

Bruno Rufino Fovitzky
Lealdo de Góis Andrade
Ricardo de Carvalho Milani

SISTEMA DE ESTABILIZAÇÃO MULTI-ATIVA PARA EMBARCAÇÕES - SEMA

Trabalho de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo.

Área de Concentração:
Engenharia Mecatrônica

Orientador: Prof. Dr. Nicola Getschko

São Paulo
2010

FICHA CATALOGRÁFICA

Fovitzky, Bruno Rufino

Sistema de estabilização multi-ativa para embarcações – SEMA /

**B.R. Fovitzky, L.G. Andrade, R.C. Milani. -- São Paulo, 2011.
p.**

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

1.Estabilidade de embarcações (Modelagem; Simulação computacional) 2.Geometria e modelagem computacional 3.MATLAB 4.Propulsão I. Andrade, Lealdo de Góis II.Milani, Ricardo de Carvalho III.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos IV.t.

AGRADECIMENTOS

À FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo apoio financeiro através do programa PIPE, sem o qual teria sido inviável a construção do protótipo do SEMA.

Ao Prof. Dr. Nicola Getschko pela orientação e chefia do projeto.

Aos Prof. Dr. Eduardo Aoun Tannuri e Thiago de Castro Martins pelo auxílio com os problemas de controle e seleção de componentes eletrônicos.

Ao Dr. João Alcino de Andrade Martins, ao Me. Carlos Alberto Guedes Freire de Souza e Me. Lázaro Moratelli Junior pela disposição em nos dar acesso e auxiliar com o Tanque de Provas da Naval.

A Roberto Romano pelo trabalho com a eletrônica.

A Daniel Prata Vieira pelo trabalho feito com a simulação computacional da embarcação.

À STMicrosystems pelo fornecimento do giroscópio eletrônico utilizado na construção do protótipo.

RESUMO

A proposta deste trabalho é contribuir com o projeto, modelagem e simulação computacional, construção e teste de um protótipo de um sistema de estabilização para embarcações com características operacionais, construtivas e de custo compatíveis com embarcações de médio e pequeno porte. A estabilização da embarcação se dará com ela sem curso, através da ação de dois propulsores atuando em oposição com controle bang-bang de dois intervalos de atuação, gerando empuxo que resulta em torque a favor da estabilidade. Um giroscópio é usado para a detecção de movimentos no sentido do eixo longitudinal da embarcação. As partes de simulação computacional e de pré-construção do protótipo foram feitas com os softwares MATLAB e WAMIT, sendo o primeiro para a simulação e o controle em tempo real, e o segundo para gerar dados de momento de ondas a partir da geometria e massa da embarcação. Por fim, a utilização do controle bang-bang se mostrou eficiente para os parâmetros de conforto estabelecidos, mostrando uma redução de cerca de 55% no balanço da embarcação.

Palavras-chave: Estabilização Ativa de Embarcações, Controle Bang-Bang, MATLAB, WAMIT, Propulsores Elétricos.

ABSTRACT

The proposal of this work is to contribute with the project, computer modeling and simulation, construction and testing of a prototype of a stabilization system for boats with operational, constructive and economic characteristics such that it's compatible with small and medium-port boats. The stabilization will take place when the boat is not en route. Two propellers will act in opposition with a bang-bang control logic to generate thrust resulting in momentum towards stability. A gyroscope will be used to sense the angular speed of the vessel (in the longitudinal axis). The real time control is made with calculations by MATLAB. Wave analyses were also made with the software WAMIT. As for the conclusion, the bang-bang control logic was indeed efficient, reducing the roll movement in about 55%.

Keywords: Active Stabilization for Boats, Bang-Bang Control, MATLAB, WAMIT, Electric Propeller.

SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	VIII
Lista de Tabelas.....	X
GLOSSÁRIO.....	XI
<u>1.Introdução.....</u>	<u>1</u>
<u>1.1.Segurança e Conforto a Bordo.....</u>	<u>2</u>
<u>1.2.Mercado Náutico.....</u>	<u>3</u>
<u>1.3.Estabilidade em embarcações.....</u>	<u>4</u>
<u>1.3.1.Definições.....</u>	<u>5</u>
<u>2.Sistema Estabilizador Multi-Ativo- SEMA.....</u>	<u>8</u>
<u>3.Definição do Modelo.....</u>	<u>11</u>
<u>4.Simulação Dinâmica do Modelo.....</u>	<u>13</u>
<u>4.1.Simulação no WAMIT.....</u>	<u>13</u>
<u>4.2.Simulação no MATLAB.....</u>	<u>16</u>
<u>5.Definição, Projeto e Testes dos Atuadores e Suportes.....</u>	<u>18</u>
<u>5.1.Definição dos Atuadores.....</u>	<u>18</u>
<u>5.2.Projeto dos Suportes dos Atuadores.....</u>	<u>19</u>
<u>5.3.Teste dos Atuadores.....</u>	<u>22</u>
<u>6.Sistema de Alimentação e Controle Eletrônico de Potência.....</u>	<u>27</u>
<u>7.Sistema de Controle de Atitude/Balanco: Sensores, Interfaces e Programa de Controle.....</u>	<u>31</u>
<u>7.1.Sensores.....</u>	<u>32</u>
<u>7.1.1.Inclinômetro - Accustar II DAS 20.....</u>	<u>33</u>
<u>7.1.2.Giroscópio – LPY410AL.....</u>	<u>35</u>
<u>7.2.Detector de Erro.....</u>	<u>37</u>
<u>7.2.1.Placa de aquisição USB-4711.....</u>	<u>38</u>
<u>7.2.2.Lógica de controle.....</u>	<u>38</u>
<u>8.Montagem dos Subsistemas e Testes.....</u>	<u>41</u>
<u>8.1.Placas de Lógica e de Potência.....</u>	<u>41</u>
<u>8.2.Sensor: Giroscópio</u>	<u>42</u>
<u>8.3.Placa de Aquisição.....</u>	<u>43</u>
<u>8.4.Atuadores.....</u>	<u>43</u>
<u>8.5.O Sistema Interligado.....</u>	<u>43</u>
<u>8.6.Testes.....</u>	<u>46</u>
<u>9.Avaliação dos Resultados e Propostas de Novos Desenvolvidos</u>	<u>49</u>
<u>9.1.Simulação Computacional.....</u>	<u>49</u>
<u>9.2.Teste do protótipo</u>	<u>51</u>
<u>9.3.Propostas de Novos Desenvolvidos.....</u>	<u>54</u>
<u>10.Conclusões.....</u>	<u>57</u>
<u>11.Referências Bibliográficas.....</u>	<u>58</u>
<u>12.Anexos.....</u>	<u>59</u>
<u>12.1.ANEXO A: Circuitos.....</u>	<u>59</u>
<u>12.1.1 Caixa de Comando Externo.....</u>	<u>59</u>

12.1.2 Circuito do Giroscópio.....	59
12.1.3 Circuito de Potência.....	60
12.2.ANEXO B: Códigos de MATLAB.....	61
12.2.1.Simulink_BarcoDP.m	61
12.2.2.Ini.m.....	64
12.2.3.Escreve_placa.m.....	64
12.2.4.Le_placa.m.....	66
12.3.ANEXO C: Malhas em Simulink.....	68
12.3.1.Simulador.mdl.....	68
12.3.2.SEMA.mdl.....	69
12.3.3.SEMAControle.mdl.....	69
12.4.ANEXO D: Desenhos de Fabricação.....	70

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1-1 Centro de Carena.** Fonte: Principles of Naval Architecture, 1988 5
- Figura 1-2 Metacentro (M), Centro de Massa (G) e Centro de Carena (B).** Fonte: Principles of Naval Architecture, 1988 6
- Figura 2-3 Rotações de Embarcações.** Fonte: [www. http://sharathneelakanta.wordpress.com/](http://sharathneelakanta.wordpress.com/) 8
- Figura 2-4 Proposta para o projeto de estabilizador** 8
- Figura 2-5 Kit de hidrofólios e atuadores lineares.** Fonte: it.cosasdebarcos.com 9
- Figura 2-6 Propulsor Elétrico** 9
- Figura 3-7 Casco do Cruiser 280** 11
- Figura 4-8 Gráfico com o Momento no Roll x Período para cada ângulo de incidência** 16
- Figura 4-9 Malha em Simulink da Simulação com o SEMA** 17
- Figura 5-10 Motor Elétrico Phantom** 19
- Figura 5-11 Suporte original de um motor de popa de lancha** 20
- Figura 5-12 Vistas de Modelo e Explodida** 20
- Figura 5-13 Representação de posicionamento dos suportes dos atuadores** 21
- Figura 5-14 Suporte com atuador afogado** 22
- Figura 5-15 Suporte com atuador levantado** 22
- Figura 5-16 Motor fixado e fio com dinamômetro** 23
- Figura 5-17 Integrante do grupo lendo o dinamômetro** 24
- Figura 5-18 - Gráfico Atuador Empuxo x Corrente** 26
- Figura 6-19 Placas de controle e potência** 28
- Figura 6-20 Osciloscópio ligado ao motor** 28
- Figura 6-21 Integrante do grupo testando as placas** 29
- Figura 6-22 Caixa externa de comando. São 3 pares: liga/desliga, modo manual/automático e voltagem de entrada** 30
- Figura 6-23 Circuito completo, com baterias e propulsores ao fundo** 30
- Figura 7-24 Representação de uma malha de controle genérica** FONTE [4] 31
- Figura 7-25 ACCUSTAR II DAS 20.** Fonte: <http://www.meas-spec.com> 34
- Figura 7-26 Posicionamento dos eixos no giroscópio.** Fonte: <http://www.st.com/stonline/books/pdf/docs/16578.pdf> 37
- Figura 7-27 USB-4711.** Fonte www.advantech.com 38

	Figura 7-28 Malha em Simulink para controle do protótipo	39
41	Figura 8-29 - Caixa aberta para visão das placas de potências. As placas lógicas estão atrás.	
	Figura 8-30 Caixa que contém o circuito do giroscópio	42
	Figura 8-31 - Diagrama da Placa de Aquisição	43
	Figura 8-32 - Esquema da interligação entre os subsistemas	44
	Figura 8-33 Protótipo montado e posicionado no tanque	45
	Figura 8-34 SEMA pronto para ensaio	47
50	Figura 9-35 Amplitude do balanço em graus x tempo em segundos - Simulação sem o SEMA	
50	Figura 9-36 Amplitude do balanço em graus x tempo em segundos - Simulação com o SEMA	
	Figura 9-37 Análise da velocidade angular. Gerador de ondas a 0,8 Hz	52
	Figura 9-38 Análise da velocidade angular. Gerador de ondas a 0,6 Hz	53
	Figura 9-39 Análise da velocidade angular. Gerador de ondas a 1,0 Hz	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados Nominais da Cruiser 280 12

Tabela 2 - Dados Medidos da Cruiser 280 12

Tabela 3 - Resultado da análise pelo WAMIT para o Momento de Roll 14

Tabela 4 - Características mecânico-elétricas do propulsor 24

Tabela 5 - Características do ACCUSTAR II DAS 20. Fonte: <http://www.meas-spec.com> 33

Tabela 6 - Parâmetros do giroscópio 36

GLOSSÁRIO

- **Boca** - É a largura máxima da seção transversal da embarcação.
- **Comprimento Total / LOA** - É o comprimento total, medido paralelamente à linha d'água, das partes mais salientes do navio, levando em conta as partes emersas ou imersas do mesmo.
- **Linha d'Água** - A intersecção do plano d'água com o casco do navio.
- **Popa** - É a extremidade posterior do navio. Tem a forma exterior adequada para facilitar a passagem dos filetes líquidos que vão encher o vazio produzido pelo navio em seu movimento, a fim de tornar mais eficiente a ação do leme e do hélice.
- **Proa** - É a extremidade anterior do navio no sentido de sua marcha normal. Tem a forma exterior adequada para mais facilmente fender o mar.
- **Movimento de *Roll* ou Balanço** - Rotação em torno do eixo longitudinal.
- **Movimento de *Pitch* ou Caturro** - Rotação em torno do eixo transversal.
- **Movimento de *Yaw* ou Guinada/Cabeceio** - Rotação em torno do eixo vertical.

1. Introdução

O projeto de conclusão de curso a ser desenvolvido consiste na modelagem, construção e teste de um dispositivo ativo que tratará da instabilidade de embarcações de pequeno e médio porte. Este sistema encontraria utilidade na redução do número de acidentes ocasionados pelo balanço dessas embarcações, além de trazer mais conforto para quem estiver a bordo. O modelo de estabilizador foi proposto pelo Professor Doutor Nicola Getschko em projeto apresentado e aprovado pela FAPESP para uma linha de pesquisa e desenvolvimento, e será apresentado na seqüência.

1.1. Segurança e Conforto a Bordo

No decorrer de viagens marítimas, um problema evidente a todos os tripulantes é a questão da estabilidade do barco ou navio, pois não apenas o conforto, mas a segurança dos passageiros também é muito afetada pelas oscilações constantes do meio aquático ao qual se atravessa. O sistema de equilíbrio do ser humano não é adaptado às constantes e imprevisíveis situações de oscilação. Sendo assim, não pode dar respostas de reflexo rápidas o bastante para compensar desníveis que lhe são aplicados, seja de forma harmônica ou não.

Embora não haja disponíveis estatísticas detalhadas sobre os acidentes náuticos no Brasil, utilizando dados de 2007 da Guarda Costeira do EUA, verifica-se que dos 408 acidentes atribuídos às condições ambientais, a efeito das ondas aparece em 2º lugar, com 30% das ocorrências. Porém, quando é avaliada a causa principal de danos pessoais (vítimas) nestes acidentes, em um total de 333 ocorrências, a ondulação passa ao 1º lugar com 35% das ocorrências. Ainda segundo a Guarda Costeira americana, de 3673 ocorrências relacionadas a número de vítimas/danos pessoais, 15% foram devidas a quedas dentro da embarcação. Se forem considerados casos fatais, os casos contam 30% dos 685 registros para este tipo de acidente. Resultados muito compatíveis com estes são os do MAIB – Marine Accident Investigation Branch, do Reino Unido. Dados coletados entre 1992 e 2006 indicam que acidentes fatais devido a quedas para fora da embarcação representam 32% dos casos. Além disso, esta pesquisa revela que acidentes com trabalhadores da indústria pesqueira foram 115 vezes maior que a média das outras ocupações na Inglaterra. É presumível que neste caso as quedas são facilitadas pela necessidade do uso de ambas as mãos na atividade pesqueira, tornando mais difícil fixar-se a um apoio seguro, no caso de grandes oscilações da embarcação.

Mesmo com a falta de informação mais apurada para explicar a causa de cada um destes acidentes, presume-se que a maioria delas teve de alguma forma relação com o balanço da embarcação devido ou agravado pelas ondulações.

Outra relação estatística interessante apontada também pela Guarda Costeira dos EUA, no mesmo período citado, mostra que a maior parte das fatalidades ocorreu em embarcações menores que 8 metros, somando 82% das ocorrências.

Partindo da análise destes dados, a necessidade de se melhorar a segurança em embarcações, principalmente das pequenas e médias, é relevante caso se queira a diminuição dos acidentes citados.

1.2. Mercado Náutico

Outro foco motivador, além da segurança e conforto a bordo, é o econômico. A geografia do território brasileiro, com sua costa e grandes bacias hidrográficas favorece muito as atividades náuticas. Na última década o mercado náutico nacional teve, em comparação a outros ramos industriais, um crescimento superior.

Atualmente, o setor náutico gera receita de US\$ 500 milhões por ano no Brasil, segundo dados apresentados no 1º Fórum de Desenvolvimento do Turismo Náutico [7], promovido pelo Ministério do Turismo, recentemente. Este crescimento tem grande potencial para se manter se for considerada, por exemplo, uma comparação com outros países no que diz respeito à relação de embarcações/habitante. Enquanto que no Brasil tem-se uma relação de 1/6000 (Pesquisa feita pela ACOBAR [8]), países como os EUA tem relação de 1 barco para cada 20 habitantes, Canadá conta com 1/15, Itália, 1/66 e Alemanha e França com algo próximo de 1/115.

Este mercado em potencial também poderia contribuir para melhoria de indicadores de emprego no país, uma vez que, também exposto no Fórum citado anteriormente, cada mil embarcações geram 5 mil empregos diretos e 2,4 mil indiretos.

Com base neste cenário de potencial, o desenvolvimento de equipamentos e sistemas para embarcações torna-se importante no auxílio de ampliação do mercado náutico. Este trabalho se torna ainda mais evidente se forem analisados os problemas enfrentados pelos estaleiros e proprietários de embarcações. A grande dependência de produtos importados gera além de altos custos, incertezas com variações cambiais, problemas de prazos de entrega e reposição de peças para manutenção.

Pesquisa realizada em estaleiros mostra que equipamentos incorporados num barco básico têm uma alta parcela no custo total. O valor dos equipamentos adicionados, por exemplo, num barco de recreio de 40 pés (aproximadamente 12 metros), pode representar 80% do valor total da embarcação básica. Esta parcela tende a diminuir conforme o tamanho do barco cresce, já que modelos maiores tendem a ser mais sofisticados e, com isso, devem já integrar mais equipamentos que os modelos menores.

É com base, então, nas questões apresentadas de segurança a bordo e econômicas para apoio ao mercado náutico brasileiro que este projeto se motivou.

1.3. Estabilidade em embarcações

Em nenhuma circunstância o objetivo deste trabalho é discorrer sobre teorias de estabilidade em embarcações. No entanto, é importante apresentar algumas equações e definições, pois a modelagem da mecânica da embarcação depende disso. Tendo esclarecido esta questão, passa-se às seguintes.

1.3.1. Definições

Segundo The Society of Naval Architects and Marine Engineers [5], temos as seguintes considerações sobre uma embarcação:

Centro de Massa (G): É o ponto médio de todos os elementos de massa de um corpo. Ele não necessariamente coincide com o centro geométrico do corpo, pois pode haver concentrações de massa em determinadas regiões que o deslocam em relação a algum dos eixos cartesianos.

