

Marcus Vinicius de Melo Oliveira

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

2011

FICHA CATALOGRÁFICA

Oliveira, Marcus Vinicius de Melo
Sistema de estabilização multi ativa-SEMA / M.V.M. Oliveira.
-- São Paulo, 2011.
59 p.

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

1. Embarcações (Estabilização) I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II. t.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Nicola Getschko pela orientação.

Ao Prof. Dr. Thiago de Castro Martins pelo auxílio com as dúvidas referente à malha de controle.

Ao Prof. Dr. Hernani e Prof. Dr. Andrade, do departamento de engenharia naval, pela indicação de literaturas náuticas.

RESUMO

Com o mercado náutico em expansão e nenhum produto de estabilização marítima a preço acessível, o objetivo deste projeto é atenuar as oscilações que as embarcações de pequeno e médio porte sofrem devido à sua interação com a água. Este trabalho propõe o começo do percurso que visa a estabilização com embarcação em seguimento, através do controle de atuadores lineares acoplados ao espelho de popa do barco. Um giroscópio é usado para a detecção de movimentos no sentido do eixo longitudinal, ou de seguimento da embarcação. As partes de pré-construção do protótipo foram coletadas a partir do projeto realizado em 2010 com o mesmo tema e orientador. A equação que rege os esforços aplicados no barco devido ao sistema de estabilização foi pesquisada e encontrada, com o intuito de usa-la na modelagem teórica. Adicionalmente foi ensaiado o controle de posição de um estabilizador linear, para verificar se o equipamento usado para o controle em velocidade zero pode ser usado para o caso de embarcação em seguimento.

Palavras-chave: Estabilização ativa de embarcações, controle, MATLAB, atuadores lineares, hidrofólio, trim tab.

ABSTRACT

With the expanding marine market and no marine stabilization equipment at affordable price, the goal of this project is to mitigate the oscillations that small and medium size vessels suffer due to their interaction with water. This work aims to propose the beginning of the path towards ship stabilization around the sailing axis controlling the pair of linear actuator coupled to the boat's transom. A gyroscope is used to detect movements in the direction of the vessel's longitudinal/sailing axis. The construction parts of the prototype were collected from the former project completed in 2010, that had the same topic and tutor. The equation that governs the applied loads on the boat due to the stabilization system was researched and found, since such was essential in order to use it in theoretical modeling. In addition, the position control of a linear actuator was tested, in order to verify that the equipment responsible for the control at "null speed" can be used in the "dynamic" situation.

Keywords: Active stabilization of vessels, control, MATLAB, linear actuators, hydrofoil, trim tab.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VII
GLOSSÁRIO	VIII
1) INTRODUÇÃO	1
1.1) O MERCADO NÁUTICO BRASILEIRO: PASSADO E PRESENTE.....	1
1.2) CONFORTO E SEGURANÇA A BORDO.....	3
2) TIPOS DE ONDULAÇÕES EM EMBARCAÇÕES E ESTABILIZADORES EXISTENTES.....	4
3) O SISTEMA DE ESTABILIZAÇÃO MULTI ATIVA- SEMA.....	10
3.1) O PROJETO ANTERIOR	12
3.2) A SOLUÇÃO PROPOSTA.....	12
3.3) O MÓDULO DE POTÊNCIA.....	15
3.4) O GIROSCÓPIO	17
3.5) A PLACA DE AQUISIÇÃO A/D	18
3.6) O COMPUTADOR.....	19
4) O PROJETO ATUAL DO SEMA	20
4.1) A METODOLOGIA, CARACTERÍSTICAS E PARTICULARES.....	20
4.2) OS <i>TRIM TABS</i>	22
4.3) A CONSTRUÇÃO DO PROJETO	24
4.5) A MALHA DE CONTROLE DE POSIÇÃO.....	29
5) CONCLUSÃO E PASSOS FUTUROS	39
6) REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
7) ANEXOS	41
A) MENSAGEM ELETRÔNICA ENVIADA ÀS FABRICANTES DE TRIM TABS:	41
B) O DATASHEET DA PLACA DE AQUISIÇÃO	43
C) CÓDIGOS DOS ARQUIVOS EM MATLAB , S-FUNCTIONS, QUE FAZEM USO DOS OBJETOS RECEBIDOS A PARTIR DA PLACA DE AQUISIÇÃO.....	43
D) DETALHES E TÉCNICALIDADES DO SENSOR DE POSIÇÃO	49

LISTA DE FIGURAS

FIG 1 SÃO PAULO BOAT SHOW: 34MIL VISITANTES E R\$200 MILHÕES EM NEGÓCIOS [5].....	2
FIG 2 ROTAÇÕES EM TORNO DE CADA EIXO PRINCIPAL [1].	4
FIG 3 EXEMPLO DE ESTABILIZAÇÃO SIMILAR AO DESENVOLVIDO PELA WESMAR	5
FIG 4 SISTEMA DE ESTABILIZAÇÃO DSP4800 DA WESMAR [6]	6
FIG 5 ALETA (FIN) DESENVOLVIDA PELA COMPANHIA: DE 0.23 A 2,8m ² [6]	6
FIG 6 REPRESENTAÇÃO DO ESTABILIZADOR GYROFIN [7]	7
FIG 7 CAVITAÇÃO NA BARBATANA [7]	8
FIG 8 GYROFIN, PELA NORTHROP GRUMMAN [7]	9
FIG 9 SISTEMA DE ESTABILIZAÇÃO BASEADO EM GIROSCÓPIO M7000A DA SEAKEEPER [8]	9
FIG 10 A MONTAGEM CONCEITUAL DOS ATUADORES DO SEMA [1]	11
FIG 11 O PRINCÍPIO DINÂMICO DE FUNCIONAMENTO DO SEMA [1]	11
FIG 12 A EMBARCAÇÃO ADQUIRIDA [1]	13
FIG 13 O ATUADOR PHANTOM ADAPTADO AO PROJETO.....	13
FIG 14 O MODELO DO CONTROLE MAIS SISTEMA FÍSICO	14
FIG 15 O DIAGRAMA DO PROTÓTIPO FÍSICO [1].....	15
FIG 16 O INTERIOR DA CAIXA DE POTÊNCIA DO SEMA [1]	16
FIG 17 A REPRESENTAÇÃO DO GIROSCÓPIO [1].....	18
FIG 18 A CAIXA DE INSTALAÇÃO DO GIROSCÓPIO [1]	18
FIG 19 A PLACA DE AQUISIÇÃO [10].....	19
FIG 20 O PAR DE <i>TRIM TABS</i>	22
FIG 21 A ATUAÇÃO DO TRIM TAB [12].....	23
FIG 22 RESULTANTES GERADAS PELA INCLINAÇÃO DO HIDROFÓLIO NO CASCO.	23
FIG 23 CASO DEDICADO AO ESTUDO PELOS AUTORES DE [2]	26
FIG 24 AS FORÇAS GERADAS PELA VARIAÇÃO DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO DO FLUXO	27
FIG 25 BLOCO DE CONTROLE DO CASO EMPÍRICO A SER TESTADO	29
FIG 26 O LAM3-3-1-200-12B DA HIWIN.	30
FIG 27 VELOCIDADE EM FUNÇÃO DA CARGA DO MOTOR [13].....	31
FIG 28 A PLACA DE SENSOR DE POSIÇÃO LINEAR E SUA INTERFACE.....	31
FIG 29 EXEMPLO DE FUNCIONAMENTO DO SENSOR	32
FIG 30 PRANCHETA DE TESTES	33
FIG 31 A ALIMENTAÇÃO, O MÓDULO DE POTÊNCIA E O CONTROLE REMOTO.....	33
FIG 32 AS FUNÇÕES DO CONTROLE REMOTO PARA DIRIGIR O MÓDULO DE POTÊNCIA	34
FIG 33 A CONEXÃO ENTRE O SENSOR DE POSIÇÃO E A PLACA DE AQUISIÇÃO A/D	34
FIG 34 DIAGRAMA PARA AQUISIÇÃO DO SINAL DO SENSOR NO SIMULINK	35

