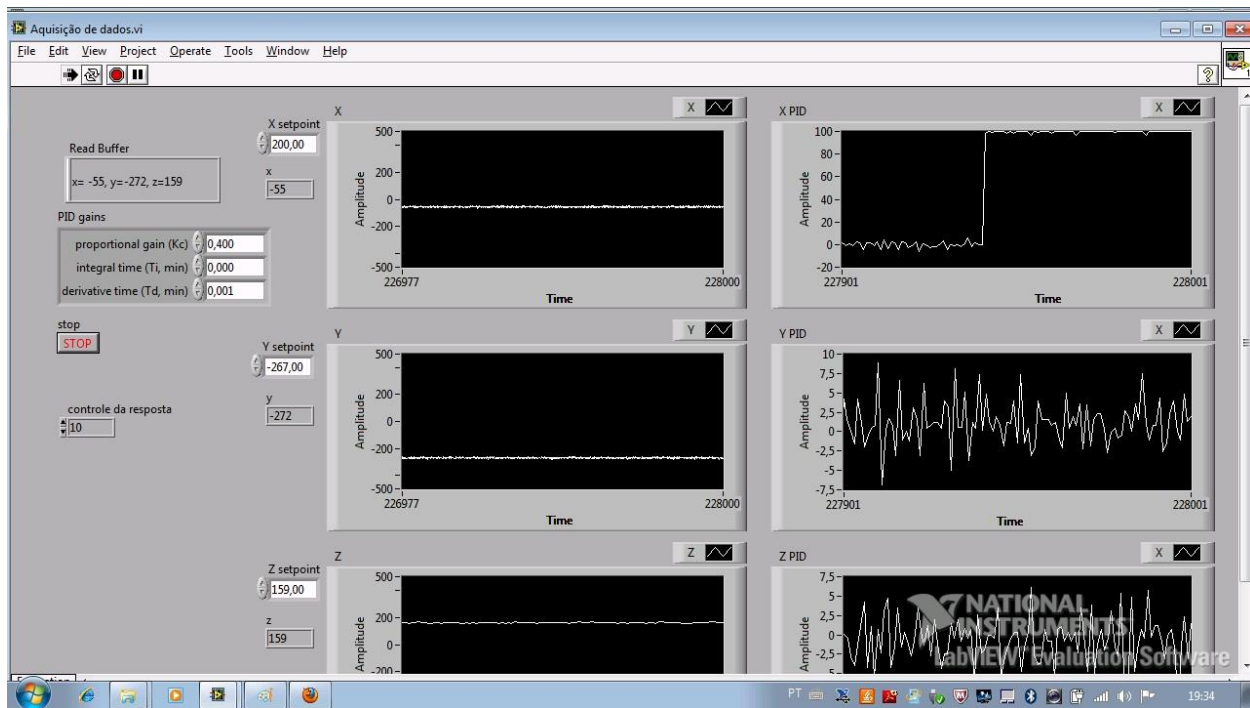


FIGURA 42: SAÍDA POSITIVA PARA ESTABILIZAÇÃO DO SETPOINT

Na Figura 42, consegue-se identificar a velocidade de resposta do controle e a estabilização em torno do 0 quando se atinge o *setpoint*.



FIGURA 43: VELOCIDADE DE RESPOSTA DO CONTROLE PID

4.3. TESTES DO ROV COM CONTROLE RC

O projeto do ROV implementado com o controle RC, foi testado em uma piscina e os resultados obtidos foram bons, pois conseguimos uma grande estabilidade e suavidade em seus movimentos. O ROV se comportou muito bem nos testes, a seguir mostraremos como os testes foram realizados. Para realização do controle RC seis canais de rádio foram utilizados,

Toda a parte de construção e Testes fora d'água foram realizados no laboratório de robótica da PUC-RIO.