Centro de carena (B): O centro de carena é definido como o centróide da região submersa da embarcação. Sua definição é puramente geométrica, porém tem relação com a massa d'água deslocada, que é assumida como homogeneamente distribuída. Ele varia de acordo com a posição da embarcação em relação à linha d'água.

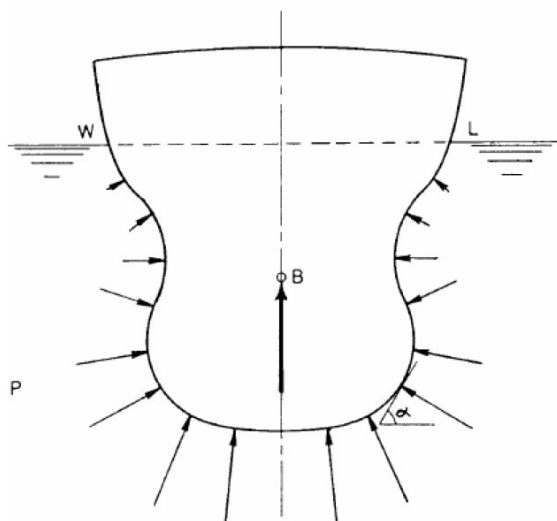


Figura 1-1 Centro de Carena. Fonte: Principles of Naval Architecture, 1988

Altura metacêntrica (\overline{GM}): É a distância do ponto de encontro das linhas de atuação da força peso, aplicada no centro de gravidade em situação de repouso, e da força de empuxo, aplicada ao centro de carena, e o centro de gravidade. A figura abaixo exemplifica a situação de uma embarcação inclinada em relação à linha d'água

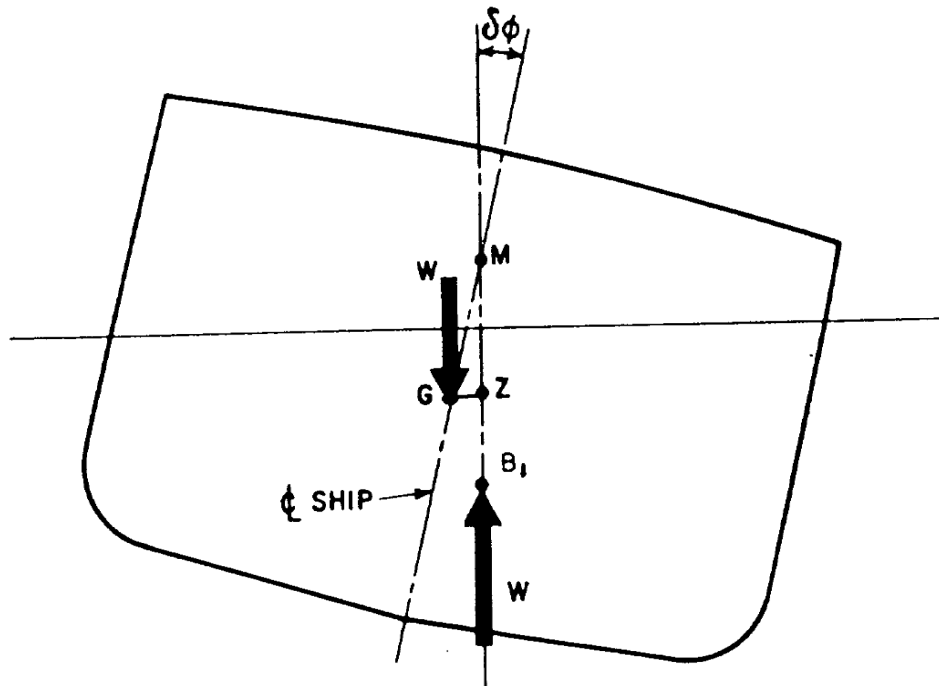


Figura 1-2 Metacentro (M), Centro de Massa (G) e Centro de Carena (B). Fonte: Principles of Naval Architecture, 1988

Momento de restauração: Pode-se perceber pela figura 1-2 que a força peso W , juntamente com a força de empuxo, de mesma intensidade, gera um binário que tende a retornar a embarcação à posição horizontal. O momento resultante é denominado momento de restauração, e é calculado pela seguinte fórmula:

$$M(\theta) = \rho \times g \times \nabla \times \overline{GM} \times \sin\theta$$

Onde:

ρ é a massa específica do meio aquático

g é a intensidade da gravidade

∇ é o volume de deslocamento (volume de água deslocado pela parte submersa da embarcação)

\overline{GM} é a altura metacêntrica

θ é o ângulo de inclinação da embarcação em relação ao eixo vertical

A estabilidade em balanço do barco fica definida quando o centro de carenagem, o metacentro e o centro de massa da embarcação ficam alinhados. É evidente que esta situação não existe em um ambiente onde a ondulação do meio aquático acaba deslocando a posição de todos os três pontos. O momento aplicado pelas ondas na embarcação, em um primeiro momento, não é igual ao momento de restauração. O objetivo, então, é criar um momento extra que, somado ao de restauração, responda rapidamente ao torque gerado pelas ondas e mantenha a embarcação com $\dot{\theta}$ próximo de zero.

2. Sistema Estabilizador Multi-Ativo- SEMA

Devido às ondulações, uma embarcação pode ter três movimentos básicos: balanço, caturro e cabeceio. O primeiro deles, que se trata da oscilação em torno do eixo longitudinal do casco (eixo x), é o mais relevante em termos de conforto e segurança para quem está a bordo. Isso se explica pelo fato de ocorrer com mais frequência e em maior amplitude que os demais.

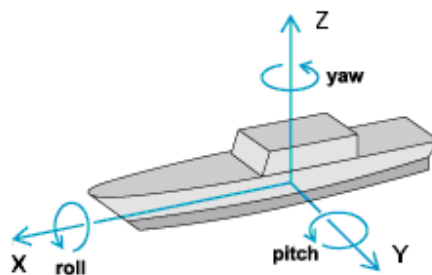


Figura 2-3 Rotações de Embarcações. Fonte: [www. http://sharathneelakanta.wordpress.com/](http://sharathneelakanta.wordpress.com/)

O projeto SEMA visa diminuir os efeitos de balanço em embarcações que podem estar ou não em seguimento. Seu princípio de funcionamento se baseia na geração de uma força reativa de modo a tentar anular o efeito do empuxo lateral provocado pelas ondas que atingem o costado e que fazem com que a embarcação tenha o movimento oscilante.

Isso se dará através da instalação, no espelho de popa, de dois hidrofólios, dotados de atuadores lineares, e propulsores elétricos.

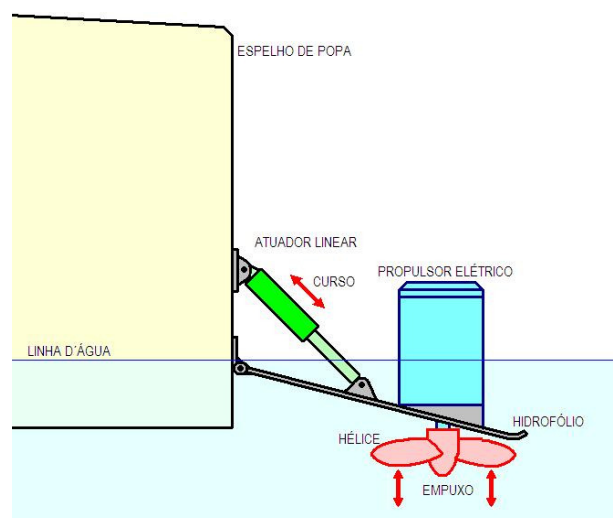


Figura 2-4 Proposta para o projeto de estabilizador



Figura 2-5 Kit de hidrofólios e atuadores lineares. Fonte: it.cosasdebarcos.com

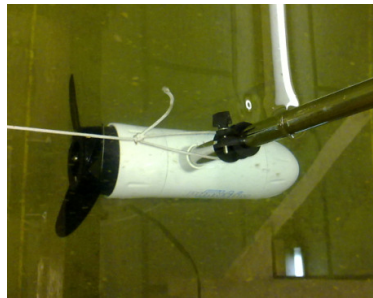


Figura 2-6 Propulsor Elétrico

Os atuadores lineares têm a função de alterar o ângulo de ataque dos hidrofólios em relação ao escoamento, gerando uma força sustentação sobre o casco. Esta força depende da velocidade de seguimento da embarcação e do ângulo regulado nos hidrofólios. Sendo assim, estes componentes atuam para uma estabilização hidrodinâmica, ou seja, para o caso em que a embarcação se encontra em seguimento.

Já os propulsores elétricos atuam no caso da embarcação estar sem seguimento ou com velocidades muito baixas, quando os efeitos hidrodinâmicos serão mínimos. O empuxo fornecido por um propulsor seria complementado com o do outro, com os componentes atuando em oposição. Para uma simplicidade maior do sistema atuante, os propulsores seriam utilizados com um controle do tipo liga-desliga ("bang-bang"), não se descartando um eventual controle proporcional.

Tanto a regulação dos hidrofólios quanto o acionamento dos propulsores devem ser feitos em tempo real através de um controle de giroscópio. Este sensor mandará um sinal proporcional à velocidade angular do barco para um dispositivo de processamento de dados, que fará o controle para uma resposta adequada nos atuadores lineares e propulsores elétricos.

É importante enfatizar que o uso e controle do posicionamento angular dos hidrofólios fazem parte do projeto SEMA, apresentado à FAPESP, no entanto este desenvolvimento não será feito no presente trabalho e poderá ser encarado como uma possível continuidade do projeto como um todo.

3. Definição do Modelo

Uma verificação adequada da atuação do SEMA para uma etapa de prototipagem deveria ser realizada em escala reduzida com as devidas considerações sobre as forças envolvidas. Para que a semelhança entre o modelo e o protótipo seja completa deve-se respeitar a semelhança geométrica, cinemática e dinâmica (MUNSON [3]). Contudo, seria inviável que todos os sistemas estivessem na mesma razão de escala. O caso mais crítico se aplica ao propulsor. É impraticável projetar um novo propulsor com um novo estudo adequado de hélice e desempenho. Isso faz com que o sistema de atuação do protótipo esteja em escala real, o que vem por desrespeitar a idéia de manter uma análise dimensional adequada entre modelo e protótipo. Uma simulação nesta categoria possivelmente levaria à perda e distorção de informações ao se fazer inferências no caso real. Decidiu-se, então, trabalhar com um modelo em escalas mais próximas das reais, pois além de se amenizar os problemas de semelhança citados, questões mais subjetivas como conforto da tripulação também poderiam ser avaliadas.

Propôs-se então que o protótipo fosse testado num modelo do Cruiser 280, fabricado pela Fibra & Arte, apresentado abaixo:



Figura 3-7 Casco do Cruiser 280

O Cruiser 280 é uma mini lancha disponível no mercado. Ela comporta, segundo o fabricante, até três passageiros, e possuiria as seguintes características:

Tabela 1 - Dados Nominais da Cruiser 280

Característica	Medida	Unidade
LOA	2,8	m
Boca	1,35	m
Calado	0,4	m
Peso	50	kg
Carga Máxima	450	kg

Para garantir uma posterior modelagem e simulação computacional mais precisa, as características geométricas do modelo foram verificadas e os seguintes resultados foram obtidos:

Tabela 2 - Dados Medidos da Cruiser 280

Característica	Medida	Unidade
LOA	2,74	m
Boca	1,39	m
Calado	0,42	m

4. Simulação Dinâmica do Modelo

O modelo em questão será testado em duas formas: computacionalmente e fisicamente. Como no desenvolvimento de qualquer produto na indústria, o teste computacional, resultante da simulação dinâmica do sistema, é útil para a verificação de que a proposta do SEMA realmente irá reduzir movimentos de balanço no modelo, além de economizar tempo e financiamento em uma suposta reengenharia do projeto. A simulação virtual do problema também se torna essencial para a determinação da ação de controle, à medida que medições reais do modelo em diversas situações de ondulação para posterior tratamento computacional seriam por demais custosas, pouco práticas e em detalhes que não estariam dentro do escopo deste trabalho.

O processo de simulação compreende duas etapas: Inicialmente simularam-se as forças atuantes no modelo para diversas situações de ondas, variando sua direção, frequência e amplitude. Posteriormente, com estes dados, foi possível gerar uma lógica de controle que seria simulada no MATLAB. Estas etapas serão detalhadas em seguida.

4.1. Simulação no WAMIT

Tomou-se conhecimento do software WAMIT (Wave Analysis MIT), desenvolvido pelo MIT para aplicações na indústria naval. Este software permite que, com características geométricas e mássicas de uma embarcação, sejam calculadas as forças resultantes de interações dela com o meio fluído. Também não é escopo deste projeto analisar o funcionamento do WAMIT ou sua operabilidade, portanto os serviços do aluno Daniel Prata, funcionário do Tanque de Provas Numérico - TPN/USP, foram contratados para a realização desta primeira etapa de simulação.

Adotando as medidas geométricas verificadas no modelo, foi utilizado o software Rihnoceros, com o add-on Rihno-Marine. Este calculou e forneceu com base em uma densidade média estimada de $2,6 \text{ g/cm}^3$, para a fibra de vidro, material do casco, as propriedades dinâmicas necessárias ao WAMIT, como momentos de inércia em balanço e caturro.

Após esta modelagem, os dados foram inseridos no WAMIT para que o mesmo retornasse os valores das forças que agem de acordo com diversos ângulos de incidência e frequência das ondas. A saída padrão do software dá resultados de forças e momentos em cada eixo - seis tabelas no total, três para forças e três para momento. Abaixo estão os resultados do momento no *Roll*, que é o relevante no nosso caso, para alguns ângulos notáveis:

Tabela 3 - Resultado da análise pelo WAMIT para o Momento de *Roll*

Ângulo de Incidência [graus]	15		30		45	
Período [s]	Momento [N.m]	Fase [graus]	Momento [N.m]	Fase [graus]	Momento [N.m]	Fase [graus]
0,25	425,7	75,0	234,1	-66,2	183,4	-105,4
0,50	154,1	9,9	104,0	-53,0	123,9	-119,8
0,75	203,4	-71,7	218,3	-97,4	256,6	175,3
1,00	74,8	74,4	211,8	37,3	560,1	13,5
1,25	319,7	-35,2	669,0	-34,6	1019,4	-34,4
1,50	386,2	-52,0	746,5	-53,2	1043,1	-55,6
1,75	361,0	-63,4	692,8	-65,1	966,9	-68,1
2,00	320,1	-70,5	615,2	-72,1	862,9	-74,9
2,25	277,8	-75,0	534,9	-76,4	752,5	-78,7
2,50	239,3	-78,0	461,2	-79,1	650,0	-81,0
2,75	206,2	-80,1	397,7	-81,1	561,2	-82,7
3,00	178,5	-81,6	344,4	-82,5	486,3	-83,8
3,25	155,5	-82,9	300,1	-83,6	423,8	-84,8
3,50	136,3	-83,8	263,1	-84,5	371,7	-85,5
3,75	120,3	-84,6	232,2	-85,2	328,2	-86,0
4,00	106,8	-85,3	206,2	-85,7	291,5	-86,5
4,25	95,4	-85,8	184,2	-86,2	260,4	-86,9
4,50	85,7	-86,2	165,5	-86,6	234,0	-87,2
4,75	77,3	-86,6	149,4	-87,0	211,2	-87,5
5,00	70,1	-86,9	135,5	-87,3	191,6	-87,8
5,50	58,4	-87,5	112,9	-87,7	159,6	-88,2

6,00	49,4	-87,9	95,4	-88,1	134,9	-88,4
------	------	-------	------	-------	-------	-------

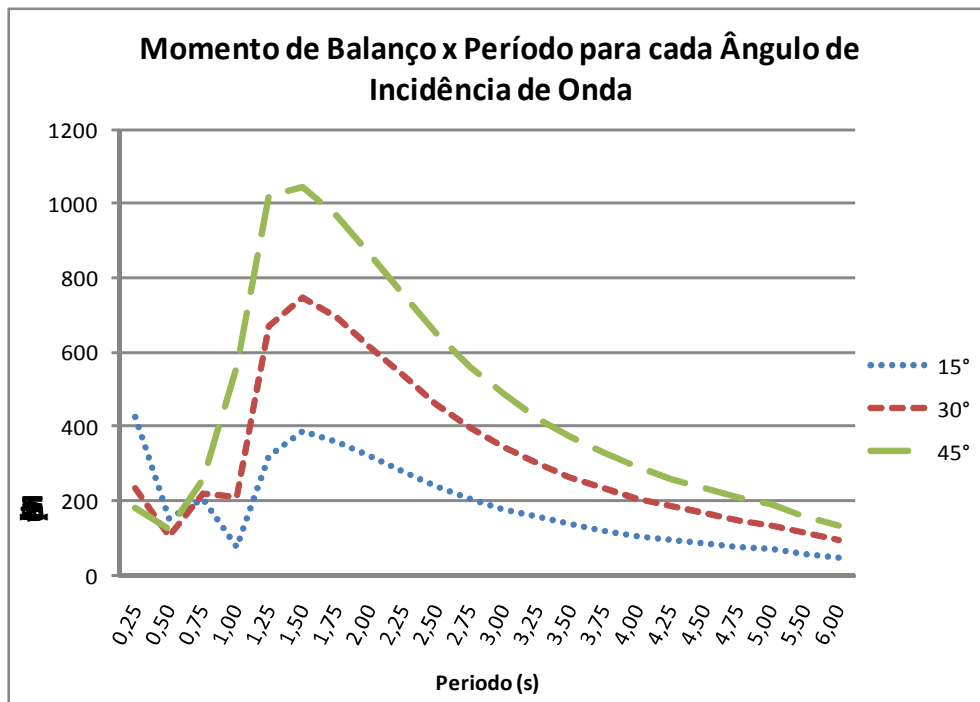


Figura 4-8 Gráfico com o Momento no *Roll* x Período para cada ângulo de incidência

4.2. Simulação no MATLAB

Com os dados do WAMIT em mãos, é possível simular a situação real através do software MATLAB, desenvolvido pela Mathworks. O MATLAB possui o módulo Simulink, onde é possível se fazer uma representação gráfica do sistema e simular uma lógica de controle adequada. O sistema e controle projetados estão apresentados abaixo.