FIG 35 LEITURA DO SENSOR NO COMPUTADOR.....	36
FIG 36 MALHA DE CONTROLE DE POSIÇÃO DO ROBÔ	37
FIG 37 RESPOSTA PARA UMA ENTRADA DEGRAU	38
FIG 38 CONTROLE DE POSIÇÃO AOS 65MM	39
FIG 39 A PLACA A/D	43
FIG 40 DESIGNAÇÃO DE FIOS DO SENSOR	49
FIG 41 TENSÃO EM CASA LEITURA DO SENSOR	50

GLOSSÁRIO

- **LOA** – *Length overall*, 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.
- **Momento de balanço:** Rotação em torno do eixo longitudinal.
- **Lift:** empuxo em inglês.

1) Introdução

O Sistema de Estabilização Multi Ativa (SEMA) é um projeto iniciado em anos anteriores e vem sendo continuado no presente. De forma sucinta, o objetivo desse sistema de estabilização náutica é anular o balanço de uma embarcação tanto em seguimento quanto em repouso. A estabilização em repouso foi obtida com sucesso na primeira etapa do projeto, e na segunda e atual etapa a equipe almeja a estabilização em seguimento.

Inicialmente é demonstrado o contexto de mercado náutico brasileiro no qual o SEMA se insere, e quais as motivações para sua criação e desenvolvimento. Após isso é descrito as atividades realizadas para alcançar o objetivo, atividades estas que são duas. A primeira é encontrar a equação que relaciona os esforços impostos na embarcação em seguimento, já que é uma informação necessária para a criação do modelo teórico do SEMA. A segunda é criar e testar empiricamente o controle de posição dos atuadores lineares a serem implementados no sistema de estabilização.

1.1) O Mercado Náutico Brasileiro: Passado e Presente

O mercado náutico brasileiro, em especial a parcela voltada para o lazer e recreação, vem experimentando um crescimento considerável na última década, por volta de 10% ao ano segundo [3] (com exceção de 2009), e ainda apresenta espaço para expansão. Isso pode ser inferido se observar valores comparativos entre o país e outras nações, atualmente a estimativa para a frota de embarcações acima de 14 pés é de 1 barco a cada 6000 habitantes, valor baixo em relação a países como Estados Unidos (1 barco/20 habitantes), Canadá (1/15) e Alemanha e França, com valores próximos de 1/155 [1].

Segundo [4], em 2010 esse mercado movimentou R\$550 milhões (com quase a metade somente no estado de São Paulo), e a sua expansão também acarretaria o aumento da oferta de empregos, já que cada mil embarcações geram em torno de 5000 novos empregos diretos e 2400 empregos indiretos.

No que diz respeito aos dias atuais, evidências de que o mercado náutico brasileiro está aquecido podem ser constatadas em mídias especializadas frequentemente. O periódico “Revista Época-negócios” [3] reporta em Outubro deste ano que estaleiros e nacionais e estrangeiros, reunidos na São Paulo Boat Show 2011,

projetam final de período satisfatório e um crescimento que pode vir a dobrar em cinco anos.

Outra característica interessante do setor é que está também sendo afetado pelo fenômeno marcante em outros ramos da economia em um país em desenvolvimento como o Brasil, que é a sua “popularização” entre a classe C [3]. Existe ainda atualmente a concorrência por financiamento para compradores de pequenos barcos, por parte dos bancos Santander e Bradesco, mais uma amostra de que o mercado náutico está progressivamente deixando de ser visto como um setor exclusivamente orientado ao topo da pirâmide.

A efeito de comparação com outros setores, como o automobilístico, a China também está ensaiando ganhar espaço nesse segmento. Segundo o caderno “Economia & Negócios” do jornal “O Estado de São Paulo” de agosto de 2011 [4], importadoras estão trazendo produtos chineses para o país visando justamente a classe média que enriqueceu nos últimos anos. Ainda segundo [4], fala-se atualmente na opção que a nova classe C tem que é comprar um barco em vez de um segundo carro.

O Brasil recebe ainda atenção de companhias francesas, dentre as quais se pode citar o estaleiro Jeanneau, que toma estratégias de mercado que indicam a esperança de retorno ao médio e longo prazo [3]. Segundo a companhia, a convicção é que o Brasil será o maior mercado da América Latina.



Fig 1 São Paulo Boat Show: 34mil visitantes e R\$200 milhões em negócios [5].

1.2) Conforto e Segurança a Bordo

Essas informações descritas até este ponto têm como objetivo apontar o período de aquecimento pelo qual o mercado náutico brasileiro está passando, grande parte devido ao ramo direcionado para turismo e recreação, que em geral são constituídos por embarcações de pequeno a médio porte (até 24 metros de Length overall-LOA). No entanto, um grande entrave nato a embarcações dessa constituição é a presença da instabilidade e oscilação no barco devido à sua interação com as ondas da água. Esse problema está entrelaçado não somente com a redução do conforto dos tripulantes e passageiros, como também é a causa de acidentes. Segundo [1], dados estatísticos detalhados não existem, no entanto o estudo realizado em 2007 pela Guarda Costeira dos Estados Unidos EUA mostra que dos 408 acidentes em embarcações atribuídos às condições e influências do ambiente, o efeito das ondas aparece em 2º lugar, sendo responsável por 30% das ocorrências. A análise fica mais severa se for avaliado o causador principal de danos ocasionados em seres humanos (i.e. com vítimas) nestes acidentes: em um total de 333 ocorrências, a ondulação passa ao 1º lugar, com 35% das ocorrências. Ainda segundo a mesma fonte, a Guarda Costeira americana, de 3673 ocorrências relacionadas a número de vítimas/danos pessoais, 15% foram devidas a quedas no interior da embarcação. Observando por sua vez os casos fatais, eles contam 30% dos 685 registros para este tipo de acidente.

Estes valores encontram eco em pesquisas e dados coletados em outras partes do mundo. O Marine Accident Investigation Branch-MAIB, do Reino Unido concluiu, com dados obtidos entre 1992 e 2006, que acidentes fatais devido a quedas para fora da embarcação representam 32% dos casos. Em adicional, esta sondagem aponta uma concentração de acidentes entre trabalhadores da indústria pesqueira, eles foram 115 vezes maiores que a média das outras ocupações na Inglaterra.

Outro dado estatístico interessante apontado ainda pela Guarda Costeira dos EUA, no mesmo período citado, mostra que grande parte das fatalidades ocorreu em embarcações menores que 8 metros, totalizando 82% das ocorrências.

Apesar de dados apurados a respeito desse tema serem escassos, a proposta dessas informações é indicar uma relação veemente entre a ocorrência de acidentes em embarcações e a oscilação oriunda da interação delas como oceano. Tomando como referência esses valores, seria interessante e relevante para consumidores desse ramo de

mercado o aumento e melhora da segurança em embarcações, especialmente as de pequeno e médio porte, com o intuito de diminuir os acidentes mencionados.