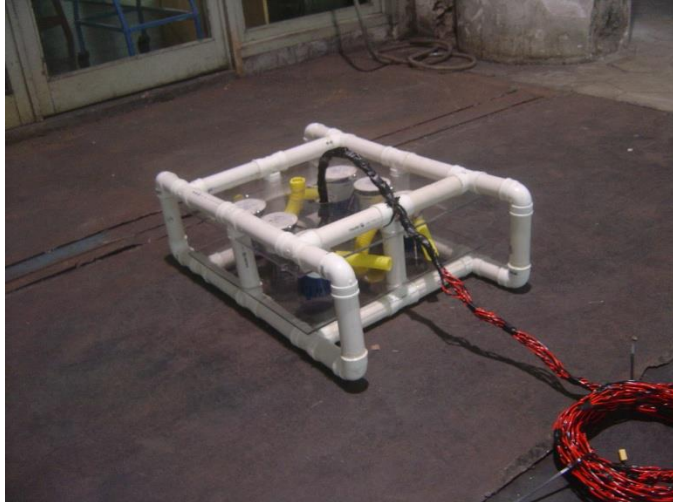


FIGURA 44: PROTÓTIPO MONTADO

Os testes de submersão e funcionamento do ROV foram realizados na piscina do condomínio parque das gaivotas.

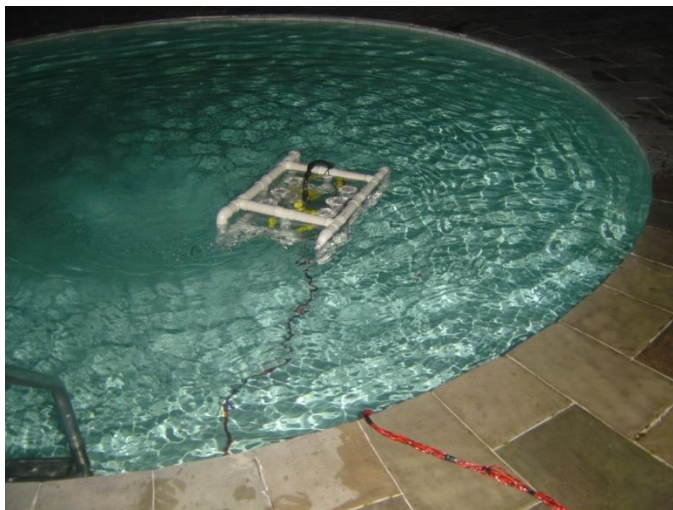


FIGURA 45: MOVIMENTAÇÃO DO PROTÓTIPO

Na figura abaixo podemos visualizar o ROV começando o processo de submersão, somente o atuador vertical superior está sendo acionado.



FIGURA 46: INICIANDO PROCESSO DE SUBMERSÃO

Nesta figura podemos visualizar o ROV já totalmente submerso, agora com 3 atuadores sendo acionados, o vertical superior e os dois da parte traseira do veículo.

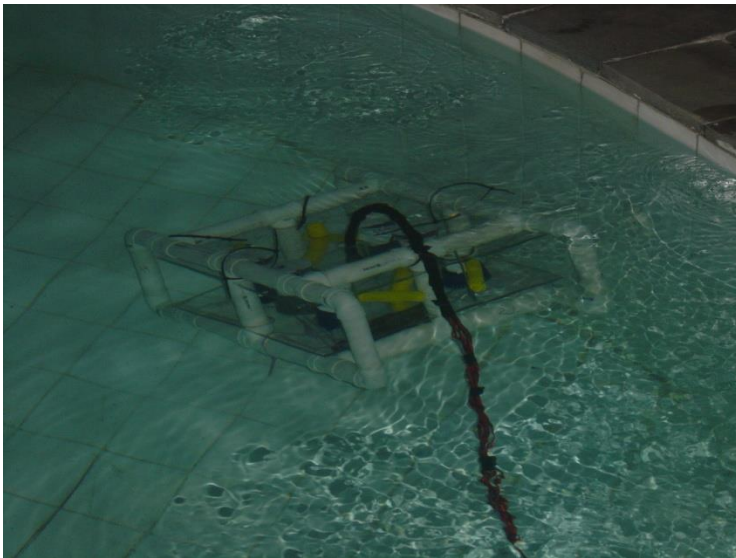


FIGURA 47: PROTÓTIPO SUBMERSO

5. CONCLUSÕES

O projeto acabou sendo dividido em diversas etapas, do início teórico de como movimentar um corpo rígido dentro de um fluido até os testes em uma piscina do protótipo montado, validando a teoria.