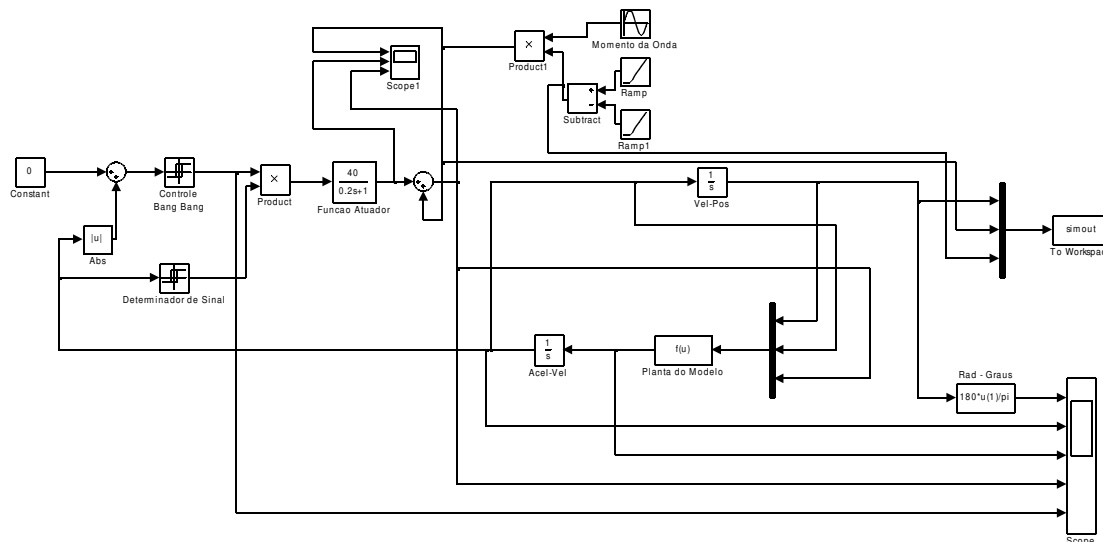


Figura 4-9 Malha em Simulink da Simulação com o SEMA

Esta malha, ao ser executada junto com as linhas de código .m (linguagem para *scripts* do MATLAB) escritas pelo funcionário do TPN Daniel Prata (mais detalhes nos ANEXOS B e C), nos fornece uma representação gráfica temporal do modelo. Alterando parâmetros de frequência e comprimento de onda, é possível observar o provável movimento do modelo em relação a qualquer tipo de ondulação. O bloco “Funcao Atuador” representa a função de transferência dos atuadores (tempo de resposta de 1 segundo e ganho de 40 N.m/V, levando em conta os dois propulsores). Uma simulação em vídeo feita com essa malha está presente na apresentação final deste projeto junto à mídia deste relatório.

5. Definição, Projeto e Testes dos Atuadores e Suportes

5.1. Definição dos Atuadores

Uma vez determinado qual casco usaríamos no trabalho, o passo seguinte foi determinar qual propulsor será usado para diminuir ao máximo o balanço do modelo. Assim como no casco, tinha-se a escolha de encomendar um produto particular para o nosso caso ou tentar encontrar algo existente no mercado. Um pouco de reflexão mostrou que a primeira opção não seria válida, pois o design e fabricação de um propulsor (seja ele elétrico ou de combustão) que funcionasse embaixo da linha d'água seria uma tarefa complexa e laboriosa. Isso incluiria também o projeto e fabricação do hélice, que é um elemento especial e de design refinado.

Sendo assim, optou-se por tentar encontrar um produto já existente, e que fosse elétrico, já que o controle de um motor de combustão também seria demasiadamente complexo para o propósito do projeto. Uma razão extra para a escolha do motor elétrico é que eles já são fabricados para uso com a voltagem disponível nas embarcações, pelo padrão, que é 12 V em corrente contínua. Esta será a voltagem imediatamente disponível nas nossas baterias.

Portanto, fez-se uma busca por motores de popa elétricos existentes no mercado. Os resultados mostraram um relativo monopólio da linha Phantom, da fabricante Marine Sports. Eles são fabricados tanto para água doce e salgada, e apresentam empuxos máximos nominais de 34 lbf, 44 lbf e 54 lbf. No SI, 151,3 N, 195,8 N e 240,3 N, respectivamente. Serão usados, entretanto, os valores em lbf ao invés dos em N ao se referir aos motores, porque essa é a prática comum no mercado náutico. A foto mostra os aspectos físicos gerais desse motor:



Figura 5-10 Motor Elétrico Phantom

Em anexo encontram-se as lojas do ramo náutico nas quais podemos adquirir esses motores. Optou-se inicialmente pela compra de dois pares de motores, um par com 44 lbf cada um e outro com 54 lbf de empuxo. A idéia é testar ambos: os de 44 lbf seriam mais compactos e gastariam menos energia ao longo do tempo, enquanto os de 54 lbf são os de máximo empuxo disponível. Qual é mais apropriado ao SEMA é algo que eventualmente pode ser estudado nos testes finais.

5.2. Projeto dos Suportes dos Atuadores

Os suportes dos atuadores têm como função, naturalmente, ligar os atuadores ao casco, mas isso deve ser feito de uma maneira a permitir a regulação da altura de afogamento - distância entre as hélices e a linha d'água. Seu projeto foi embasado naquele de um motor de popa para lancha existente no mercado, ao qual a equipe teve acesso. Este suporte pode ser exemplificado com a imagem à seguir:



Figura 5-11 Suporte original de um motor de popa de lancha

E na sequência, o desenvolvido para a aplicação no SEMA:

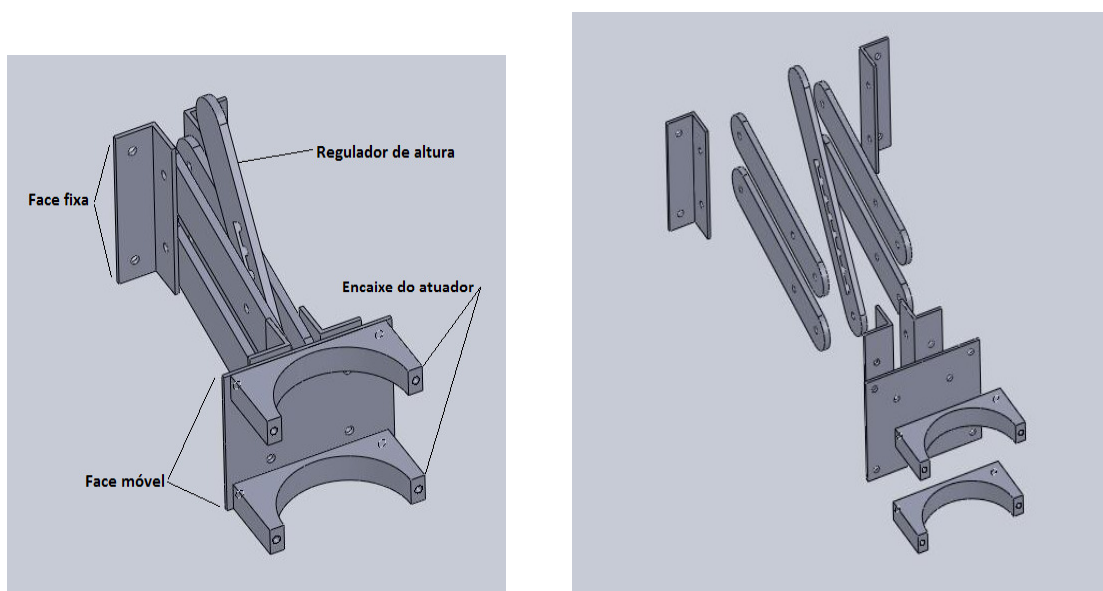


Figura 5-12 Vistas de Modelo e Explodida

O uso do suporte no projeto de estabilização varia em alguns pontos daquele original encontrado para venda. Dentre essas diferenças pode-se citar o fato que no SEMA o suporte não iria sustentar um motor de lancha (com peso mínimo de 30 kg) e sim um motor de propulsão elétrico (com cerca de 7 kg, só o motor com hélice). Outro ponto é que o curso ou deslocamento vertical do suporte do projeto pode ser menor, visto que o ponto de fixação dele no espelho de popa é mais próximo da linha d'água, como ilustra a seguinte figura:

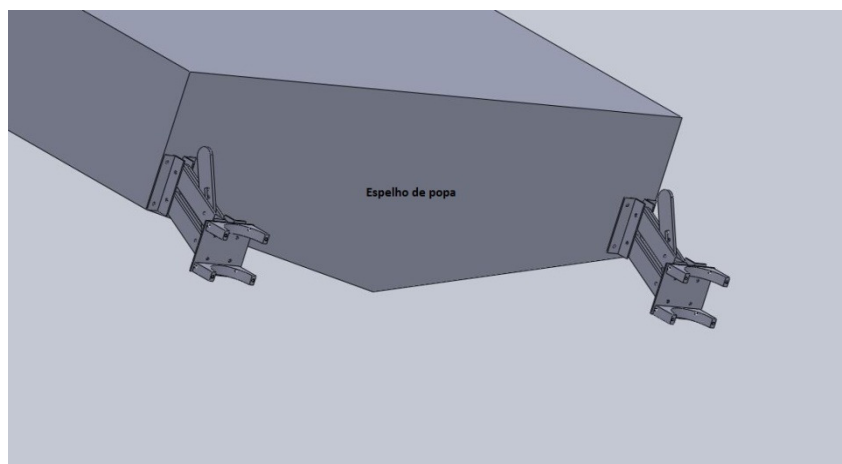


Figura 5-13 Representação de posicionamento dos suportes dos atuadores

Frente a essas características de operação, as dimensões propostas para as peças do suporte estão entre 60% (espessuras) e 80% (comprimentos e larguras) em relação ao original de tamanho superior. Estimou-se que essas dimensões seriam mais que suficientes para sustentar os atuadores, economizando material e alcançando um peso menor do que o do suporte no qual nos baseamos. Informações mais detalhadas:

Especificações técnicas básicas (para cada unidade de suporte):

MATERIAL: Alumínio

PESO: 1,3 kg

CURSO DA EXTREMIDADE MÓVEL: -123 mm (abaixo do ponto de fixação);
+50 mm (acima dele)

CARGA MÁXIMA PREVISTA: 184 N (18,8 kgf)

MODO DE FIXAÇÃO UNIVERSAL: conjuntos porca-parafuso M6 ($\varnothing 6.6mm$)

LOCAL DE FIXAÇÃO: extremidades do espelho de popa (~550 mm do plano de simetria)

Dentre as características que foram mantidas pode-se citar o sistema de regulagem de altura, baseado em uma trava com posicionamento discreto que impede o deslocamento relativo entre as faces fixa e móvel.

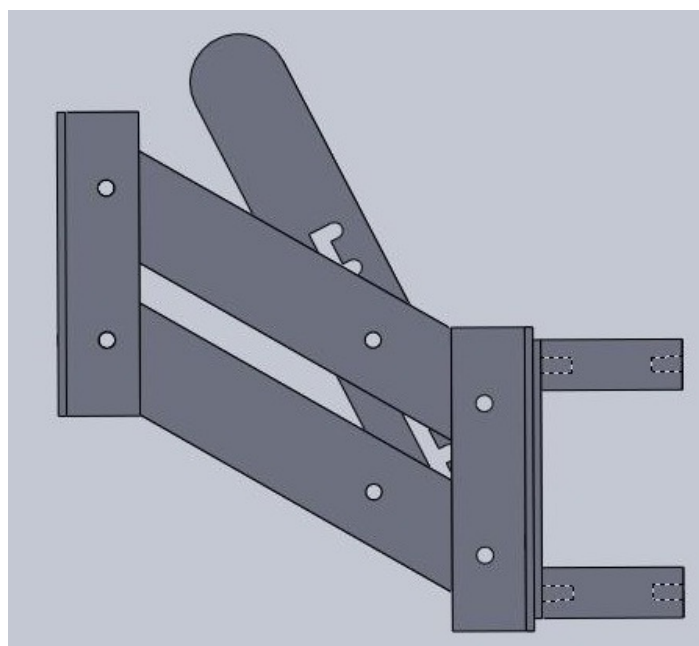


Figura 5-14 Suporte com atuador afogado

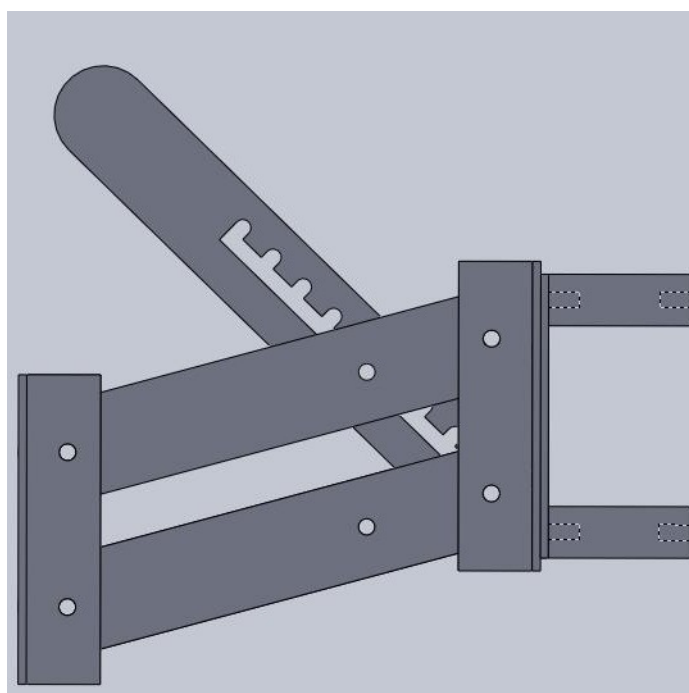


Figura 5-15 Suporte com atuador levantado

No ANEXO D podem ser encontrados os desenhos de fabricação de cada peça que constitui esse conjunto, com suas devidas dimensões.

Após a finalização do projeto, ele foi encaminhado para fabricação.

5.3. Teste dos Atuadores

A análise do empuxo dos propulsores no tanque disponível no próprio Prédio da Engenharia Mecânica, Mecatrônica e Naval teve a seguinte metodologia:

1. Fixar o motor em uma superfície imóvel;
2. Atar, através de um fio, um dinamômetro à haste do motor;
3. Atar esse dinamômetro também a outra superfície imóvel;
4. Anotar a força medida em cada velocidade do motor.

Por "velocidade" do motor, entenda-se uma escala arbitrária que os motores da linha Phantom apresentam. Eles têm bobinas para controle de velocidade, necessárias no seu uso original de propulsão para barcos. Isso é feito de modo que o usuário possa escolher de '0' (ponto morto) a '5' (velocidade máxima), ainda com a opção de ré ('R1' e 'R2').



Figura 5-16 Motor fixado e fio com dinamômetro



Figura 5-17 Integrante do grupo lendo o dinamômetro

Para interpretar corretamente os resultados, foi levada em conta a geometria do teste. Com um ângulo de aproximadamente 10° entre a linha horizontal, onde o empuxo pode ser concentrado, e a corda de medição, foi necessário fazer um leve ajuste trigonométrico.

Em outra etapa, foi realizado um teste semelhante, velocidade a velocidade, porém dessa vez, munidos de um voltímetro e amperímetro com alicate, foram tomadas medições elétricas: voltagem entre os pólos da bateria e corrente passando pelo motor. A tendência é que a voltagem caia quando a corrente aumenta, devido à resistência interna.

Os resultados estão compilados na tabela a seguir (a bateria estava na capacidade máxima, com 13,07 V entre os pólos):

Tabela 4 - Características mecânico-elétricas do propulsor

Velocidade	Força Medida (N)	Força de Empuxo (N)	Voltagem (V)	Corrente (A)
1	24,1	24,5	12,39	9,5
2	26,6	27,0	12,29	10,5
3	65,7	66,75	12,09	19,5
4	78,1	79,3	11,93	22,0
5	181,3	184,1	11,7	43,3
R1	35,7	36,3	12,18	17,2

R2	88,9	90,2	11,7	41,0
----	------	------	------	------

É possível perceber-se uma não linearidade entre intensidade de corrente e empuxo, evidenciada no gráfico abaixo. Esta observação reforçou a opção por uma lógica de controle bang-bang, pois o tratamento de não-linearidades em um controle proporcional fugiria do escopo do presente trabalho.

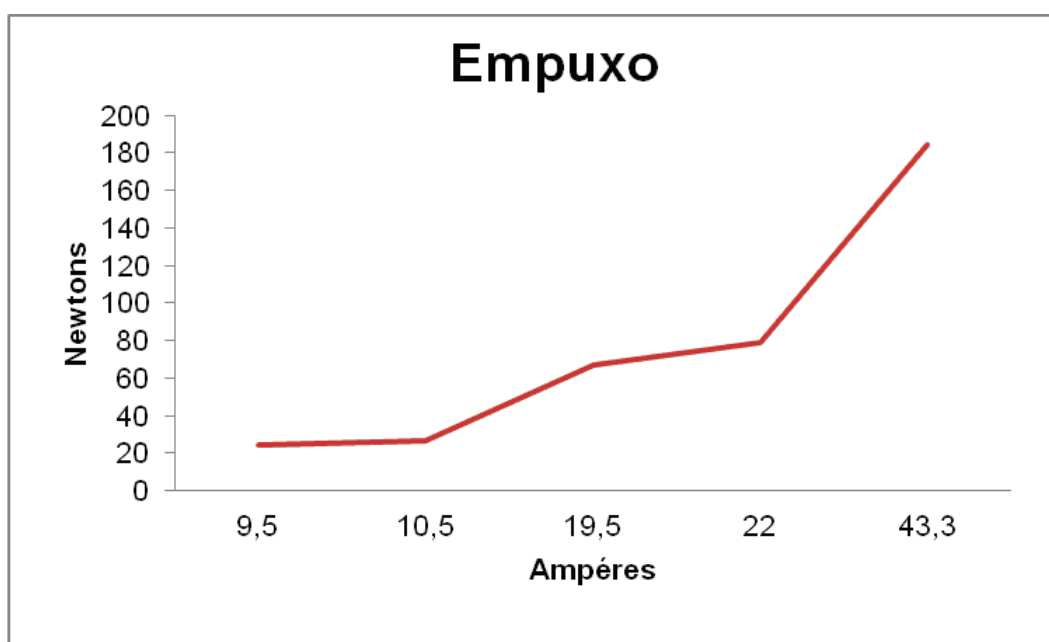


Figura 5-18 - Gráfico Atuador Empuxo x Corrente

O calculo para se calcular o empuxo a partir da força medida é:

$$E = \frac{Fm}{\cos(10^0)}$$

onde: Fm é a força medida e E é o empuxo.