2) Tipos de Ondulações em Embarcações e Estabilizadores Existentes

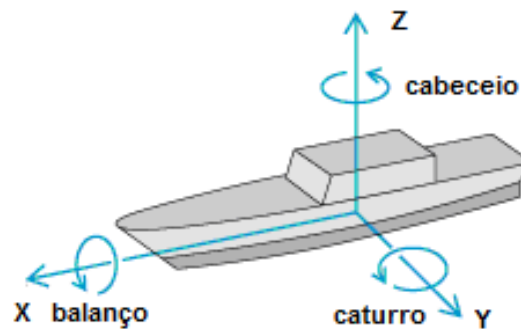


Fig 2 Rotações em torno de cada eixo principal [1].

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 deve ao fato dele ocorrer com mais frequência e em maior amplitude que os demais, e é portanto o foco de diversos produtos de estabilização náutica existentes no mercado atualmente.

Pode-se citar como exemplo de estado da arte de sistemas de estabilização aquele desenvolvido pela Wesmar-Western Marine Electronics [6], em especial a linha DSP4800 que será descrito a seguir, e que segue o princípio dos “estabilizadores por aleta” (*Fin stabilizers*).

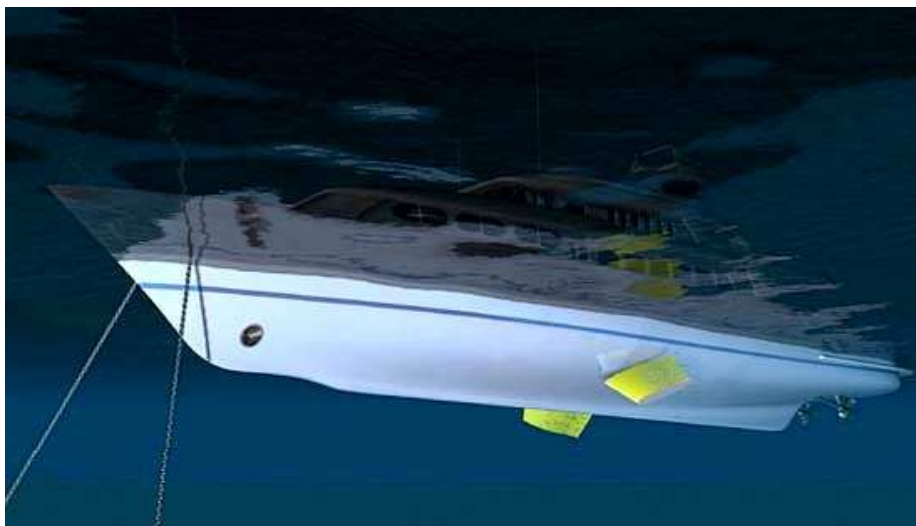


Fig 3 Exemplo de estabilização similar ao desenvolvido pela Wesmar

A figura 3 tenta demonstrar o seu modo de funcionamento. Duas aletas se estendem abaixo da linha d'água da embarcação tanto no lado de porto quanto a estibordo. Com o objetivo de anular a rolagem, essas aletas são reajustadas e rotacionadas de acordo do console de controle desse sistema. Este ultimo se comunica com a caixa de motor (Drive box), que por sua vez alimenta eletricamente e gere o posicionamento dos hidrofólios. O console de controle recebe o sinal proveniente de um giroscópio, que é o sensor de rolagem da embarcação. A companhia ainda oferece três tipos diferentes de modos de estabilização:

- Padrão: é o modo normal de estabilização e anulação de rolagem, com controle e atuação em tempo real.
- Modo lift: o controle mantém as aletas em posição de sustentação hidrodinâmica positiva com o intuito de elevar a embarcação acima da linha d'água e consequentemente reduzir o consumo de combustível.
- Modo ancorado: nesse modo o controle posiciona as aletas de modo a fornecer a melhor estabilização possível quando a embarcação está ancorada, isto é, quando ela não está em seguimento.

Uma interface em tempo real da posição dos hidrofólios é ainda proposta, e o conjunto inteiro desse sistema de estabilização pode ser visto a seguir.

Caixa de controle



Fig 4 Sistema de estabilização DSP4800 da Wesmar [6]



Fig 5 Aleta (Fin) desenvolvida pela companhia: de 0.23 a 2,8m² [6]

Outro sistema de estabilização de renome é a linha Gyrofin concebido pela Northrop Grumman [7], que é voltada para embarcações de grande porte, como cargueiros. No que diz respeito à estrutura de aleta, o princípio é similar ao que foi previamente apresentado, com a variante que ela pode ser deslocada longitudinalmente de acordo com o controle, além da discrepância dimensional da sua área (de 3.6m² a 22m²) [7]:

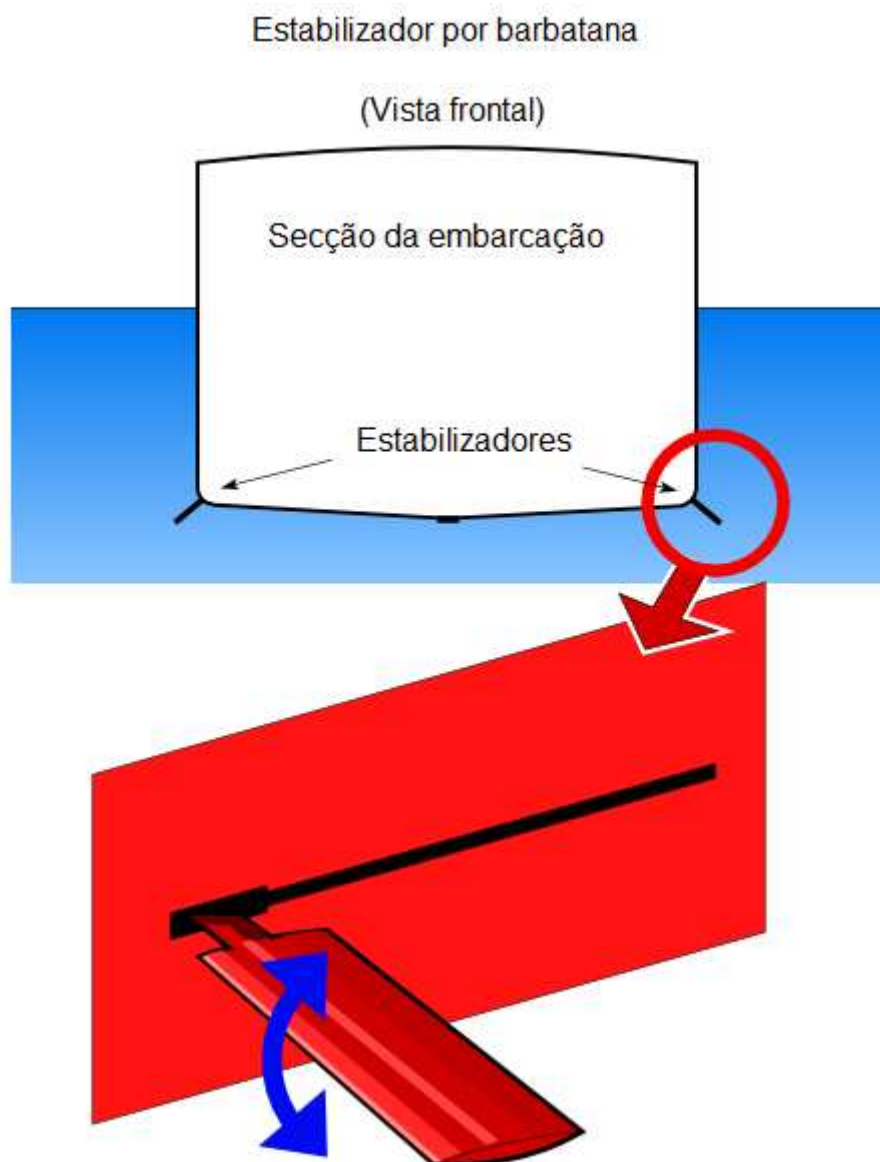


Fig 6 Representação do estabilizador Gyrofin [7]

Algumas diferenças podem ser notadas entre esse sistema de estabilização e o apresentado pela Wesmar, além do posicionamento longitudinal. Primeiramente a

barbatana apresenta um flap de cauda que, segunda a empresa, aumenta a razão sustentação/arrasto do casco, o que economiza combustível.