Utilizando ferramentas computacionais para a realização de simulações, e definição da estrutura foi fundamental para economizar tempo e validar os conceitos antes da construção do protótipo.

Antes da realização do primeiro teste, 2 protótipos foram montados, onde o primeiro foi descartado por problema de fixação dos componentes e ter uma geometria desfavorável para a movimentação dentro de um fluido. O segundo protótipo, apesar de ter uma movimentação mais favorável, ainda foi encontrado dificuldade na fixação das bombas.

O terceiro protótipo foi um sucesso, pois teve sucesso na rigidez da estrutura, uma excelente geometria, e no teste com controle RC em uma piscina conseguiu-se realizar todos os movimentos esperados.

Um projeto nasce a partir de um esboço, e sendo assim evolui para a realidade, porém mesmo com todas as ferramentas de simulação, ainda descartamos duas versões, então um bom projeto nasce de um bom planejamento, sempre utilizando todos os recursos possíveis para evitar desperdiçar tempo e material.

6. BIBLIOGRAFIA

OGATA, K. Engenharia de Controle Moderno. 3a Edição. Editora LTC. Rio de Janeiro. 1998.

Salgado-Jimenez, T. (2004). Contribution à la comande d'un robot sous-marin de type torpille, PhD thesis, Université de Montpellier II. HOVER, 2002

YUH, 1995. Technologies in Oceanic Engineering

Kim, T.W., Yuh, J., 1999 Task description language for underwater robots.

Guidance and Control of Ocean Vehicles - Thor I. Fossen

<http://www.rov.org/educational/pages/Small%20Vehicles.html>

<http://www.btinternet.com/~derek.mackay/offshore/images/rov/>

<http://www.soest.hawaii.edu/hannides/galleries/Calbasins/Tiburon.html>

<http://www.whoi.edu/science/GG/people/adeschamps/cruises/cruisee.html>

7. APÊNDICES

TSUNAMI BILGE PUMPS

With their innovative engineering and compact design, Tsunami pumps deliver high output from a small package. We use the most advanced material available, including the best quality bearings and state-of-the-art brushes, alloys and magnets. Our patented shaft seal prevents leaks caused by misalignment and our caulked and tinned wiring eliminates wicking, prevents water damage and resists corrosion.

NMMA Numbers

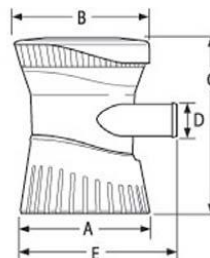
| Part No. | NMMA No. | IMCI (CE) Certificate No. |
|-------------|----------|---------------------------|
| 4606 Series | 2456898 | PATT042 |
| 4608 Series | 2456899 | PATT043 |
| 4609 Series | 2456900 | PATT044 |
| 4612 Series | 2456901 | PATT046 |
| 4613 Series | 2456902 | PATT045 |