Como se vê, o motor pode puxar uma corrente razoavelmente alta em máxima velocidade. Tendo uma noção da ordem de grandeza dessa corrente, placas de controle e potência foram encaminhadas. Elas devem obrigatoriamente ser dimensionadas em função do motor. No caso, foram feitas de modo a trabalhar até com uma corrente de pico no motor de 60 A.

6. Sistema de Alimentação e Controle Eletrônico de Potência

O controle dos atuadores é feito através de um circuito que apresenta, para cada motor, uma placa de controle e uma de potência além de outros componentes elétricos e eletrônicos, como disjuntores. O projeto foi feito por Roberto Romano, do IPT, a partir dos dados dos propulsores obtidos nos testes com água. Todos os componentes foram adquiridos na Rua Santa Ifigênia e imediações pelo grupo, e o circuito foi montado por ele.

O princípio de funcionamento é que a placa lógica use um controle PWM (Pulse Width Modulation) para, em função de uma voltagem de entrada, chavear a ponte H da placa de potência. Essa entrada pode vir de um potenciômetro, no modo de controle manual, ou, idealmente, do computador, através de uma placa A/D, no modo automático. Esse último é o que será usado no controle em tempo real; o modo manual é apenas para verificações e testes. Por uma questão de segurança, o PWM não chega a enviar 100% da voltagem de entrada em momento algum. Ele pára em 90% por uma questão de lógica interna.

Para cada atuador corresponde uma bateria de 12 V, que alimenta a placa de potência. Essas baterias, com os atuadores girando de forma contínua, correm o risco de serem rapidamente consumidas, por isso verificou-se que baterias estacionárias funcionam melhor. Elas são mais apropriadas para esse tipo de função que as automotivas, feita para fortes picos de corrente e pouco uso contínuo.

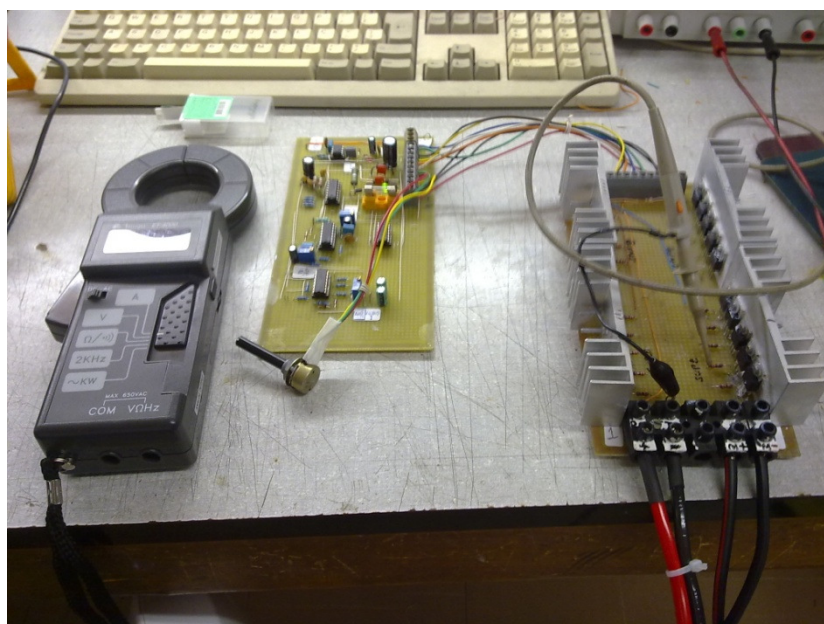


Figura 6-19 Placas de controle e potência

Na figura acima, estão as duas placas na fase de montagem e testes. Na de potência, destacam-se os dissipadores, necessários para se lidar com o aquecimento dos MOSFET's que constituem a ponte H.

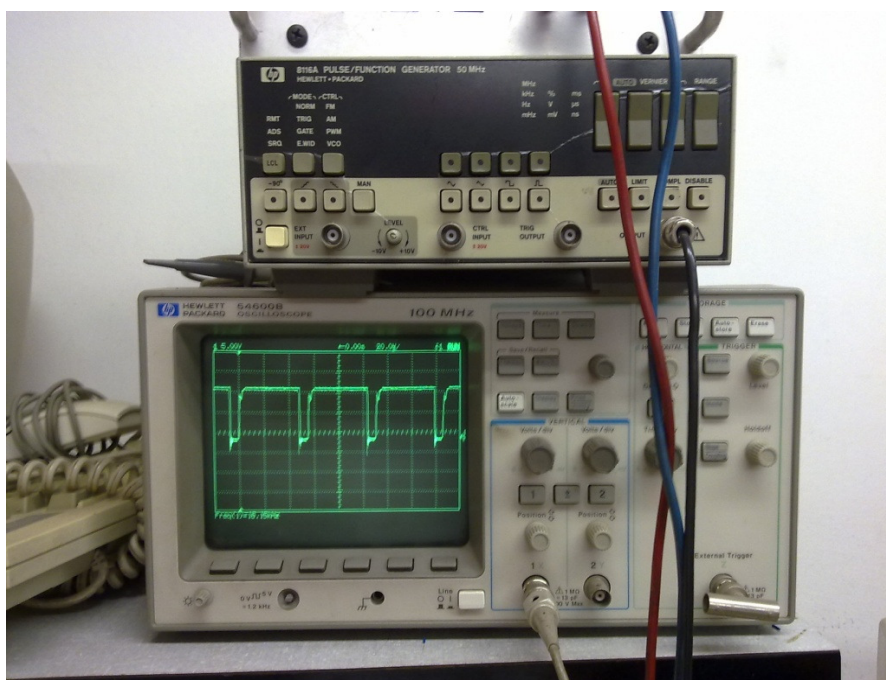


Figura 6-20 Osciloscópio ligado ao motor

Nessa, vê-se o display de um osciloscópio. Ele está mostrando a voltagem entre a ponte H e o motor ao longo do tempo. O formato do sinal se deve justamente ao PWM, que muda a largura do pulso para alterar a voltagem média durante uma faixa de tempo. Nesse caso específico, o sinal de saída era quase máximo (pico duradouro e vale curto).



Figura 6-21 Integrante do grupo testando as placas

Estando as duas placas prontas, foi realizado um teste onde se ligaram os dois propulsores ao circuito e o sinal foi controlado no modo manual. O resultado foi excelente, com os motores se comportando da maneira planejada e pouco aquecimento por parte dos FET's. A voltagem da bateria estacionária também foi medida ao longo do teste, apresentando uma diminuição com o aumento da corrente muito pequena, da ordem de 1 V com o PWM no máximo.

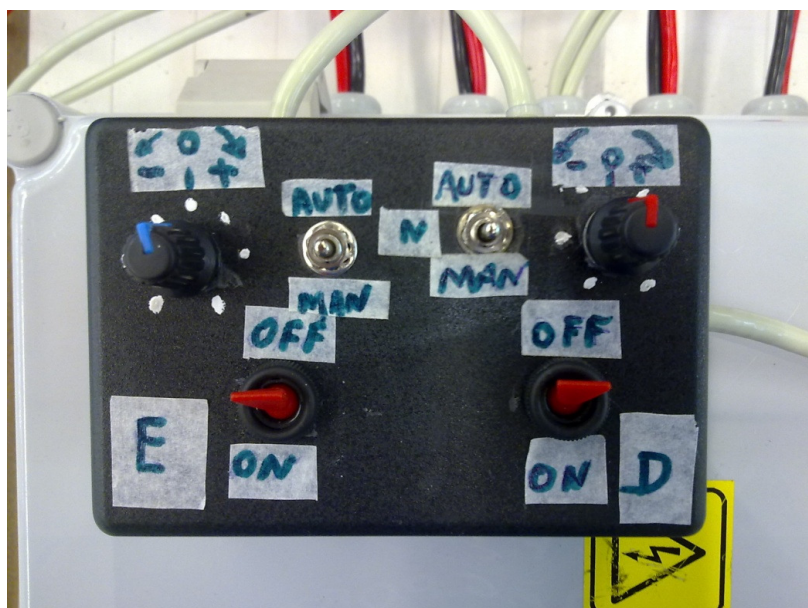


Figura 6-22 Caixa externa de comando. São 3 pares: liga/desliga, modo manual/automático e voltagem de entrada



Figura 6-23 Circuito completo, com baterias e propulsores ao fundo

Os circuitos de lógica, potência e da caixa externa de controle e seguem no ANEXO A.

7. Sistema de Controle de Atitude/Balanço: Sensores, Interfaces e Programa de Controle

Como já dito anteriormente, o projeto busca a estabilização de embarcações através de um sistema automático de controle de velocidade angular de balanço. Segundo OGATA [4], um sistema de controle industrial possui os componentes apresentados abaixo:

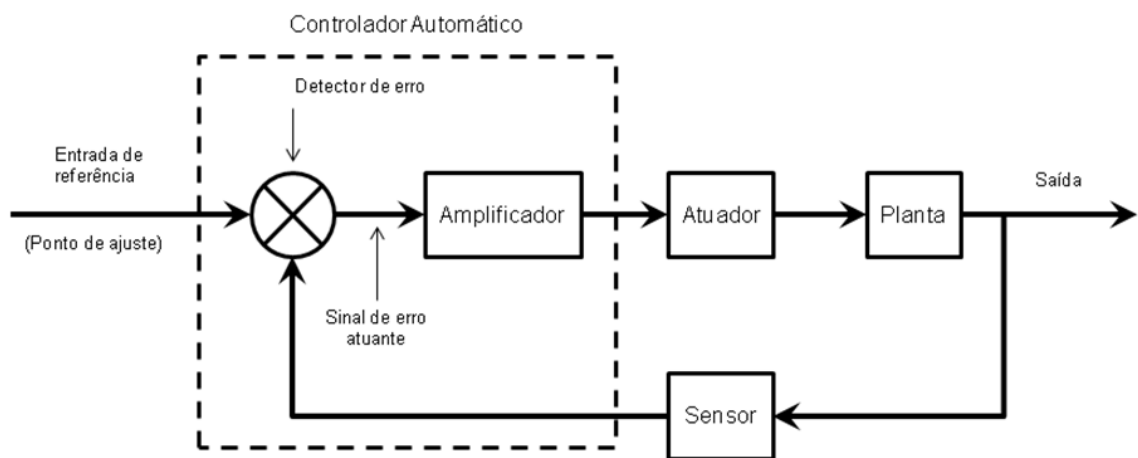


Figura 7-24 Representação de uma malha de controle genérica FONTE [4]

Este sistema de controle pode ser generalizado para qualquer aplicação a qual se deseje realizar um controle com realimentação, substituindo apenas a Planta pelo sistema a ser controlado. Para o caso estudado neste trabalho, tem-se:

Entrada de referência: velocidade angular de oscilação de balanço à qual se deseja manter a embarcação.

Detetor de erro: placa de aquisição de dados em conjunto com lógica programada em MATLAB que compara a entrada de referência com o sinal de velocidade angular vinda do sensor e envia o sinal de atuação no sistema para o Amplificador.

Amplificador: circuito eletrônico de potência que recebe o sinal de atuação e amplifica para a tensão necessária para ativação dos Atuadores.

Atuador: propulsores elétricos, operando em oposição, que recebem o sinal de atuação do amplificador que geram torques restauradores para corrigir o balanço da embarcação

Objeto de controle (Planta): embarcação a ser estabilizada.

A lógica de controle é a chamada bang-bang (on-off, segundo OGATA[4]) com dois modos de atuação. O objetivo é criar momentos adicionais aos momentos restauradores hidrostáticos criados pelo movimento do barco, que tenderão a reduzir a amplitude do movimento de balanço. Portanto, estes momentos devem agir tanto no sentido horário como no sentido anti-horário.

A composição e operação de cada um dos componentes de sensoramento e interface do sistema apresentado acima serão detalhadas nas próximas seções.

7.1. Sensores

Tratando-se de movimentos angulares, existem diversos sensores no mercado que permitem obter acelerações, velocidades e posições angulares em relação a algum referencial pré-estabelecido. No caso de acelerações angulares, podem-se usar medidores de torque e acelerômetros, já no caso de velocidades é possível obter esta informação através de giroscópios. A posição angular, no entanto, em relação ao horizonte seria a informação mais adequada para a referência do controle. Além de permitir que se observe a posição relativa do horizonte da embarcação com o horizonte terrestre, este sinal pode ser derivado em relação ao tempo para obter-se a velocidade e aceleração angular (BEER & JOHNSON [2]), que podem ser comparadas a níveis adequados de conforto e segurança.

Sensores diversos de posição angular estão disponíveis no mercado. O projeto inicial do SEMA utilizava um inclinômetro para medidas angulares. Este será descrito na próxima seção.

7.1.1. Inclínômetro - Accustar II DAS 20

Inclinômetros são dispositivos que medem, através ou de sistemas mecânicos ou elétrico-capacitivos, a posição angular de algum objeto em relação à um horizonte de referência. O Accustar II é um inclinômetro fabricado pela Measurement Specialties, empresa especializada em instrumentos de medição sediada nos Estados Unidos da América. Ele é capaz de medir intervalos de $\pm 20^\circ$ em ambos os eixos e pode enviar estas medições tanto por porta analógica como por uma saída de sinal PWM. O fator de escala, assim como o erro, varia de acordo com sua saída.

A saída analógica possui fator de escala de 100 mV por grau e erro de $\pm 10\%$, enquanto a saída PWM registra uma variação de grau a cada 0,7 % de sua razão cíclica, sem erro determinado nas especificações dadas pelo fabricante. Sua alimentação deve preferencialmente ser de 9 V em corrente contínua, podendo variar entre 5 V e 15 V. Todas estas informações foram obtidas no site do fabricante, e abaixo está uma tabela com características da medição.

Tabela 5 - Características do ACCUSTAR II DAS 20. Fonte: <http://www.meas-spec.com>

Características de medição	
Intervalo de medição	$\pm 20^\circ$
Resolução	0,01
Linearidade	
0° à 10°	$\pm 0.2^\circ$
10° à 12°	$\pm 2,5\%$ da leitura
12° à 15°	$\pm 3,0\%$ da leitura
15° à 20°	Monotônica
Resposta em frequência (-3db)	0,25 Hz
Peso	91 g (com proteção)



Figura 7-25 ACCUSTAR II DAS 20. Fonte: <http://www.meas-spec.com>

Na época de realização do presente trabalho, não havia, ou não foi possível encontrar com pesquisas em sites de fornecedores, fabricantes de inclinômetros nacionais. Sendo o SEMA um projeto financiado pelo programa PIPE da FAPESP, não era possível que fossem compradas peças diretamente de fornecedores estrangeiros, então ou a compra deveria ser feita de um fabricante nacional ou de algum representante de empresa estrangeira no país. Não havendo fabricantes nacionais, decidiu-se comprar o Accustar II por ser o inclinômetro de mais rápida entrega e preço adequado ao orçamento inicial do projeto.

A saída que deveria ser utilizada, para a leitura dos dados, seria a analógica, apesar da vantagem da saída PWM de ser imune a ruídos (BARR, [1]). Esta escolha foi feita, pois a leitura de um sinal PWM exigiria algum tratamento de sincronização da taxa de atualização da entrada do sistema de leitura e a razão cíclica. Este tratamento seria complexo e, por questão de simplicidade, optou-se por utilizar a saída analógica, que não exigiria tratamento de sinal.

Houve, no entanto, uma complicação do decorrer do projeto. Testes preliminares do inclinômetro apontaram que seu tempo de resposta excederia o tempo necessário para um controle adequado. A frequência de canto de 0,25Hz implicaria que qualquer frequência de ondulação da maré maior que esta levaria a um atraso entre o ângulo medido e o ângulo real, além do ganho em malha fechada também ser reduzido. Outra complicação do também trazida pelo inclinômetro seria quanto à questão de ruídos. Ao se derivar o sinal de posição, qualquer ruído poderia acabar levando o sistema à instabilidade, já que a derivação pode ocorrer na subida do sinal de ruído. Decidiu-se, portanto, por indicação do Professor Doutor Thiago de Castro Martins, obter informações dinâmicas por outro tipo de sensor, no caso, um giroscópio eletrônico, que será detalhado no próximo subcapítulo.

7.1.2. Giroscópio – LPY410AL

Sensores baseados em giroscópios são aparatos que utilizam princípios de inércia (forças de Coriolis) para medir variações angulares em relação a um determinado referencial. A escolha por este tipo de sensor, entretanto, altera o sinal que tratado pelo controle, pois agora a medida em questão se trata da velocidade angular, e não mais de sua posição.

O LPY410AL é um giroscópio eletrônico produzido pela empresa de origem italiana e francesa, baseada na Suíça, chamada STMicroelectronics. Este giroscópio possui um dispositivo de sensoriamento composto por uma massa oscilante que reage a variações angulares e emite sinais analógicos proporcionais à estas variações. O diagrama de blocos, assim como a descrição de pinagens, pode ser encontrado nos anexos.