Outra vantagem especificada para esse sistema é o controle de lift, que só é possível (de acordo com a fabricante) devido à liberdade de posicionamento longitudinal. Isso previne que o hidrofólio seja manipulado eventualmente dentro da zona de cavitação, cuja imagem pode ser averiguada na figura 7. Em outros termos, as forças de sustentação necessárias para estabilização são produzidas de forma mais fiel, o que aumenta a eficiência do equipamento.

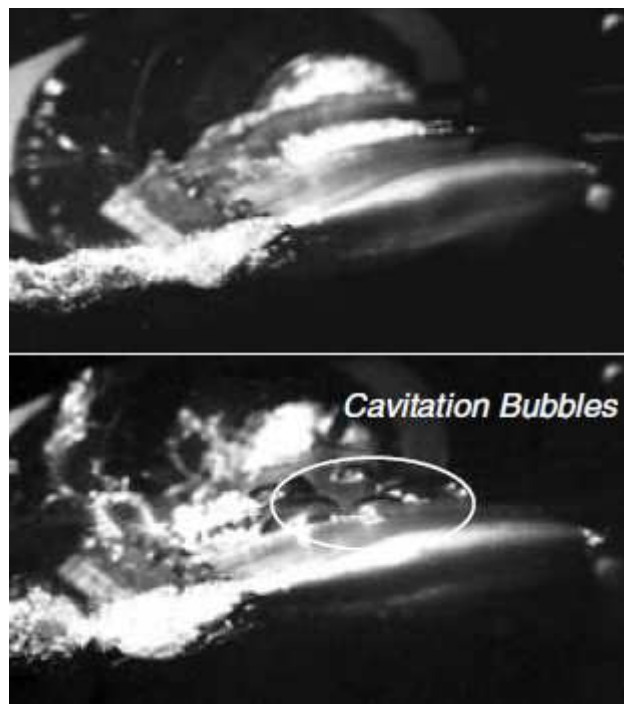


Fig 7 Cavitação na barbatana [7]

É interessante ainda notar que devido às embarcações alvo para as quais esse sistema de estabilização foi projetado, a transmissão de potencia e movimentação dos hidrofólios se dá através de atuadores hidráulicos.



Fig 8 Gyrofin, pela Northrop Grumman [7]

Encontra-se ainda outro tipo de sistema de estabilização elaborado de forma distinta do que foi apresentado até então. O modelo M7000A da Seakeeper [8] faz uso de um giro maciço que rotaciona em altas velocidades e impõe uma força de reação no casco contrária à tendência de balanço.

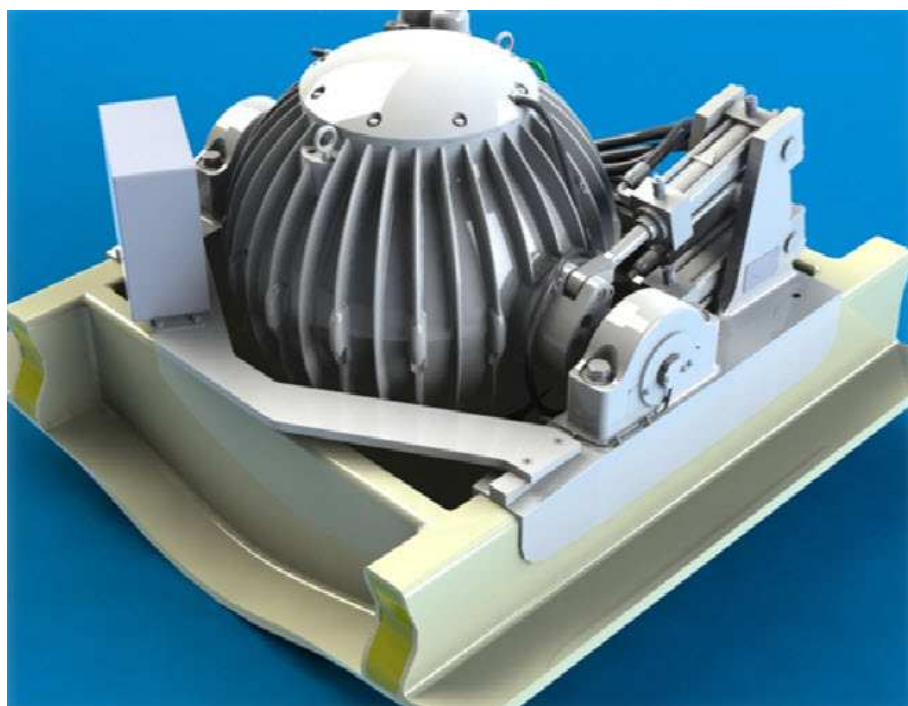


Fig 9 Sistema de estabilização baseado em giroscópio M7000A da Seakeeper [8]

Esta forma de estabilização apresenta como vantagem a forma idêntica de operar tanto no modo ancorado/velocidade zero quanto em seguimento, além que é possível adaptar um segundo giroscópio na embarcação caso somente um não fornecesse o efeito almejado. No entanto, os pontos negativos também existem, e podem-se citar alguns como custo elevado, peso e ainda as forças e esforços impostos no caso que não foram consideradas no projeto deste último.

O intuito de apresentar esses equipamentos é apontar o que existe de estado da arte em estabilização náutica no mercado hoje em dia, e como isso motiva a criação e desenvolvimento do SEMA, que tem como premissa a estabilização de embarcações de pequeno e médio porte, ramo em alta no mercado nacional atualmente.

Nota-se inicialmente que dos três modelos apresentados somente um deles em capacidade de estabilização em velocidade zero (o da Seakeeper), e além disso, mesmos os dois iniciais, desenvolvidos pela Wesmar e pela Northrop Grumman, eles não são voltados para embarcações de até médio porte, além de apresentar custo e instalação que beiram o próprio valor de um barco desse nicho.

Portanto tem-se um setor de mercado em crescimento há alguns anos, com previsão de expansão durante o futuro próximo e duplicação em até 5 anos, conjuntamente com um problema recorrente ao tipo de produto que é negociado nesse setor (embarcações de pequeno e médio porte), e acima disso os equipamentos que existem atualmente para sanar tal entrave não podem ser aplicados em barcos desse porte ou são demasiados custosos. É em um cenário como esse que o SEMA encontra respaldo.

3) O Sistema de Estabilização Multi Ativa- SEMA

Como mencionado anteriormente, a estabilização da rolagem (rotação em torno do eixo X, de seguimento) é o foco do SEMA, por conta desse tipo de oscilação ser a mais percebida. Ou seja, é esse tipo de movimento que o projeto ambiciona anular.

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

Essa atuação é alcançada instalando em pontos simétricos no espelho de popa dois hidrofólios constituídos de atuadores lineares e propulsores elétricos.