Specifications

| Model No. | Rated Voltage | Amp Draw | GPH Output @ Design Voltage 13.6 VDC | | | | Amp Draw | GPH Output @ Nominal Voltage 12.0 VDC | | | | Fuse Size | Hose Size |
|-----------|---------------|----------|--------------------------------------|---------|---------|----------|----------|---------------------------------------|---------|---------|----------|-----------|-------------|
| | | | 0 ft. | 3.3 ft. | 6.7 ft. | Max Head | | 0 ft. | 3.3 ft. | 6.7 ft. | Max Head | | |
| T500 | 12 | 1.8 | 600 | 440 | 260 | 9 ft. | 1.4 | 550 | 360 | 160 | 8 ft. | 3-amp | 3/4" I.D. |
| T800 | 12 | 3 | 800 | 660 | 540 | 13 ft. | 2.5 | 760 | 600 | 400 | 11 ft. | 4-amp | 3/4" I.D. |
| | 24 | 1.3 | 800 | 660 | 540 | 13 ft. | 1.1 | 760 | 600 | 400 | 11 ft. | 2-amp | 3/4" I.D. |
| T1200 | 12 | 3.5 | 1200 | 900 | 700 | 11 ft. | 3 | 1100 | 810 | 480 | 9 ft. | 5-amp | 1-1/8" I.D. |
| | 24 | 1.5 | 1200 | 900 | 700 | 11 ft. | 1.3 | 1100 | 810 | 480 | 9 ft. | 2-amp | 1-1/8" I.D. |

Pump Dimensions

| Model No. | A | B | C | D | E |
|-----------|--------|--------|--------|-------------|--------|
| T500 | 2-3/4" | 2-7/8" | 3-5/8" | 3/4" I.D. | 3-1/8" |
| T800 | 3-1/8" | 3-1/4" | 4-3/8" | 3/4" I.D. | 3-1/2" |
| T1200 | 3-1/8" | 3-1/4" | 4-3/8" | 1-1/8" I.D. | 3-3/4" |



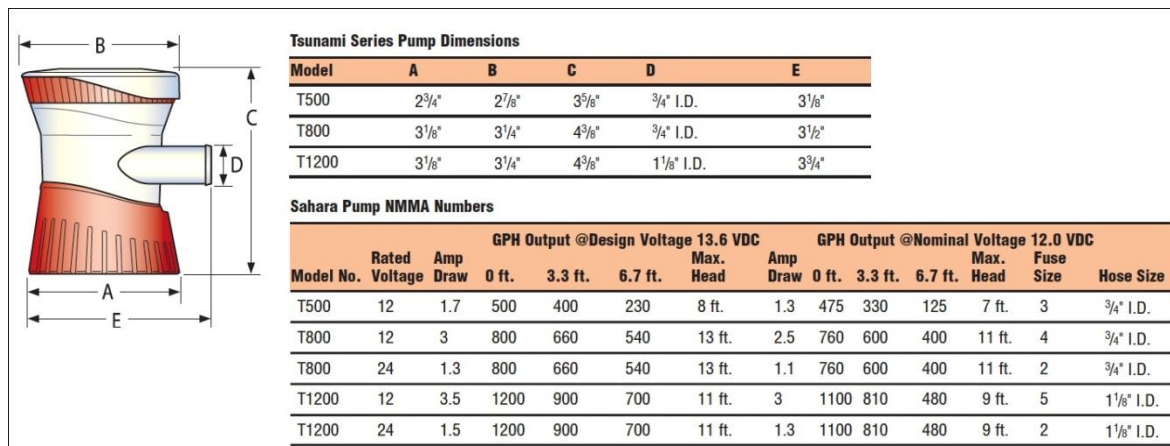


TABELA 4: ESPECIFICAÇÃO ATTWOOD® TSUNAMI BILGE PUMP



FIGURA 48: RÁDIO SPECTRUM DX6

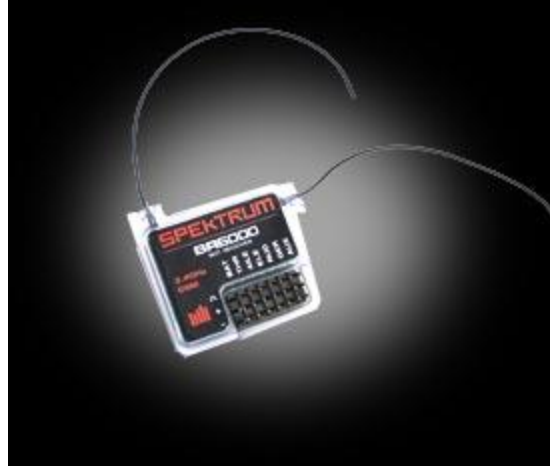


FIGURA 49: RECEPTOR SPECTRUM BR6000

$T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_S = 2.5\text{ V}$, $V_{DD I/O} = 1.8\text{ V}$, acceleration = 0 g, $C_S = 1\ \mu\text{F}$ tantalum, $C_{I/O} = 0.1\ \mu\text{F}$, unless otherwise noted.