Este dispositivo consegue medir velocidades angulares em dois eixos e deve ser alimentado com tensão de entrada $V_{dd} = 3\text{ V}$. O sinal destas variações pode ser obtido a partir de duas portas: uma sem amplificação com sensibilidade de $2,5\text{ mV}/^\circ/\text{s}$ e outra, quatro vezes amplificada, com sensibilidade de $10\text{ mV}/^\circ/\text{s}$. Nota-se que a voltagem de saída apresenta duas componentes: uma fixa, de 1.5 V nominais, e uma variável, proporcional à velocidade angular naquele eixo – é a que, de fato, importa. A saída amplificada é mais adequada para a aquisição do sinal, pois necessita de menor definição por parte do sistema de aquisição do que a saída não amplificada e, portanto, foi a escolhida para a obtenção de sinal.

Para sua utilização, ou o giroscópio deve ser acoplado diretamente ao sistema a ser controlado ou deve ser instalado em uma plataforma de testes. O giroscópio utilizado para os testes foi fornecido pela STMicroelectronics já instalado em um adaptador para sockets DIL24, o STEVAL – MKI085V1, e, portanto, foi desta forma utilizado. O circuito de interface entre o adaptador e o sistema de aquisição do SEMA foi também projetado e desenvolvido por Roberto Romano. O adaptador foi montado em uma placa específica e alimentado por pilhas recarregáveis de telefones sem fio que fornecem cerca de 3 V para o circuito. A saída é composta de dois fios, um para cada eixo. O diagrama do giroscópio e algumas características mecânicas estão apresentadas abaixo:

Tabela 6 - Parâmetros do giroscópio

Parâmetro	Valor	Unidade
Amplitude de medição	± 100	graus/segundo
Sensibilidade	10	mV/graus/s
Frequência de corte	560	Hz

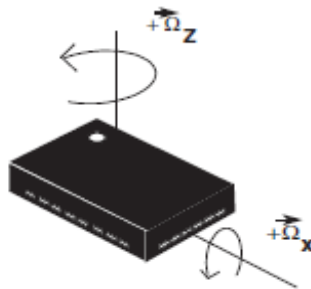


Figura 7-26 Posicionamento dos eixos no giroscópio. Fonte:
<http://www.st.com/stonline/books/pdf/docs/16578.pdf>

Tem-se então um módulo separado que foi adequadamente disposto dentro do modelo e conectado à placa de aquisição de dados, que será exemplificada no próximo item.

7.2. Detector de Erro

O sistema de comparação do sinal de saída com a referência, denominada por OGATA [4] como “Detector de Erro” poderia ser feito tanto de forma embarcada como externa. A forma embarcada implicava no desenvolvimento e programação de um microcontrolador que gerasse a lógica de controle e seria mais próxima à estrutura final do estabilizador. Entretanto, um sistema embarcado implicaria pouca eficiência nas rotinas de teste do SEMA, pois qualquer que fosse a correção necessária no controle levaria ao desmonte do microcontrolador, sua reprogramação e sua remontagem. Visto que esta forma de análise não se tornaria produtiva, decidiu-se utilizar o sistema externo.

Decidiu-se utilizar uma placa de aquisição de dados para transportar os sinais analógicos das medidas de velocidade do giroscópio para um computador que fizesse a análise e tratamento de dados. A vantagem desta opção é que a lógica de controle pode além de ser escrita em linguagem de alto nível com fácil interpretação, também ser modificada a qualquer momento dos testes.

Foi questionado se o sistema seria rápido o bastante para receber os dados dos giroscópios e passá-los ao computador, que faria o tratamento e geraria o sinal de controle. Foi indicado ao grupo que verificasse a opção da placa fabricada pela Advantech denominada USB-4704, no entanto, um modelo mais rápido foi utilizado, a USB-4711

7.2.1. Placa de aquisição USB-4711

A USB-4711 é uma placa de aquisição de dados externa fabricada pela Advantech, uma empresa americana de automação industrial. Ela possui entradas e saída analógicas com taxa de atualização de 150 mil amostras por segundo. O intervalo de segurança da voltagem de entrada é de 30 Vpp, que admite o intervalo de sinal do LPY410A. Sua interface com o computador se dá a partir de uma porta de comunicação USP com o protocolo 2.0 e está apresentada na figura abaixo:



Figura 7-27 USB-4711. Fonte www.advantech.com

Da análise do software provido pela Advantech e com o auxílio do Professor Doutor Thiago de Castro Martins, foi possível criar objetos a partir de bibliotecas OCX que acessavam tanto os canais de entrada como de saída da placa (ANEXO B). Estes objetos foram utilizados pelo programa MATLAB, desenvolvido pela Mathworks, para se gerar a lógica de controle, apresentada a seguir.

7.2.2. Lógica de controle

O tratamento do sinal recebido da placa de aquisição de dados também foi feito em MATLAB. Optou-se pelo projeto e execução do controle através da extensão do MATLAB, o Simulink, pois dessa forma ter-se-ia uma opção didática para referências futuras. O Simulink, no entanto, não fornece nenhum bloco de controle em tempo real que escreva diretamente no Workspace do MATLAB, que era o local onde estariam os objetos que fariam a troca de dados com a placa de aquisição. Foi utilizado então o Real-Time Blockset 7.1 for Simulink, criado pelo Professor Doutor em Engenharia de Sistemas da Universidade de Bologna, Leonardo Daga, que permite rodar malhas em tempo real no Simulink de maneira rápida e prática.

Para futuras referências, este bloco pode ser encontrado no web site <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/authors/8294> (acessado em 29/11/2010). O resultado da execução é, então, transferido à placa que envia o sinal aos propulsores. Os códigos de MATLAB para ler e escrever sinais na placa, fornecidos pelo Professor Doutor Eduardo Aoun Tannuri, e adaptados pelo grupo para trabalhar com range de saída de -5 a +5 V na placa de aquisição, estão no ANEXO B e a malha de Simulink está apresentada abaixo (segue novamente em versão maior no ANEXO C):

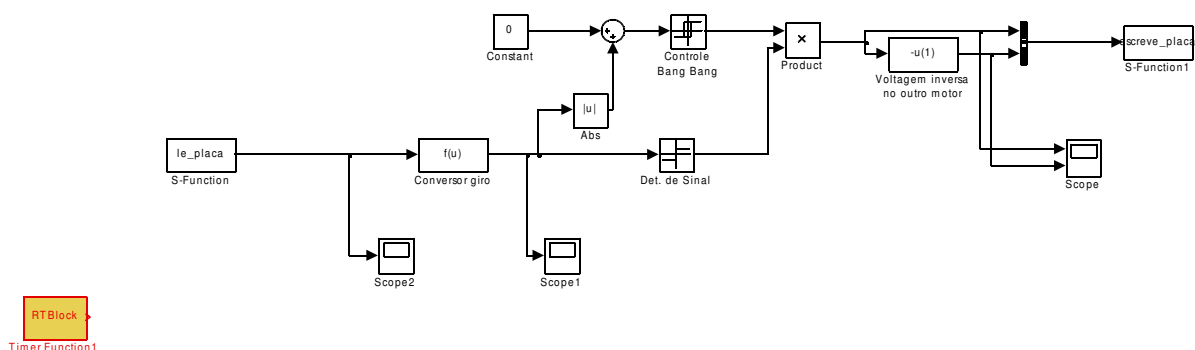


Figura 7-28 Malha em Simulink para controle do protótipo

A lógica desse controle é a seguinte: os blocos “le_placa” e “escreve_placa” são ambos S-Functions, ou seja, estão ligados a funções programadas externamente. No caso, são os *scripts* em .m: “le_placa.m” e “escreve_placa.m”, respectivamente.

O bloco “Conversor Giro” contém uma função simples interna que tira do valor da voltagem de saída do giro a componente fixa. Nominalmente, é de 1.5 V, mas para maior precisão utilizou-se 1.538 V. Ele ainda multiplica o valor obtido por 100, devido à sensibilidade do giroscópio. O número resultante está em graus/s. Por fim, multiplica-se por $(\pi/180)$ para obter a velocidade angular do balanço em rad/s.

A bifurcação após a saída do bloco “Conversor Giro” leva o sinal a dois outros blocos: o “Det. de Sinal” é uma simples função ‘sign’ que retorna +1 para entrada positiva, -1 para entrada negativa e 0 para entrada nula. O “Controle Bang Bang” é o bloco central dessa malha: de acordo com a sua entrada, que graças ao bloco “Abs” já está em valor absoluto, retorna a saída para atuação nos drivers, ou nula. O bloco funciona com uma *dead zone*. Dentro dessa faixa, uma variação na entrada não influi na saída. Caso a entrada passe de um *switch-on point*, a saída se torna automaticamente alta; caso desça do *switch-off point*, a saída se torna nula. O ajuste desses dois pontos é crucial ao acerto do SEMA, já que são basicamente os parâmetros do controlador.

A saída dos dois blocos é multiplicada, para que ela se torne correta quanto ao sinal de atuação: um valor de velocidade angular negativa exigirá atuação de mesmo impacto, porém no sentido contrário. O bloco “Voltagem inversa no outro motor” é auto-explicativo: a atuação desse controle é sempre de enviar voltagens de mesma magnitude e sinais opostos em cada motor.

8. Montagem dos Subistemas e Testes

Neste capítulo será descrito como os subsistemas citados nos capítulos anteriores foram montados, interligados e adaptados ao modelo.

8.1. Placas de Lógica e de Potência

Para fins de proteção e praticidade, as duas placas de potência foram dispostas dentro de uma caixa de passagem e distribuição. Esta foi embarcada no modelo junto com suas baterias de alimentação 12 Volts. Além destas entradas, a caixa recebe os cabos do comando externo, que permanece junto aos operadores, em terra. Os cabos tem um comprimento aproximado de 10 metros para que haja mobilidade do modelo no tanque de testes. Como saída, partem da caixa os cabos que alimentam os propulsores. Com isso, o dispositivo de proteção possui seis portas, duas entradas e uma saída para cada um dos atuadores.

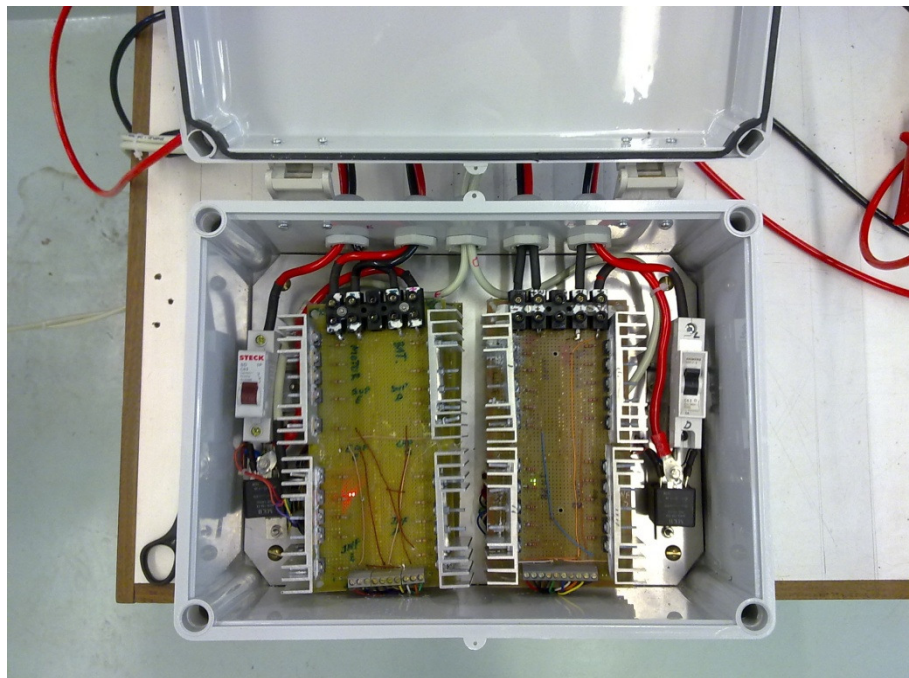


Figura 8-29 - Caixa aberta para visão das placas de potências. As placas lógicas estão atrás.

8.2. Sensor: Giroscópio

Pelos mesmos motivos citados no item anterior, para a placa de potência, o circuito do giroscópio também foi armazenado no interior de uma caixa protetora, que conta com um suporte interno para que o circuito seja fixado e sinta os efeitos de velocidade angular adequadamente. Externamente, a caixa possui uma chave de liga-desliga e luz de indicação. A única transmissão de dados envolvida neste sistema é feita por um cabo de saída que segue até a placa de aquisição.

A caixa, logicamente, deverá ser embarcada e foi devidamente fixada e posicionada. Este cuidado tem que ser levado em conta, uma vez que objetiva-se sensoriar o balanço da embarcação, que, como já foi dito, se dá no seu eixo longitudinal, o x. Sendo assim, este deve estar paralelo a um dos eixos de captação do sensor.



Figura 8-30 Caixa que contém o circuito do giroscópio

8.3. Placa de Aquisição

A placa A/D de aquisição foi conectada aos outros subsistemas através de duas portas de saída, AO0 e AO1, para as placas de potência, uma porta de entrada, AI0, para sinal proveniente do giroscópio e um canal serial de conexão USB para o computador. As portas usadas podem ser localizadas abaixo no esquema da placa:

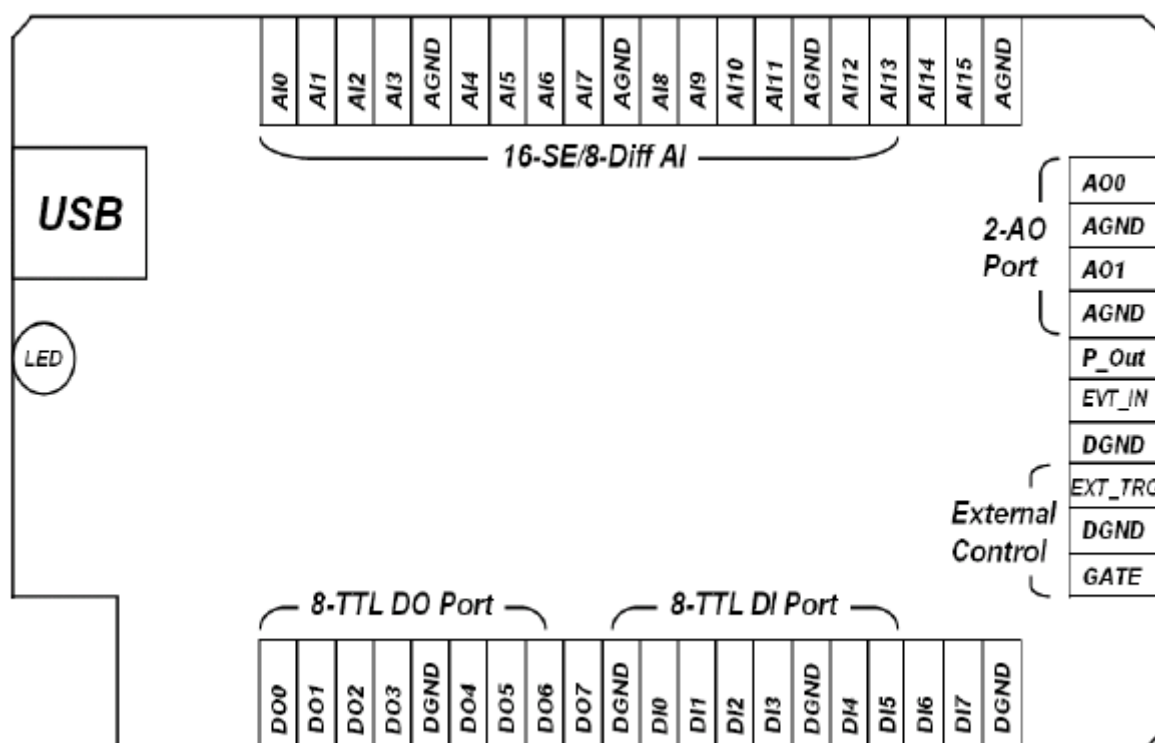


Figura 8-31 - Diagrama da Placa de Aquisição

8.4. Atuadores

Como já mencionado no Capítulo 5, os propulsores foram montados em um suporte que será fixo no espelho de popa. Sua alimentação foi feita pelo circuito de potência.

8.5. O Sistema Interligado

Visto como cada subsistema foi montado separadamente, o esquema abaixo ilustra de maneira geral como eles foram interligados.