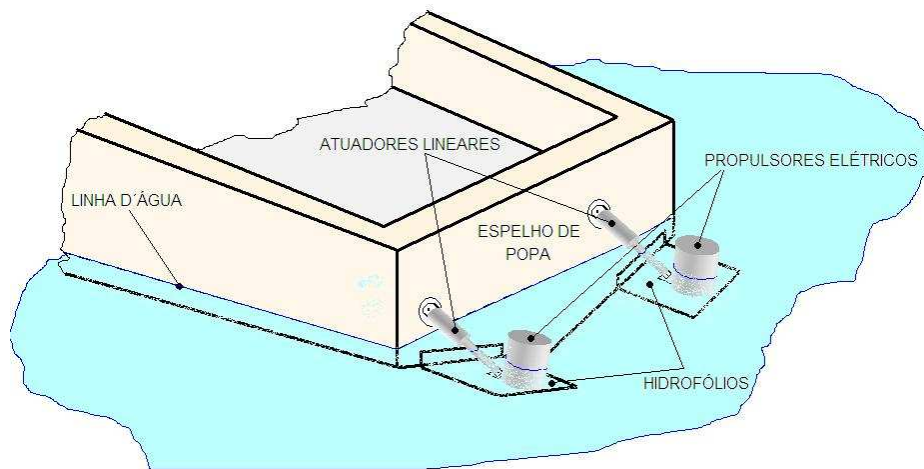


Fig 10 A montagem conceitual dos atuadores do SEMA [1]

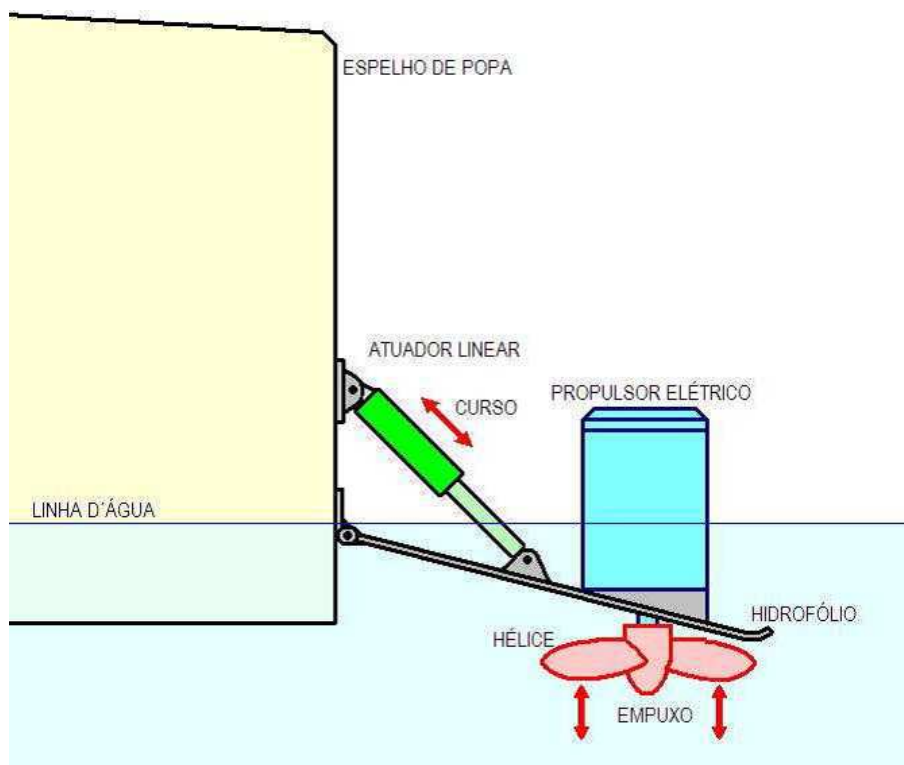


Fig 11 O princípio dinâmico de funcionamento do SEMA [1]

Os atuadores lineares têm como função alterar o ângulo de ataque dos hidrofólios em relação ao escoamento, gerando um lift resultante no casco. Tal força de sustentação depende da velocidade relativa entre a embarcação e a água, do ângulo de ataque e da área do hidrofólio. Ou seja, esses componentes visam a estabilização dinâmica da embarcação [1].

Já os propulsores elétricos entram em ação quando a embarcação não está em seguimento, em velocidade zero. Nesse caso o empuxo gerado por um propulsor faria um binômio com aquele gerado pelo segundo, em sentido contrário. Visando simplificar o controle do sistema, esta parcela seria ativada em formato “bang-bang” ou liga-desliga [1].

3.1) O Projeto Anterior

O projeto atual do SEMA é continuação do projeto iniciado em 2010, ele é, portanto a base de trabalho do projeto atual. Sendo assim, é conveniente retomar o que foi desenvolvido no ano anterior, já que a motivação, equipamentos e conclusões são aproveitados no presente.

O projeto desenvolvido no ano passado visava a modelagem, construção e teste de um dispositivo ativo cuja meta era anular instabilidade de embarcações de pequeno e médio porte, que são frequentemente campos de acidentes ocasionados pelo seus balanços, como previamente explicado.

O projeto foi aprovado e financiado pela FAPESP, que foi uma fonte de recurso importante, possibilitando o capital necessário para os materiais e componentes.

3.2) A Solução Proposta

Inicialmente a equipe adotou um modelo em escala real de uma embarcação de médio porte para se trabalhar. Tal decisão foi tomada considerando diversos fatores relevantes para o desenvolvimento do projeto, como a impossibilidade de projetar um atuador em escala menor daqueles encontrados no mercado, prezando assim pela proporção coerente entre todos os componentes do projeto [1]. Segundo a mesma fonte, para que a semelhança entre o modelo e o protótipo seja completa deve-se respeitar a semelhança geométrica, cinemática e dinâmica.



Fig 12 A embarcação adquirida [1]

Características:

LOA (Length Over All): 2,74 m

Boca: 1,39 m

Calado: 0,42 m

Na etapa posterior, a equipe submeteu os dados obtidos desse casco a simulações computacionais, com o objetivo de observar as forças atuantes no modelo para diversas configurações de ondas, e posteriormente desenvolver uma lógica de controle com estes dados, que seria simulada no MATLAB.

No que diz respeito aos atuadores, foram obtidos dois motores elétricos da marca Phantom, que também foram submetidos a testes para quantificar suas naturezas e relações úteis para o projeto, como por exemplo empuxo em função da corrente



Fig 13 O atuador Phantom adaptado ao projeto

Na sequência, com esses dados em mãos, foi modelado o sistema completo em MATLAB conjuntamente com o seu controlador. As vantagens dessa etapa de simulação computacional são as mesmas daquelas de um projeto típico de engenharia, a saber, verificação da proposta e economia de tempo e financiamento, no caso de uma suposta reengenharia do projeto.