| Table 1. Specifications ₁ | Test Conditions | Min | Typ | Max | Unit |
|---|--|-------------------------------|-----------|------|----------------------|
| SENSOR INPUT | | | Each axis | | |
| Measurement Range | User selectable | $\pm 2, \pm 4, \pm 8, \pm 16$ | | | g |
| Nonlinearity | Percentage of full scale | ± 0.5 | | | % |
| Inter-Axis Alignment Error | | ± 0.1 | | | Degrees |
| Cross-Axis Sensitivity ₂ | | ± 1 | | | % |
| OUTPUT RESOLUTION | | | Each axis | | |
| All g Ranges | 10-bit resolution | 10 | | | Bits |
| $\pm 2\text{ g}$ Range | Full resolution | 10 | | | Bits |
| $\pm 4\text{ g}$ Range | Full resolution | 11 | | | Bits |
| $\pm 8\text{ g}$ Range | Full resolution | 12 | | | Bits |
| $\pm 16\text{ g}$ Range | Full resolution | 13 | | | Bits |
| SENSITIVITY | | | Each axis | | |
| Sensitivity at $X_{OUT}, Y_{OUT}, Z_{OUT}$ | $\pm 2\text{ g}$, 10-bit or full resolution | 232 | 256 | 286 | LSB/g |
| Scale Factor at $X_{OUT}, Y_{OUT}, Z_{OUT}$ | $\pm 2\text{ g}$, 10-bit or full resolution | 3.5 | 3.9 | 4.3 | mg/LSB |
| Sensitivity at $X_{OUT}, Y_{OUT}, Z_{OUT}$ | $\pm 4\text{ g}$, 10-bit resolution | 116 | 128 | 143 | LSB/g |
| Scale Factor at $X_{OUT}, Y_{OUT}, Z_{OUT}$ | $\pm 4\text{ g}$, 10-bit resolution | 7.0 | 7.8 | 8.6 | mg/LSB |
| Sensitivity at $X_{OUT}, Y_{OUT}, Z_{OUT}$ | $\pm 8\text{ g}$, 10-bit resolution | 58 | 64 | 71 | LSB/g |
| Scale Factor at $X_{OUT}, Y_{OUT}, Z_{OUT}$ | $\pm 8\text{ g}$, 10-bit resolution | 14.0 | 15.6 | 17.2 | mg/LSB |
| Sensitivity at $X_{OUT}, Y_{OUT}, Z_{OUT}$ | $\pm 16\text{ g}$, 10-bit resolution | 29 | 32 | 36 | LSB/g |
| Scale Factor at $X_{OUT}, Y_{OUT}, Z_{OUT}$ | $\pm 16\text{ g}$, 10-bit resolution | 28.1 | 31.2 | 34.3 | mg/LSB |
| Sensitivity Change Due to Temperature | | ± 0.01 | | | %/ $^\circ\text{C}$ |
| 0 g BIAS LEVEL | | | Each axis | | |
| 0 g Output for X_{OUT}, Y_{OUT} | -150 | ± 40 | +150 | | mg |
| 0 g Output for Z_{OUT} | -250 | ± 80 | +250 | | mg |
| 0 g Offset vs. Temperature for x-, y-Axes | | ± 0.8 | | | mg/ $^\circ\text{C}$ |
| 0 g Offset vs. Temperature for z-Axis | | ± 4.5 | | | mg/ $^\circ\text{C}$ |
| NOISE PERFORMANCE | | | | | |
| Noise (x-, y-Axes) | Data rate = 100 Hz for $\pm 2\text{ g}$, | <1.0 | | | LSB rms |