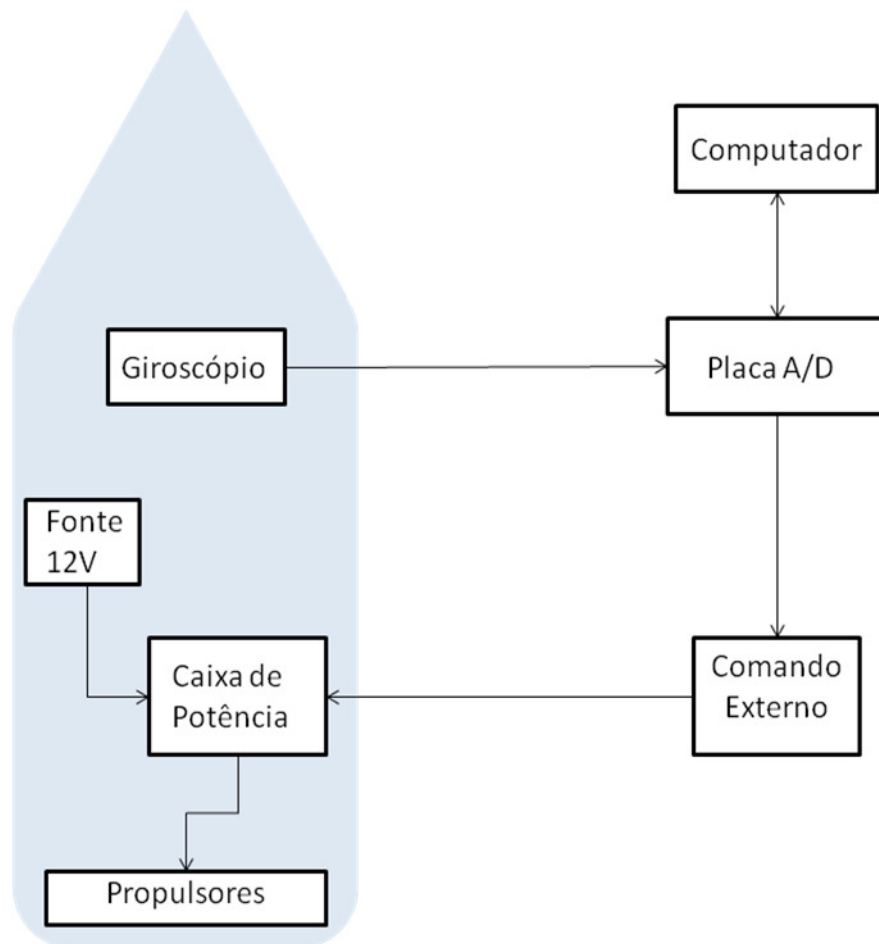


Figura 8-32 - Esquema da interligação entre os subsistemas

Ao receber uma ondulação que tenha alguma componente na direção perpendicular ao seu eixo longitudinal, a embarcação irá oscilar em torno deste eixo, causando o balanço. O giroscópio posicionado adequadamente para captar este movimento irá acusar uma variação de velocidade angular e irá mandar esta informação através de uma voltagem para a placa A/D. Este sinal é passado para o computador através de um bloco no MATLAB de leitura em tempo real de dados vindos de uma placa externa – ver o item “Lógica de Controle” no capítulo anterior. Os sinais adquiridos podem então ser tratados de forma conveniente para que os propulsores atuem da melhor maneira visando minimizar o balanço do barco. Caso a lógica de programa verifique que o sinal de entrada indica uma necessidade de atuação, um outro bloco do MATLAB, que também atua em tempo real, passa esta informação de volta para a placa A/D, que retransmite o conteúdo para a caixa de comando externo. Caso ela esteja habilitada no modo automático, o sinal de atuação é enviado para a caixa de potência, que alimentada com as baterias 12 V, disponibiliza corrente elétrica nos propulsores para sua atuação no sentido correto que minimiza o movimento indesejado da embarcação. Este ciclo se mantém constantemente, e a estabilização se torna ativa.



Figura 8-33 Protótipo montado e posicionado no tanque

8.6. Testes

Os testes físicos foram realizados no Tanque de Provas do Departamento de Engenharia Naval (PNV) da Universidade de São Paulo. O modelo foi colocado no tanque e primeiramente testes manuais foram feitos sem ondas atuando no sistema. Os propulsores foram acionados com a caixa de comando externo no modo manual para que o sistema de atuação, agora agindo no modelo, fosse testado e se pudesse observar o comportamento do casco com as respostas dos hélices.



A segunda etapa dos testes seria gerar ondas no tanque e verificar se o sistema de estabilização atuaria de maneira adequada no modo automático. Para tal, o modelo foi amarrado de forma que as ondas geradas o atingissem em um dos bordos – parte lateral do casco – para que assim a embarcação sofresse praticamente apenas a oscilação de interesse, o balanço. Após isso, o gerador de ondas foi inicialmente acionado em uma frequência próxima à natural do barco (entre 0,6Hz e 0,8Hz, segundo as simulações feitas no WAMIT e verificável no gráfico já apresentado de momento de balanço em relação ao período de onda) para maximizar o efeito de oscilação e assim fosse possível observar mais claramente se o SEMA corrigiria o efeito de balanço e, em caso afirmativo, quanto deste balanço seria minimizado. Com o intuito de perceber o sistema atuando e se ele causaria diferença significativa no movimento do barco, o controle foi ligado apenas após algumas oscilações do modelo. Assim, uma comparação do comportamento da embarcação com o estabilizador ligado e desligado poderia ser feita visualmente. Ao ser ligado, todos os sistemas e subsistemas estavam agindo e a caixa e a caixa de comando externa foi colocada no modo automático. Posteriormente, fez-se o mesmo ensaio com o gerador de ondas a 0,6 Hz e 1,0 Hz, para verificar o comportamento do barco e do SEMA a frequências menores e maiores que a de ressonância.

Uma ultima etapa de testes, se resumiu em variar as frequências e amplitudes das ondas geradas, sempre no mesmo sentido de atuação no casco. Dessa forma o sistema estabilizador poderia ser verificado para diversos tipos de ondas e fosse possível analisar se ele teria uma faixa funcional ou não.

A partir da segunda etapa os dados acusados no giroscópio, que passavam por um dos blocos do controle do MATLAB, foram sendo plotados no computador em um gráfico em tempo real. Isso possibilitou a observação das amplitudes de oscilação no momento em que elas ocorriam e se tornou possível quantificar a eficiência do projeto. Os dados também foram registrados em vetores para análise mais precisa posteriormente.

9. Avaliação dos Resultados e Propostas de Novos Desenvolvimentos

9.1. Simulação Computacional

Devido a problemas tecnológicos, não foi possível a realização do teste final do protótipo no Tanque de Provas. Para fins de avaliação serão levados em conta por ora apenas os resultados da simulação através do MATLAB/Simulink, que permite se ter uma noção da eficiência do SEMA.

A nossa metodologia de demonstrar resultado foi: rodamos duas simulações da mesma planta sofrendo exatamente o mesmo momento de onda externo. Na primeira, o único momento atuante é mesmo o da onda. Na segunda, simulamos o SEMA e verificamos uma redução da amplitude de balanço.

Parâmetros da Onda Simulada:

- Período: 2,0 s
- Amplitude: 0,1 m
- Ângulo de Incidência: 90° (ou seja, incidindo diretamente na lateral do barco)
- Tempo de rampa: 15s

Parâmetros do Controle:

- Liga ao sentir 0.3 rad/s
- Desliga ao sentir 0.2 rad/s

O tempo de rampa é um artifício para que a onda simulada não "atinga" o modelo de forma abrupta. Isso, pelo que Daniel Prata nos informou, seria prejudicial à simulação. A amplitude da onda cresce como uma rampa durante esse tempo até atingir o seu pico, e aí permanecer.

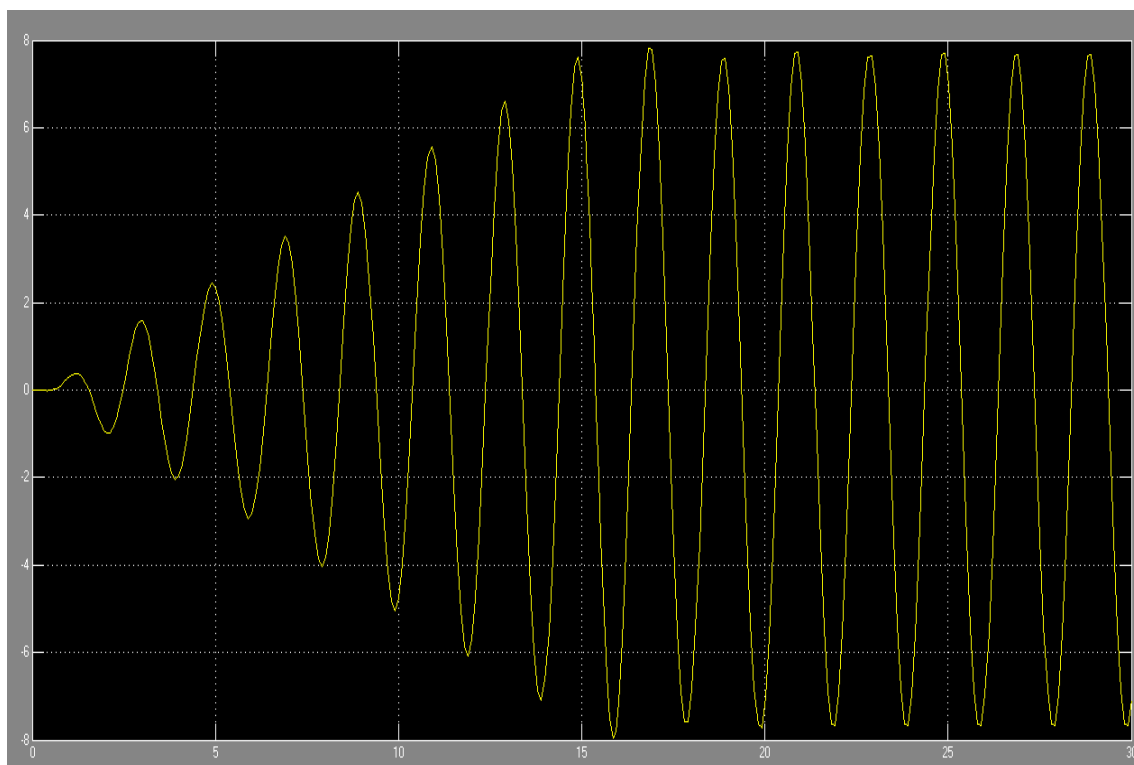


Figura 9-35 Amplitude do balanço em graus x tempo em segundos - Simulação sem o SEMA

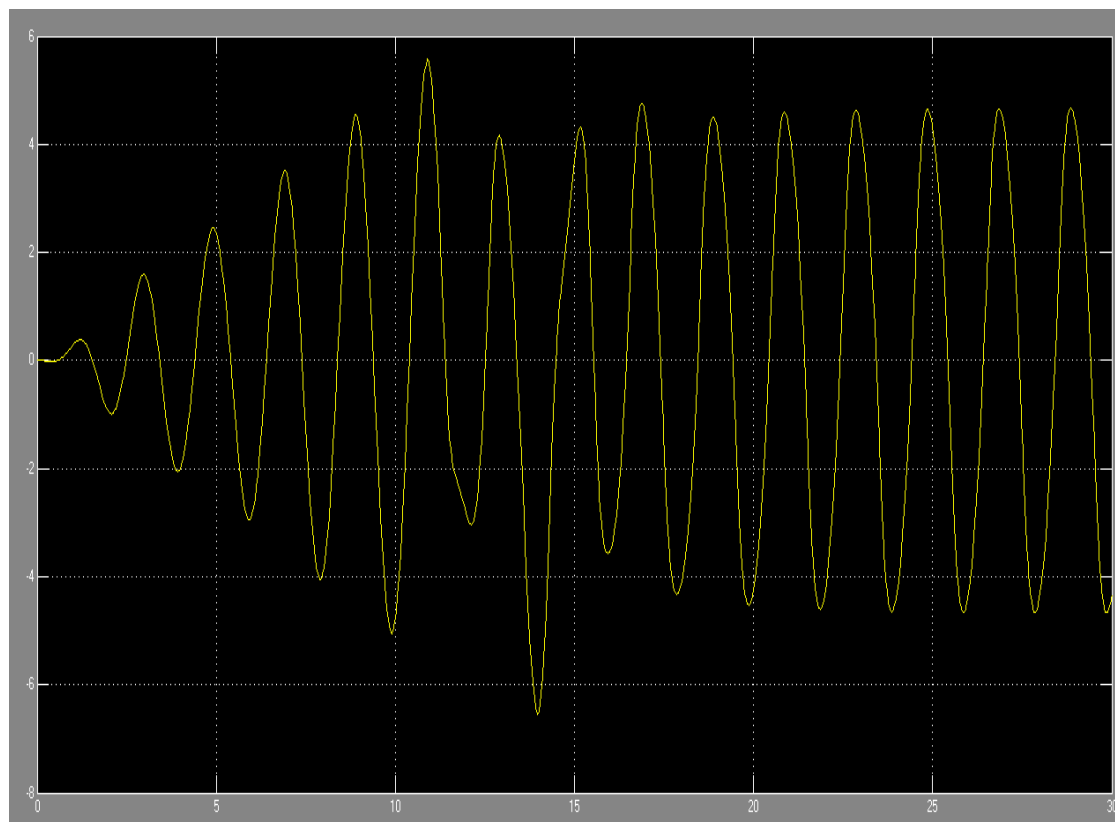


Figura 9-36 Amplitude do balanço em graus x tempo em segundos - Simulação com o SEMA

Pelos gráficos, visualiza-se que, sem o SEMA, após cerca de 15 s, o movimento de balanço entra em uma senoidal perfeita com aproximadamente 7,8 graus de amplitude. Isso está em acordo com a previsão física, já que o balanço será ultimamente uma integral da integral do momento atuante, que é uma senóide.

Já com o SEMA em atuação, após o mesmo período de 15 s, o balanço entra numa senoidal com 4,5 graus de amplitude. Ou seja, nesse caso, o SEMA foi responsável por uma redução de 25% na amplitude de balanço.

Teoricamente, a eficácia do sistema está comprovada. Fica a se verificar na prática essa atuação.

9.2. Teste do protótipo

Quanto aos testes mencionados nos itens 8.6, que envolveram usar o gerador de ondas do Tanque de Provas da Naval para uma simulação de como o protótipo se comporta frente a um distúrbio real, a seguir estão dispostos os resultados.

Como foi dito no item referido, fizeram-se três ensaios, cada um a uma frequência. Sistemas lineares apresentam a propriedade de serem mais influenciados pelo amortecimento em frequências próximas às de ressonância. Assim, é esperado que a 0,8 Hz (frequência natural do barco quando está flutuando na água) o SEMA apresente uma redução do balanço mais pronunciada, já que o seu efeito na dinâmica do barco é de um amortecimento não-linear.

Nesse caso, o SEMA levou a uma redução de 54% da amplitude da velocidade angular de balanço. Como o balanço é uma integral desse resultado, a diminuição dele é proporcional.

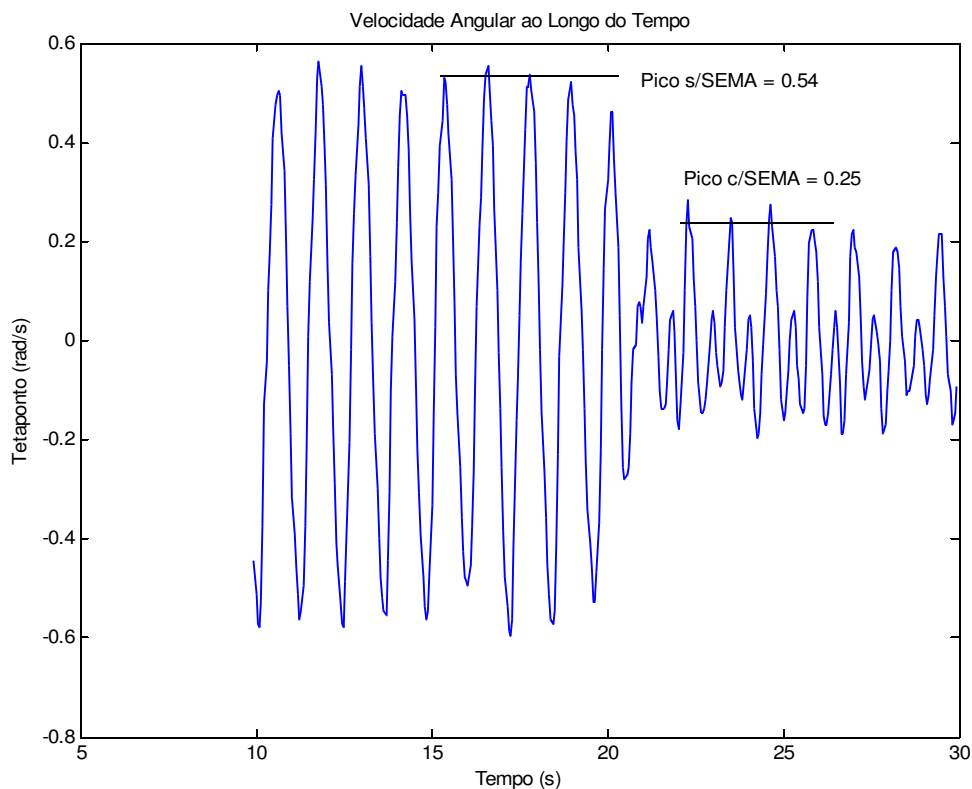


Figura 9-37 Análise da velocidade angular. Gerador de ondas a 0,8 Hz

Para ondas incidentes a 0,6 Hz, vê-se também uma redução sensível, de 55% entre os picos. Supomos que essa frequência é próxima o suficiente da de ressonância para que o amortecimento ainda tenha um forte efeito.

Note-se que não adianta comparar os valores absolutos entre gráficos diferentes porque as ondas geradas no Tanque de Provas da Naval têm amplitude com base em uma escala arbitrária, que possivelmente não se conserva ao se mudar a frequência. Assim, trabalhamos apenas com os valores relativos, o percentual de diminuição, em cada ensaio.