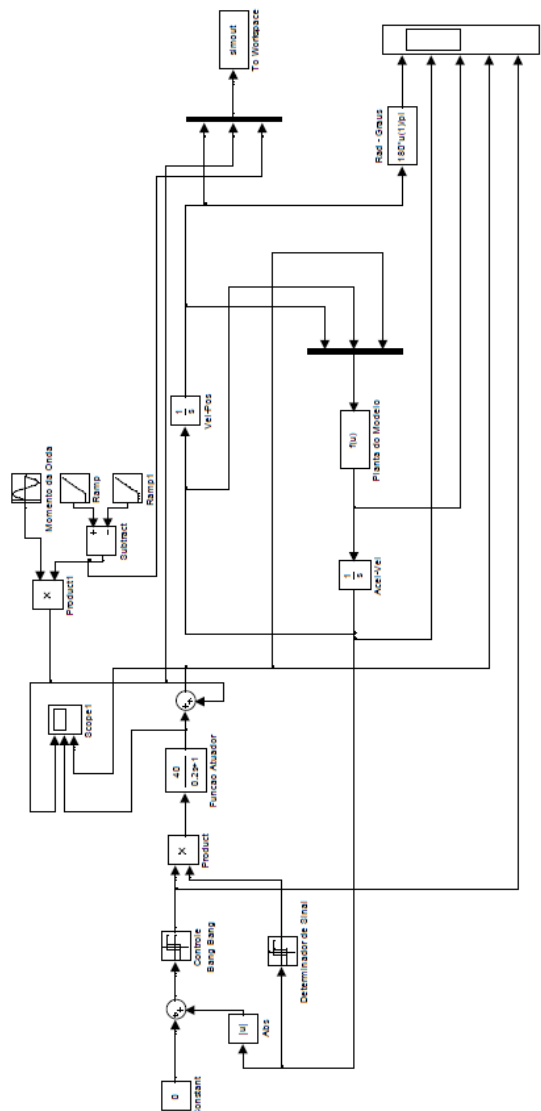


Fig 14 O modelo do controle mais sistema físico

Como os resultados em mãos, os passos seguintes foram a aquisição do resto dos componentes necessários para completar o protótipo de testes, como os suportes dos atuadores, a confecção da placa de controle lógico e de potência para os atuadores, a compra e instalação apropriada dos sensores (um giroscópio eletrônico conectado a uma

placa de aquisição A/D) e baterias elétricas. Ao final, a equipe contou com um sistema com o seguinte perfil:

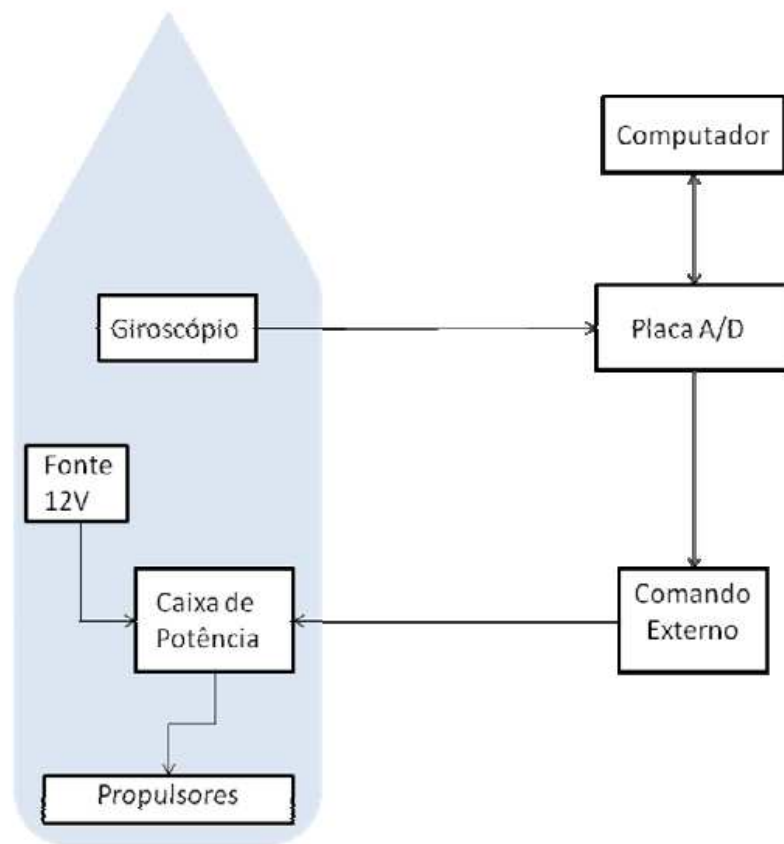


Fig 15 O diagrama do protótipo físico [1]

Nota-se uma intrínseca semelhança entre esse diagrama e aquele que foi apresentado na figura 4, fabricado pela Wesmar.

Os capítulos seguintes discorrem sobre os módulos contidos no diagrama acima que são reutilizados neste trabalho, como a caixa de potência, o giroscópio, a placa A/D e o computador.

3.3) O Módulo de Potência

O controle dos atuadores, representado como “caixa de potência na figura” é constituído por um par de placas de controle e uma de potência para cada motor, além de outros componentes elétricos e eletrônicos, até aqueles que visam a integridade e segurança, como disjuntores [1]. O criador desse módulo de alimentação foi técnico Roberto Romano, do IPT, que o projetou a partir dos dados dos propulsores obtidos nos

testes com água. Na época os componentes foram adquiridos na Rua Santa Ifigênia e imediações pelos integrantes do grupo, e o circuito foi montado pelo técnico.

O princípio de funcionamento da placa lógica é baseado em um controle PWM (Pulse Width Modulation), que recebe uma voltagem de entrada, e chaveia a ponte H da placa de potência em função dela.

O sinal de entrada pode ser controlado de duas formas, por um potenciômetro, no modo de controle manual, ou, idealmente, por um computador, através de uma placa A/D, no modo automático. O modo manual foi elaborado para facilitar a etapa de testes, enquanto o modo automático é aquele que de fato é será usado no controle em tempo real. Primando pela segurança, o PWM não chega a enviar 100% da voltagem de entrada, ele se detém em 90% do seu ciclo por uma questão de lógica interna [1].

Cada atuador é associado a uma bateria de 12 V, esta é a alimentação da placa de potência. Essas baterias, com os atuadores operando 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.

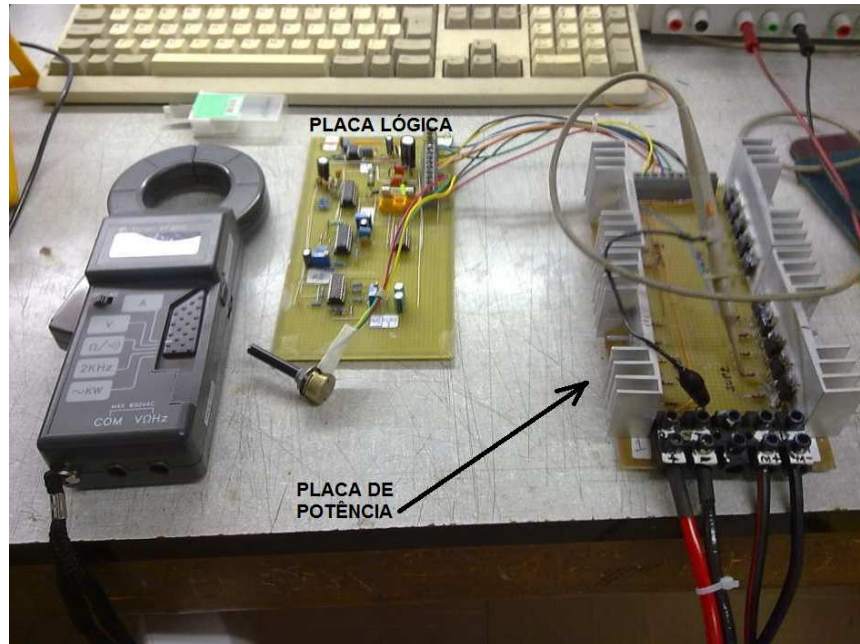


Fig 16 O interior da caixa de potência do SEMA [1] .

3.4) O giroscópio

No que diz respeito aos sensores descritos na figura 15, a equipe usou um baseado em efeitos giroscópios. Estes são aparatos que utilizam princípios de inércia (forças de Coriolis) para medir variações angulares em relação a um determinado referencial. Esse tipo de sensor fornece entretanto a velocidade angular em torno dos eixos especificados, e não a posição angular, algo que é tratado pelo controle [1].