| | | | | |
|--|---|-----|--|-------------|
| | 10-bit or full resolution | | | |
| Noise (z-Axis) | Data rate = 100 Hz for $\pm 2 g$, 10-bit or full resolution | | <1.5 | LSB rms |
| OUTPUT DATA RATE AND BANDWIDTH | | | User selectable | |
| Measurement Rate ³ | 6.25 | | 3200 | Hz |
| SELF-TEST ⁴ | | | Data rate ≥ 100 Hz, $2.0 V \leq V_S \leq 3.6 V$ | |
| Output Change in x-Axis | 0.20 | | 2.10 | <i>g</i> |
| Output Change in y-Axis | -2.10 | | -0.20 | <i>g</i> |
| Output Change in z-Axis | 0.30 | | 3.40 | <i>g</i> |
| POWER SUPPLY | | | | |
| Operating Voltage Range (V_S) | 2.0 | 2.5 | 3.6 | V |
| Interface Voltage Range (V_{DD} V_{IO}) | $V_S \leq 2.5 V$ | 1.7 | 1.8 | $V_S V$ |
| $V_S \geq 2.5 V$ | 2.0 | 2.5 | $V_S V$ | |
| Supply Current | Data rate > 100 Hz | | 145 | μA |
| Data rate < 10 Hz | 40 | | | μA |
| Standby Mode Leakage Current | 0.1 | 2 | | μA |
| Turn-On Times ⁵ | Data rate = 3200 Hz | | 1.4 | ms |
| TEMPERATURE | | | | |
| Operating Temperature Range | -40 | +85 | | $^{\circ}C$ |
| WEIGHT | | | | |
| Device Weight | 20 | | | mg |

TABELA 5 : ESPECIFICAÇÕES DO ADXL345, ACELEROMETRO DIGITAL

| Characteristics | Conditions* | Min | Typ | Max | Units |
|------------------------------|---|------|-------|-------|-------------|
| Power Supply | | | | | |
| Supply Voltage | AVDD Referenced to AGND | 2.5 | | 3.3 | Volts |
| | DVDD Referenced to DGND | 1.6 | 1.8 | 2.0 | Volts |
| Current Draw | Sleep Mode (dual supplies) | - | 2.5 | - | uA |
| | Idle Mode (dual supplies) | - | 240 | - | uA |
| | Measurement Mode | - | 0.8 | - | mA |
| | AVDD = 2.5 volts, DVDD = 1.8 volts | | | | |
| | Sleep Mode (single supply) | - | 110 | - | uA |
| | Idle Mode (single supply) | - | 340 | - | uA |
| | Measurement Mode | - | 0.9 | - | mA |
| | AVDD = 2.5 volts | | | | |
| Performance | | | | | |
| Field Range | Full scale (FS) – total applied field | -4 | | +4 | gauss |
| Cross-Axis Sensitivity | Cross field = 0.5 gauss, Happied = ±3 gauss | | ±0.2% | | %FS/gauss |
| Disturbing Field | Sensitivity starts to degrade. Use S/R pulse to restore sensitivity. | | | 20 | gauss |
| Max. Exposed Field | No perming effect on zero reading | | | 10000 | gauss |
| Measurement Period | Output Rate = 50Hz (10Hz typ.) | | - | 10 | msec |
| I ² C Address | 7-bit address | | 0x1E | | hex |
| | 8-bit read address | | 0x3D | | hex |
| | 8-bit write address | | 0x3C | | hex |
| I ² C Rate | Controlled by I ² C Master | -10 | | +10 | % |
| I ² C bus pull-up | Internal passive resistors | | 50 | | kilo-ohms |
| I ² C Hysteresis | Hysteresis of Schmitt trigger inputs on SCL and SDA - Fall (DVDD=1.8V) Rise (DVDD=1.8V) | | 0.603 | | Volts |
| | | | 1.108 | | Volts |
| Self Test | Positive and Negative Bias Mode | | ±0.55 | | gauss |
| Mag Dynamic Range | 3-bit gain control | ±0.7 | ±1.0 | ±4.0 | gauss |
| Linearity | Full scale input range | | | 0.1 | ±% FS |
| Gain Tolerance | All gain/dynamic range settings | | ±5 | | % |
| Bandwidth | -3dB point | | 10 | | kHz |
| Resolution | AVDD=3.0V, GN | | 7 | | milli-gauss |
| Signal-to Noise Ratio | | 70 | | | dB |
| Turn-on Time | | | 200 | | us |
| General | | | | | |
| ESD Voltage | | | | 700 | V |
| Operating Temperature | Ambient | -30 | | 85 | °C |
| Storage Temperature | Ambient, unbiased | -40 | | 125 | °C |
| Weight | Nominal | | 50 | | milli-grams |