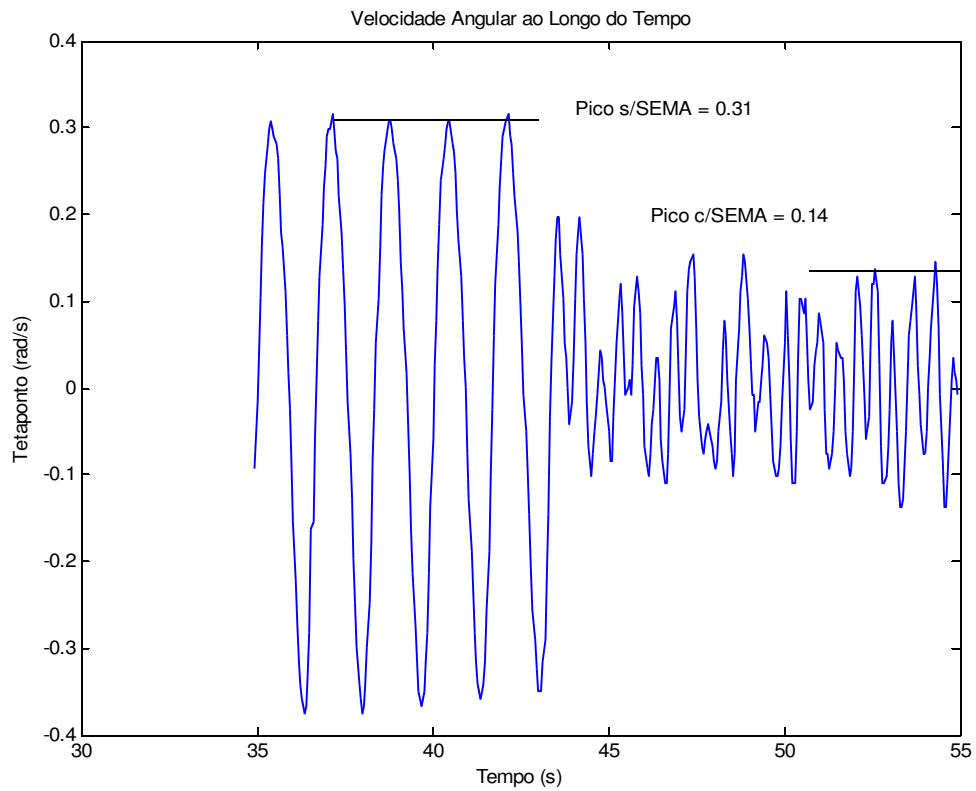


Figura 9-38 Análise da velocidade angular. Gerador de ondas a 0,6 Hz

Para ondas incidentes a 1,0 Hz, o efeito verificado foi ligeiramente menor, apesar de ainda estar dentro, ou até superior, das expectativas. Nesse caso a redução foi de 45%.

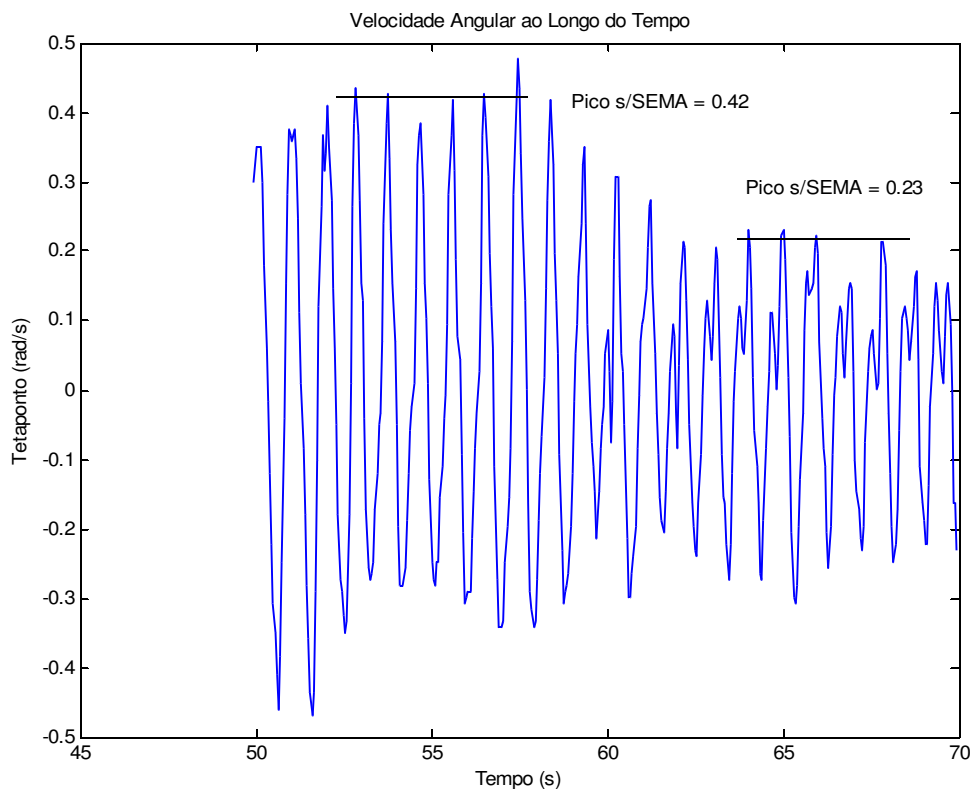


Figura 9-39 Análise da velocidade angular. Gerador de ondas a 1,0 Hz

9.3. Propostas de Novos Desenvolvidos

Com o sucesso e os objetivos alcançados neste primeiro projeto de um estabilizador ativo para embarcações pequenas e médias, novas propostas surgem para que o SEMA se desenvolva mais e melhore seus resultados. Uma próxima etapa poderia ser o teste e verificação do funcionamento do estabilizador em outro tipo de casco e com dimensões maiores que as do Cruiser 280, utilizado neste projeto. Com mudanças de, por exemplo, comprimento e momentos de inércia, o comportamento da embarcação com as oscilações das ondas muda e o sistema estabilizador teria novas situações para ser testado e avaliado.

O projeto como um todo também teria uma continuidade no desenvolvimento de outra forma de atuação além dos propulsores. O desejo de se poder estabilizar a embarcação com ela em curso pede um estudo voltado para o controle de movimentação dos hidrofólios, que seriam instalados na popa da embarcação. Esta solução foi exposta no capítulo 2 e engloba o projeto do SEMA como um todo.

Um kit de flaps e atuadores elétricos do fabricante Lenco Marine, que conta também com as devidas peças para instalação, já foi inclusive adquirido. Mesmo com a maioria das embarcações que possuem hidrofólios instalados, terem, para tal sistema, atuadores hidráulicos, foi escolhido o modelo elétrico já pensando em uma possível união com o sistema de controle elétrica já existente no SEMA.

Uma última proposta que fica após os resultados obtidos é de uma possível mudança no sistema de controle do tipo bang-bang para um do tipo proporcional. O projeto foi desenvolvido com sistemas que permitem esta mudança com certa adaptabilidade que torna desnecessário o desenvolvimento de novos subsistemas para isso. A placa de potência, sensores e atuadores seriam os mesmos e a mudança mais radical estaria no programa de controle desenvolvido no MATLAB. Assim poderia se verificar se um sistema proporcional traria uma eficiência maior à estabilização e se seu emprego seria justificável.

10. Conclusões

Certamente pode-se dizer que, como protótipo, o SEMA foi um sucesso. O nível de amortecimento contra o balanço mostrou-se muito eficiente. Foi um trabalho extenso, que passou por eletrônica, mecânica, e controle e simulação aplicados a sistemas dinâmicos. Não teve como foco um desenvolvimento teórico; visou muito mais uma aplicação inovadora e de alto-nível a um problema clássico, o de reduzir o balanço de uma embarcação. Chegou ao resultado almejado através da reunião de elementos relativamente fáceis de se encontrar separadamente.

Por outro lado, há arestas soltas, que foram ressaltadas nos “Desenvolvimento Propostos”: estudar a estabilização com embarcação sob seguimento, para que de fato o controle possa ser multi-ativo, verificar técnicas de controles alternativas ao bang-bang.

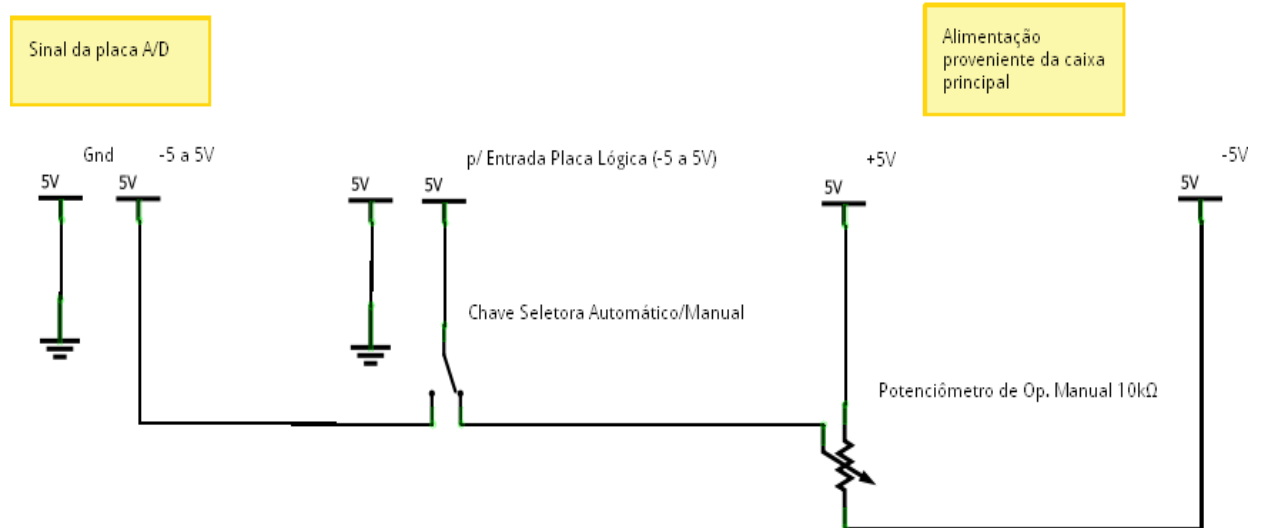
11. Referências Bibliográficas

- [1] BARR, Michael. **"Pulse Width Modulation," Embedded Systems Programming.** September 2001, pp. 103-104.
- [2] BEER, Ferdinand P; JOHNSON, E. Russel. **Mecânica Vetorial para Engenheiros, Cinemática e Dinâmica.** Pearson Makron Books, São Paulo, 2004.
- [3] MUNSON, Bruce R.; YOUNG, Donald F.; OKIISHI, Theodore H. **Fundamentos da Mecânica dos Fluidos.** Editora Edgard Blücher, São Paulo, 2004.
- [4] OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno.** Prentice Hall, São Paulo, 2003.
- [5] The Society of Naval Architects and Marine Engineers. **Principles of Naval Architecture Vol. I.** Jersey City, 1988.
- [6] <http://it.cosasdebarcos.com/galeria-fotos-articulo-flaps-lenco-standard-305x455mm-45385010082356485765695770554567.html> Acessado em 15/11/2010
- [7] http://www.turismo.gov.br/turismo/noticias/todas_noticias/20100410-2.html Acessado em 15/11/2010.
- [8] http://www.portalbaiadeguanabara.org.br/portal/exibe_sub.asp?id_sub=66 Acessado em 15/11/2010

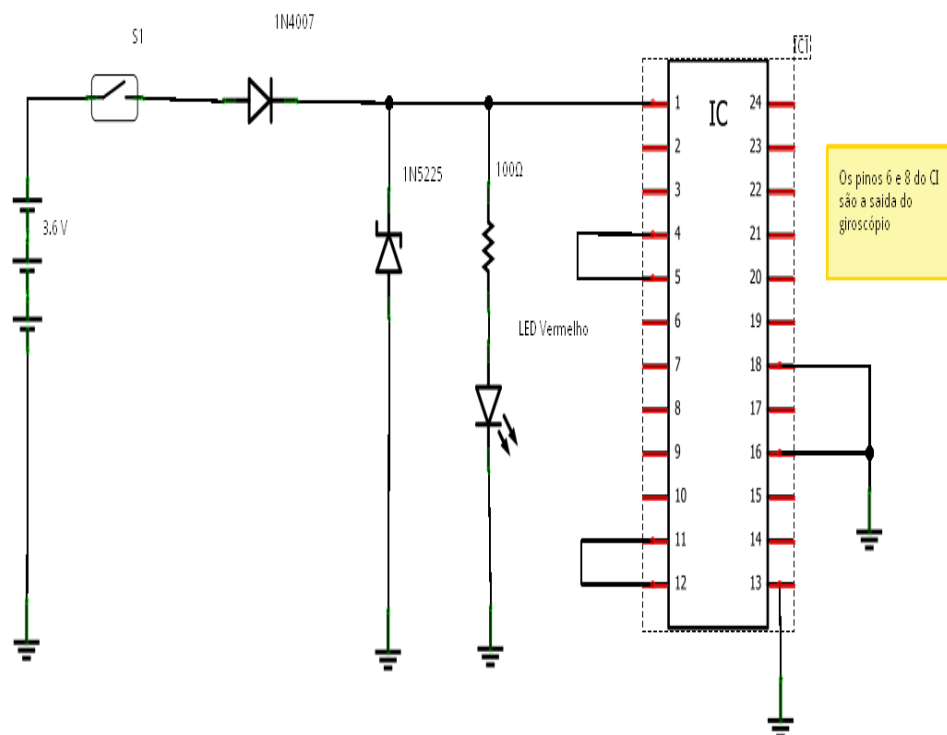
12. Anexos

12.1. ANEXO A: Circuitos

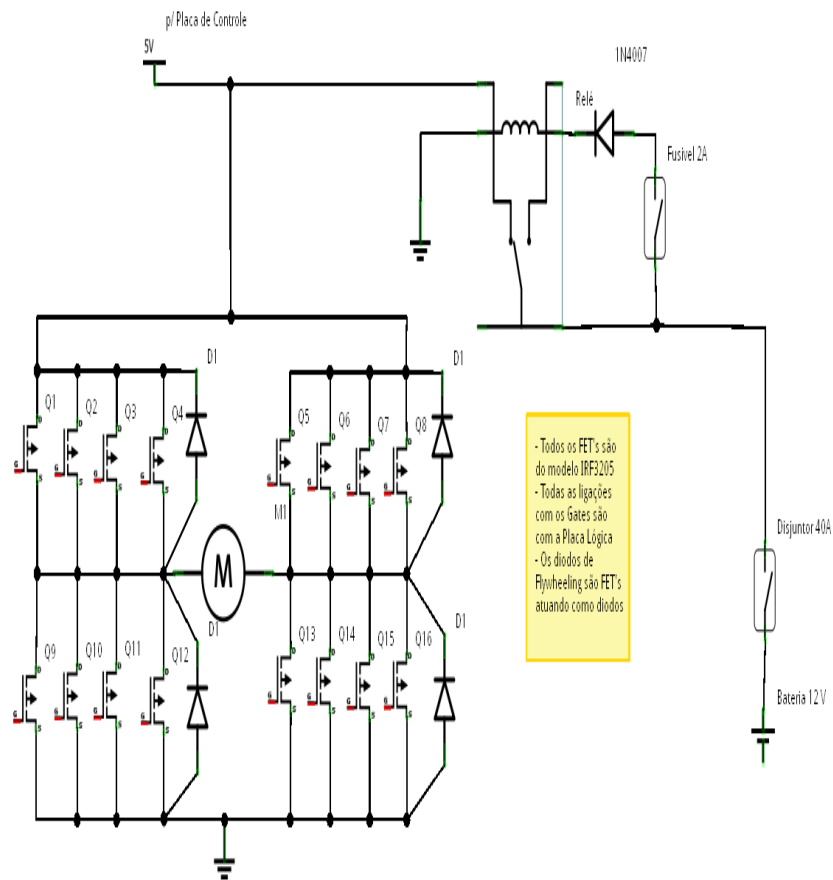
12.1.1 Caixa de Comando Externo



12.1.2 Circuito do Giroscópio



12.1.3 Circuito de Potência



12.2. ANEXO B: Códigos de MATLAB

12.2.1. Simulink_BarcoDP.m

(Roda o modelo em Simulink e prepara uma visualização gráfica do resultado. O código é o mesmo para as simulações com e sem SEMA. O que muda nesse caso é o modelo de Simulink)

```
clear all
close all
clc

%Parâmetros de entrada
Periodo=2.0; %período da onda em segundos
Amplitude=0.1; %amplitude da onda em metros
Incidencia=90; %Incidencia da onda em graus
Bext44=35.3462; %Amortecimento viscoso estimado (5% do Bcrit)
tf=30; %tempo de simulação em segundos
rampa=15; %tempo de rampa em segundos

%parâmetro do wamit
arquivo.um=dlmread('conjunto.1');
arquivo.dois=dlmread('conjunto.2');
arquivo.out=textread('conjunto.out','%s','delimiter','\n');
arquivo.frc=textread('conjunto.frc','%s','delimiter','\n');
%procura rho, ULEN, C(3,3) e C(9,9)
textoout=char(arquivo.out);
posgra=strmatch('Gravity:',textoout);
palavras=strread(textoout(posgra(1),:),'%s','delimiter',' ');
g=str2num(char(palavras(2)));
ULEN=str2num(char(palavras(5)));
clear palavras
palavras=strread(textoout(posgra(1)+1,:),'%s','delimiter',' ');
rho=str2num(char(palavras(6)));
clear palavras
posgra=strmatch('C(3,3),C(3,4),C(3,5):',textoout);
ncorpos=1;
for nn=1:ncorpos
    for ii=0:1
        posgra2=strfind(textoout(posgra(nn)+ii,:),':')+1;
        C(3+ii+(nn-1)*6,3+ii+(nn-1)*6:3+ii+2+(nn-1)*6)=[strread(textoout(posgra(nn)+ii,posgra2:end),'%13f','delimiter',' ','emptyvalue',0)];
    end
    posgra2=strfind(textoout(posgra(nn)+2,:),':')+1;
    C(5+(nn-1)*6,5+(nn-1)*6:6+(nn-1)*6)=strread(textoout(posgra(nn)+2,posgra2:end),'%13f','delimiter',' ','emptyvalue',0);
    end
    C(4,4)=C(4,4)*rho*g*(ULEN^4);
    K=C(4,4);
    %Procura a massa do corpo no arquivo.frc
    textofrc=char(arquivo.frc);
    J=strread(textofrc(9,:),'%s','delimiter',' ');
    J=str2double(J(4));

    k=5;
    PER=arquivo.um(:,1);
    PER2=arquivo.dois(:,1);
    A=rho*(ULEN^k)*arquivo.um(:,4);
    B=rho*(ULEN^k)*(2*pi/Periodo)*arquivo.um(:,5);
    m=3;
```

```

F=rho*g*Amplitude*(ULEN^m)*arquivo.dois(:,4);
phi=arquivo.dois(:,5);
%verifica se o período é único ou será interpolado
periodos=unique(PER);

A44=A(PER==Periodo&arquivo.um(:,2)==4&arquivo.um(:,3)==4);
B44=B(PER==Periodo&arquivo.um(:,2)==4&arquivo.um(:,3)==4);
F4=F(arquivo.dois(:,1)==Periodo&arquivo.dois(:,2)==Incidencia&arqu
ivo.dois(:,3)==4);
phi4=phi(arquivo.dois(:,1)==Periodo&arquivo.dois(:,2)==Incidencia&
arquivo.dois(:,3)==4);

%Monta vetor de força de onda
t=0:.1:100;
elevacao=Amplitude*cos(2*pi/Periodo*t);
F_de_t=F4*cos(2*pi/Periodo*t+phi4);

%
% figure(1)
% subplot(3,1,1);plot(t,elevacao);
% subplot(3,1,2);plot(t,F_de_t);
% subplot(3,1,3);plot(t,F_de_t/F4,'b',t,elevacao/Amplitude,'r');

%Roda o simulador
sim('simulador.mdl')

%Visualização
ka=((2*pi/Periodo)^2)/9.8;
B=2; %largura do retangulo que representa o barco
T=.75; %altura do retangulo que representa o barco
t=simout.time;
x=-B:.1:B;
elevacao=zeros(length(t),length(x));
for ii=1:length(t)
    for jj=1:length(x)
        elevacao(ii,jj)=simout.signals.values(ii,3)*Amplitude*cos(ka*x
(jj)-(2*pi/Periodo)*t(ii));
    end
end

xc=[B/2 B/2 -B/2 -B/2];
yc=[-T/2 T/2 T/2 -T/2];
for ii=1:length(t)
    for kk=1:length(xc)

        aux = [cos(-simout.signals.values(ii,1)) -sin(-simout.sig-
nals.values(ii,1));sin(-simout.signals.values(ii,1)) cos(-simout.sig-
nals.values(ii,1))]*[xc(kk);yc(kk)];

        xr(kk,ii)=aux(1);
        yr(kk,ii)=aux(2);
    end
end

for ii=1:length(t)

    plot(x,elevacao(ii,:))
    xlim([-B B])
    ylim([-T T])