Foi usado o LPY410AL, giroscópio eletrônico produzido pela empresa chamada STMicroelectronics. De acordo com o fabricante [9], o produto tem aplicações diversas, como:

- Sistemas de GPS.
- Rastreamento de movimento.
- Controles de vídeo games.
- Controle de movimento.
- Aplicações industriais robotizadas.

A partir de um dispositivo de sensoriamento composto por uma massa oscilante que reage a variações angulares, o sensor emite sinais analógicos proporcionais a estas variações. A descrição da sua pinagem pode ser encontrada em anexo.

Este dispositivo tem a capacidade de medição de velocidade angular em volta de dois eixos que são determinados em função da sua instalação física no casco do navio, e além disso 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 $10 \text{ mV}/^\circ/\text{s}$. Esta última saída 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 [1].

Para ser usado, o giroscópio deve ser acoplado diretamente ao sistema a ser controlado ou em segundo caso deve ser instalado em uma plataforma de testes. O giroscópio utilizado para os testes obtido a partir da STMicroelectronics já vem instalado de fábrica em um adaptador para sockets DIL24, o STEVAL – MKI085V1, e foi então desta forma utilizado. O circuito de interface entre o adaptador e o sistema de aquisição do SEMA foi também projetado e desenvolvido pelo técnico do IPT Roberto Romano. Por fim o adaptador foi montado em uma placa específica e alimentado por

pilhas que fornecem cerca de 3 V para o circuito. A saída é composta de dois fios, um para cada eixo. Algumas características mecânicas estão apresentados abaixo:

- Amplitude de medição: ± 100 graus/segundo
- Sensibilidade: 10 mV/graus/s

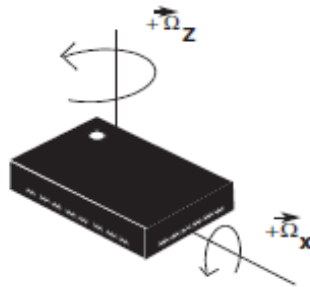


Fig 17 A representação do giroscópio [1].



Fig 18 A caixa de instalação do giroscópio [1]

3.5) A Placa de Aquisição A/D

O modelo USB-4711 fabricado pela Advantech é uma placa de aquisição de dados externa. Ela possui diversas especificações, dentre as quais se podem citar 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 giroscópio LPY410A [1]. Sua interface com o computador se dá a partir de uma porta de comunicação USP 2.0 e está apresentada na figura abaixo:



Fig 19 A placa de aquisição [10].

Analisando o 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 (em anexo). Estes objetos foram utilizados pelo programa MATLAB, desenvolvido pela Mathworks, para se gerar a lógica de controle.

3.6) O computador

O bloco do computador apresentado na figura 15 representa a ferramenta onde é construído o bloco de controle do sistema dinâmico que a embarcação mais motores representa. A placa de aquisição descrita acima envia os dados do giroscópio para serem tratados e analisados. Desta forma, a lógica de controle pode ser escrita em linguagem de alto nível com fácil interpretação, além de também ser modificada a qualquer momento dos testes [1].

Esta escolha foi adotada em detrimento a um controle embarcado diretamente no navio pois este demandaria o desenvolvimento e programação de um microcontrolador, o que por si só não é necessariamente um entrave. Entretanto, um sistema embarcado acarretaria em pouca eficiência nas etapas de testes do SEMA, dado que qualquer correção necessária no controle levaria ao desmonte do microcontrolador, sua reprogramação e sua remontagem. Assim, visto que esta forma de análise não se tornaria produtiva, decidiu-se utilizar o sistema externo localizado no computador [1].

No que diz respeito a forma de tratar os dados recebidos da placa A/D, utilizou-se o ambiente de simulação de sistemas dinâmicos Simulink, uma camada do programa MATLAB. A escolha de tal plataforma é justificada pelo acesso relativamente fácil que

o grupo tem ao software, pela familiaridade, e pelo vasto suporte virtual existentes nas comunidades e fóruns de discussão pela internet.

Todavia o Simulink não opera em modo real, isto é, ele não fornece nenhum bloco de controle em tempo real, o que é a característica dos objetos que fariam a troca de dados com a placa de aquisição. Para sanar esse entrave, foi utilizado 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. Este bloco pode ser encontrado no web site <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/authors/8294>. Nas seções seguintes, que discorrem sobre as etapas de teste, esse tema será retomado.

Tudo apresentando até este ponto é um resumo do que foi elaborado ao longo do projeto do ano anterior, dando enfoque nos pontos que são necessários para explicar a evolução do projeto no presente. O relatório completo da primeira fase está disponível e documentado caso seja desejado esclarecimentos e explicações mais completas. [1]

4) O Projeto Atual do SEMA

Segundo o que foi explicado, o primeiro SEMA se limitou a anular o balanço de embarcações “estáticas”, i.e., que não estão em seguimento. O projeto contínuo do SEMA almeja no momento atual a estabilização “dinâmica”, ou em seguimento, da embarcação. Os termos “estáticos” e “dinâmicos” aparecem entre aspas nesse contexto pois rigorosamente falando uma embarcação nunca está estática quando está aportada, devido a oscilação natural da água. No entanto, no texto em questão, estes termos são excepcionalmente adotados para diferenciar se a embarcação está ou não em seguimento.

Em sua “fase dinâmica”, o SEMA também visa anular o balanço (rotação em torno do eixo X da figura 2), com o diferencial da velocidade de seguimento não nula entre a embarcação e a água.

4.1) A Metodologia, Características e particulares

O projeto atual apresenta desde sua concepção uma série de diferentes fatores limitantes em relação ao anterior, fatores estes que tiveram de ser levados em conta na

etapa de reflexão sobre qual o melhor caminho para atingir os objetivos e metas. Examinando com mais afinco essas diferenças, a primeira que emerge é a verba de amparo fornecida pela FAPESP no passado. Tal patrocínio foi fundamental, dado que os gastos com somente os circuitos e placas de potencia beiram o milhar. Esse suporte financeiro não está presente neste ano.

Outro fator crucial é a ausência de um ambiente de testes devidamente controlado. No passado a equipe dispunha da estrutura instalada no prédio da engenharia naval, entenda-se o tanque de provas, que é capaz de gerar ondas com as diversas características desejadas. Todavia, tal instalação não pode ser usufruída no caso presente devida à necessidade de impor uma velocidade relativa não nula entre o fluído e a embarcação, demanda que vai além da capacidade que essa instalação oferece.

Pode-se dizer que o projeto do SEMA dinâmico anda nos passos do SEMA estático no que diz respeito a formular e simular um modelo teórico, construir um protótipo e comparar os resultados de cada vertente.

Para atingir os objetivos desse projeto frente a entraves com tal natureza, é necessário fazer a melhor reutilização possível dos componentes existentes do projeto anterior. Além disso, deve-se aumentar o cuidado na etapa experimental, visto que elementos danificados por mau uso ou alimentação elétrica imprópria serão dificilmente repostos.

Outra particularidade é os atuadores, que devem ser obviamente substituídos. O uso daqueles demonstrados na figura 13 é impraticável devido ao arrasto que seria gerado na embarcação, além que tal configuração, com um escoamento perpendicular ao eixo do motor, simplesmente é muito distinta daquela para o qual o atuador foi projetado, o que eleva as chances de ocorrência de mau funcionamento destes.

O atuador linear com hidrofólio que o SEMA atual utilizará é encontrado através do nome de *Trim Tab* no mercado e foi comprado no ano anterior como provisão para uma situação futura na qual a disponibilidade financeira não estivesse presente, o que se concretizou.