TABELA 6: ESPECIFICAÇÕES DO MAGNETOMETRO DIGITAL, HMC5843

Typical Operating Circuit of Section 4.2, VDD = 2.5V, VLOGIC = 1.71V to VDD, TA=25°C.

| Parameters | Conditions | Min | Typical | Max | Units | Notes |
|--|--|------------|---------|------------|-------|-------|
| VDD POWER SUPPLY | | | | | | |
| Operating Voltage Range | | 2.1 | | 3.6 | V | 2 |
| Power-Supply Ramp Rate | Monotonic ramp. Ramp rate is 10% to 90% of the final value (see Figure in Section 4.4) | 0 | | 5 | ms | 2 |
| Normal Operating Current | | | 6.5 | | mA | 1 |
| Sleep Mode Current | | | 5 | | µA | 5 |
| VLOGIC REFERENCE VOLTAGE | | | | | | |
| Voltage Range | VLOGIC must be ≤VDD at all times | 1.71 | | VDD | V | |
| VLOGIC Ramp Rate | Monotonic ramp. Ramp rate is 10% to 90% of the final value (see Figure in Section 4.4) | | | 1 | ms | 6 |
| Normal Operating Current | | | 100 | | µA | |
| START-UP TIME FOR REGISTER READ/WRITE | | | 20 | | ms | 5 |
| ĤC ADDRESS | AD0 = 0 | | 1101000 | | | 6 |
| | AD0 = 1 | | 1101001 | | | 6 |
| DIGITAL INPUTS (AD0, CLKIN) | | | | | | |
| V _{IS} , High Level Input Voltage | | 0.9*VLOGIC | | | V | 5 |
| V _{IL} , Low Level Input Voltage | | | | 0.1*VLOGIC | V | 5 |
| C _i , Input Capacitance | | | | 5 | pF | 7 |
| DIGITAL OUTPUT (INT) | | | | | | |
| V _{OH} , High Level Output Voltage | OPEN=0, Rload=1MΩ | 0.9*VLOGIC | | | V | 2 |
| V _{OL} , Low Level Output Voltage | OPEN=0, Rload=1MΩ | | | 0.1*VLOGIC | V | 2 |
| V _{OL,INT} , INT Low-Level Output Voltage | OPEN=1, 0.3mA sink current | | | 0.1 | V | 2 |
| Output Leakage Current | OPEN=1 | | 100 | | nA | 4 |
| t _{INT} , INT Pulse Width | LATCH_INT_EN=0 | | 50 | | µs | 4 |

Notes:

1. Tested in production
2. Based on characterization of 30 pieces over temperature on evaluation board or in socket
4. Typical. Randomly selected part measured at room temperature on evaluation board or in socket
5. Based on characterization of 5 pieces over temperature
6. Guaranteed by design

TABELA 7 : ESPECIFICAÇÕES DO GIROMETRO, ITG-3200