```

```

axis equal

for kk=1:length(xc)-1
    line([xr(kk,ii) xr(kk+1,ii)], [yr(kk,ii) yr(kk+1,ii)])
end
line([xr(end,ii) xr(1,ii)], [yr(end,ii) yr(1,ii)])
Frame(ii)=getframe(gcf);

end

%movie2avi(Frame, 'TesteSimulacao', 'fps', 30, 'compression', 'None')

close all

```

12.2.2. Ini.m

(Cria os objetos ActiveX Server para interligar o MATLAB com a placa de aquisição. Só deve ser rodado uma vez, ao início da operação)

```

global placa;
placa=actxserver('AIControl.AdvAI');

placa_out=actxserver('AdvAO.advAOCtrl');
placa_out.SetValueRange (0, -5, 5); % Ajusta o valor dos canais 0 e 1
para poder colocar
placa_out.SetValueRange (1, -5, 5); % voltagens negativas nas saidas

```

12.2.3. Escreve_placa.m

(Usado pelos modelos de Controle em Tempo Real do Simulink para dar um *output* através da placa de aquisição das variáveis de controle)

```

function [sys,x0,str,ts]=escreve_placa(t,x,u,flag,placa_out)

switch flag

    %%%%%%%%%%%%%%%
    % Initialization %
    %%%%%%%%%%%%%%%
    case 0
        [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes();

    %%%%%%%%%%%%%%%
    % Update %
    %%%%%%%%%%%%%%%
    case 3,
        sys=mdlOutputs(t,x,u,placa_out);

    %%%%%%%%%%%%%%%
    % Unused flags %

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
case { 1, 2, 4, 9 },
    sys = [];

    otherwise
        error(['unhandled flag = ', num2str(flag)]);
    end

% end limintm

%
%=====
%
% mdlInitializeSizes
% Return the sizes, initial conditions, and sample times for the S-
% function.
%=====
%
function [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes()

sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 0;
sizes.NumDiscStates = 0;
sizes.NumOutputs = 0;
sizes.NumInputs = 2;
sizes.DirFeedthrough = 1;
sizes.NumSampleTimes = 1;

sys = simsizes(sizes);
str = [];
x0 = [];
ts = [-1 0]; % sample time: [period, offset]

% end mdlInitializeSizes

%=====
%
% mdlUpdate
% Update the animation.
%=====
%
function sys=mdlOutputs(t,x,u,placa_out)

placa_out.ChannelNow=0;
placa_out.DataAnalog = u(1);

placa_out.ChannelNow=1;
placa_out.DataAnalog = u(2);

sys = [];

% end mdlUpdate

```

12.2.4. Le_placa.m

(Usado pelos modelos de Controle em Tempo Real do Simulink para ler o sinal do giroscópio, um *input*, através da placa de aquisição)

```
function [sys,x0,str,ts]=le_placa(t,x,u,flag,placa)

switch flag

    %%%%%%%%%%%%%%%
    % Initialization %
    %%%%%%%%%%%%%%%
    case 0
        [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes();

    %%%%%%%%%%%
    % Update %
    %%%%%%%%%%%
    case 3,
        sys=mdlOutputs(t,x,u,placa);

    %%%%%%%%%%%%%%%
    % Unused flags %
    %%%%%%%%%%%%%%%
    case { 1, 2, 4, 9 },
        sys = [];

    otherwise
        error(['unhandled flag = ',num2str(flag)]);
end

% end limintm

%
%=====
%
% mdlInitializeSizes
% Return the sizes, initial conditions, and sample times for the S-
% function.
%=====
%
function [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes()

sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 0;
sizes.NumDiscStates = 0;
sizes.NumOutputs = 1;
```



```

sizes.NumInputs      = 0;
sizes.DirFeedthrough = 1;
sizes.NumSampleTimes = 1;

sys = simsizes(sizes);
str = [];
x0  = [];
ts  = [-1 0]; % sample time: [period, offset]

% end mdlInitializeSizes

%=====
%=====
% mdlUpdate
% Update the animation.]
%=====
%=====
%
function sys=mdlOutputs(t,x,u,placa)

valor = placa.DataAnalog;
sys = valor;

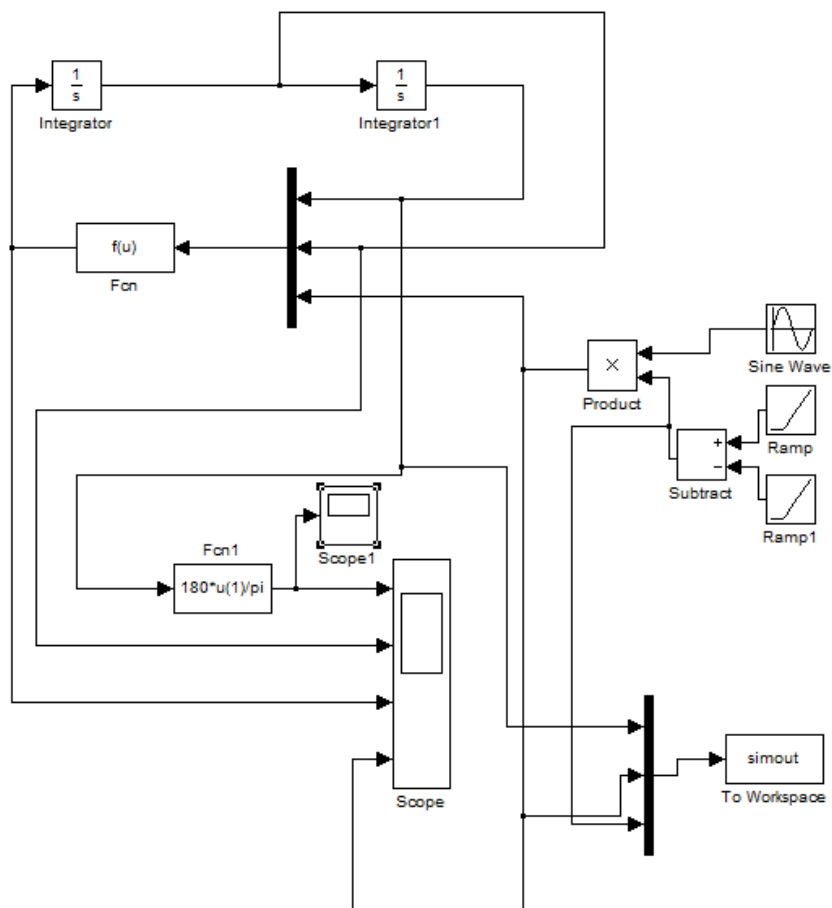
% end mdlUpdate

```

12.3. ANEXO C: Malhas em Simulink

12.3.1. Simulador.mdl

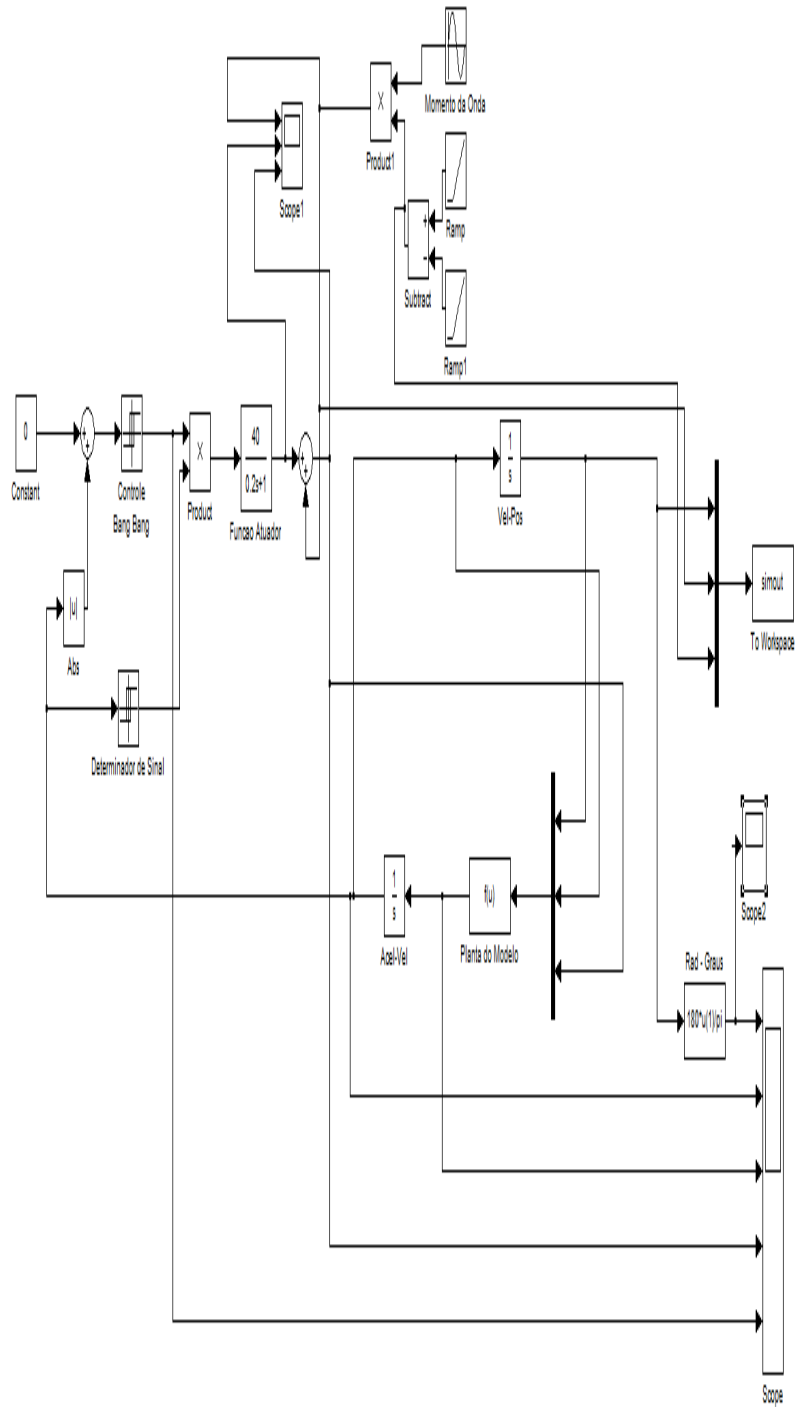
(Simula a embarcação com uma onda incidente, sem o SEMA)



O bloco $f(u)$ contém o modelo dinâmico da embarcação.

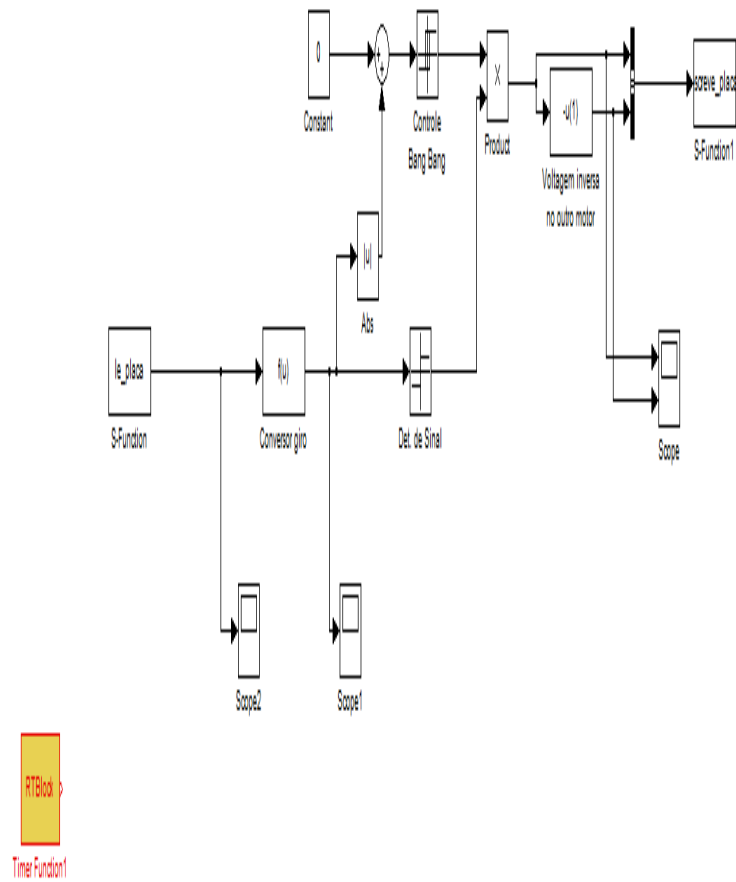
12.3.2. SEMA.mdl

(Simula uma embarcação com onda incidente e o SEMA)



12.3.3. SEMAControle.mdl

(É o controle propriamente dito, feito em Simulink)



12.4. ANEXO D: Desenhos de Fabricação

Seguem em arquivos .pdf anexos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 Centro de Carena. Fonte: Principles of Naval Architecture, 1988 5

Figura 1-2 Metacentro (M), Centro de Massa (G) e Centro de Carena (B). Fonte: Principles of Naval Architecture, 1988 6

Figura 2-3 Rotações de Embarcações. Fonte: [www. http://sharathneelakanta.wordpress.com/](http://sharathneelakanta.wordpress.com/) 8

Figura 2-4 Proposta para o projeto de estabilizador 8

Figura 2-5 Kit de hidrofólios e atuadores lineares. Fonte: it.cosasdebarcos.com 9

Figura 2-6 Propulsor Elétrico 9

Figura 3-7 Casco do Cruiser 280 11

Figura 4-8 Gráfico com o Momento no Roll x Período para cada ângulo de incidência 16

Figura 4-9 Malha em Simulink da Simulação com o SEMA 17

Figura 5-10 Motor Elétrico Phantom 19

Figura 5-11 Suporte original de um motor de popa de lancha 20

Figura 5-12 Vistas de Modelo e Explodida 20

Figura 5-13 Representação de posicionamento dos suportes dos atuadores 21

Figura 5-14 Suporte com atuador afogado 22

Figura 5-15 Suporte com atuador levantado 22

Figura 5-16 Motor fixado e fio com dinamômetro 23

Figura 5-17 Integrante do grupo lendo o dinamômetro 24

Figura 5-18 - Gráfico Atuador Empuxo x Corrente 26

Figura 6-19 Placas de controle e potência 28

Figura 6-20 Osciloscópio ligado ao motor 28

Figura 6-21 Integrante do grupo testando as placas 29

Figura 6-22 Caixa externa de comando. São 3 pares: liga/desliga, modo manual/automático e voltagem de entrada 30

Figura 6-23 Circuito completo, com baterias e propulsores ao fundo 30

Figura 7-24 Representação de uma malha de controle genérica FONTE [4] 31

Figura 7-25 ACCUSTAR II DAS 20. Fonte: <http://www.meas-spec.com> 34

Figura 7-26 Posicionamento dos eixos no giroscópio. Fonte: <http://www.st.com/stonline/books/pdf/docs/16578.pdf> 37

Figura 7-27 USB-4711. Fonte www.advantech.com 38

Figura 7-28 Malha em Simulink para controle do protótipo 39

41	Figura 8-29 - Caixa aberta para visão das placas de potências. As placas lógicas estão atrás.
	Figura 8-30 Caixa que contém o circuito do giroscópio 42
	Figura 8-31 - Diagrama da Placa de Aquisição 43
	Figura 8-32 - Esquema da interligação entre os subsistemas 44
	Figura 8-33 Protótipo montado e posicionado no tanque 45
	Figura 8-34 SEMA pronto para ensaio 47
50	Figura 9-35 Amplitude do balanço em graus x tempo em segundos - Simulação sem o SEMA
50	Figura 9-36 Amplitude do balanço em graus x tempo em segundos - Simulação com o SEMA
	Figura 9-37 Análise da velocidade angular. Gerador de ondas a 0,8 Hz 52
	Figura 9-38 Análise da velocidade angular. Gerador de ondas a 0,6 Hz 53
	Figura 9-39 Análise da velocidade angular. Gerador de ondas a 1,0 Hz 54