Fig 20 O par de *trim tabs*

4.2) Os *Trim Tabs*

Trim Tabs são compensadores que são ligados aos bordos de fuga existentes em barcos e até mesmo aviões. Aparelhos como esse têm como função impor um deslocamento rotacional em torno do eixo Y da embarcação ou aeronave (ver figura 2), ou em termos leigos, “abaixar o proa”, se referindo a navios. Isto impõe uma orientação e superfície de controle na embarcação mais próxima da eficiente. Mudanças na velocidade do barco ou a adição de peso geralmente demandam um reajuste na posição dos *tabs*.

Outra vantagem de uma embarcação que tem instalado um *trim tab* é que o timoneiro (aquele que está ao leme) realiza menos trabalho manual para controlar a embarcação com o objetivo impor o caturro necessário [11]. A figura a seguir demonstra o funcionamento previsto para esse produto.

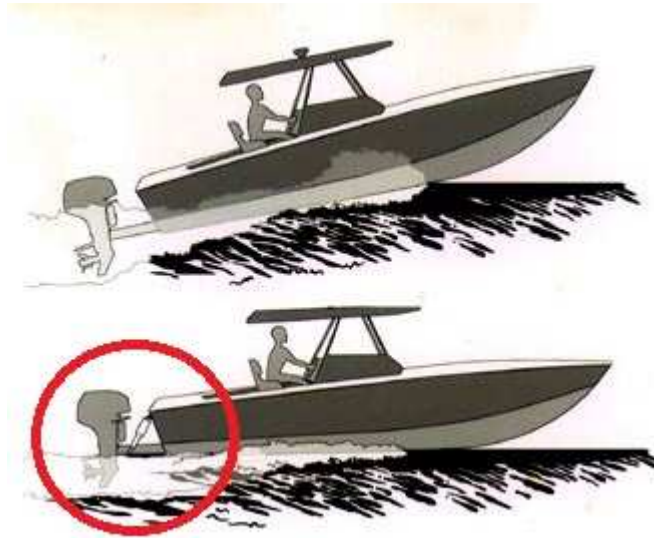


Fig 21 A atuação do Trim Tab [12]

No caso do SEMA esses instrumentos serão usados de forma distinta em relação ao que foram projetados. A ideia é acoplar um par de trim tabs, ou hidrofólios, no espelho de popa da embarcação e controlar de forma assimétrica o comprimento dos atuadores lineares, mudando assim o ângulo entre o hidrofólio e a velocidade de seguimento, com o intuito de impor um binário de forças que geram um momento casco. Um exemplo para o caso simétrico (que gera caturro e não altera o balanço) do que foi descrito aqui é apresentado na sequencia.

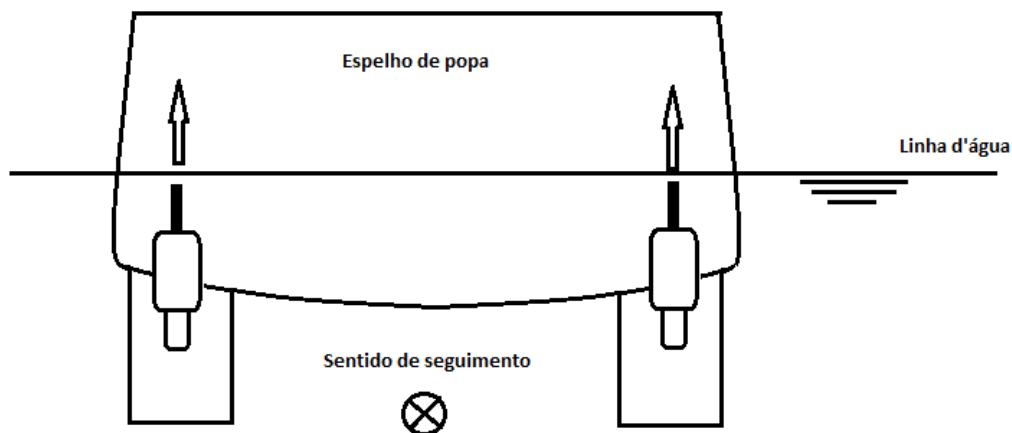


Fig 22 Resultantes geradas pela inclinação do hidrofólio no casco.

No que diz respeito ao ambiente de testes, a opção mais próxima da ideal é a raia olímpica da Cidade Universitária, na qual a embarcação seria rebocada por uma segunda lancha. Como a ondulação da superfície da água nesse caso é aproximadamente estável e nula, é levantado o paradigma de submeter o barco a uma oscilação controlada (como um motor ligado e desbalanceado anexado ao convés) e inverter o papel que a água tem no problema: antes o fluido causava a instabilidade na embarcação e dessa forma ele seria usado para estabilizá-la.

É importante notar ainda que o cerne do bloco de controle utilizado no passado, baseado em um efeito liga-desliga, deve ser modificado devido à natureza dos atuadores, que possuem posições contínuas em função da tensão de alimentação.

Até o momento muito foi descrito a respeito das diferenças, mas existem algumas similaridades que o SEMA dinâmico apresenta em relação ao estático. Não somente os instrumentos, baterias, sensores e embarcação podem ser aproveitados como também serão parte dos dados obtidos nos ensaios numéricos, o que facilitam o desenvolvimento da malha de controle no MATLAB.

4.3) A Construção do Projeto

Uma etapa de habituação com o projeto anterior foi necessária desde o primeiro dia. Como se pode notar, ambos os projetos são homólogos e é importante, se não mandatório, conhecer a fundo um trabalho para melhor construir o outro. Após o estudo da documentação deixada registrada pela equipe do ano anterior, foi definida a primeira exigência do SEMA dinâmico. Era necessário modelar o sistema físico completo (cujos blocos principais são função atuador e planta do modelo) adicionalmente à malha de controle, ambos no MATLAB, com o intuito de obter resultados comparáveis com os ensaios empíricos. Tal tarefa exigia o conhecimento da equação que relaciona o *lift* com:

- A área do hidrofólio.
- O ângulo do hidrofólio em relação à velocidade de escoamento.
- O próprio valor da velocidade de seguimento.

Esses três itens parametrizam o valor da sustentação resultante no casco, mas conhecer a forma precisa dessa equação é algo pouco trivial.

O primeiro passo na busca por uma equação ou dados catalogados (tabelas ou gráficos obtidos empiricamente) que fornecessem a correlação entre a sustentação e esses parâmetros mencionados se deu nas literaturas utilizadas nos cursos de mecânica dos fluídos existentes no acervo da faculdade. Esse caminho foi tomado devido à familiaridade que o aluno integrante da equipe tinha com essas literaturas, familiaridade oriunda do curso de mecânica dos fluidos ministrados ao longo da grade curricular da engenharia mecatrônica.

O grupo selecionou dois livros a observar, dentre os quais “Fundamentos da mecânica dos fluídos” (Munson, Young & Okiishi). Desse estudo foi interessante notar que de forma geral todas as literaturas propõem três caminhos no que diz respeito a obter dados hidrodinâmicos de um corpo: simulação numérica, análise de modelo e a terceira opção, limitada a casos de geometria simples, análise teórica.

No projeto do SEMA atual nenhum dos três caminhos pode ser seguido como iniciativa do grupo. Primeiramente, um simulador de escoamento baseado em métodos numéricos não está disponível para a equipe. Pode-se tomar como exemplo para tal simulador o Ansys Fluid dynamics, software que faz parte do pacote Ansoft e que requer uma licença custosa e treinamento especial para ser utilizado, já que seu manuseio não é trivial. Segundamente, pois não existe a possibilidade de recriar e ensaiar um modelo real do casco (seja em escala reduzida seja usando o próprio protótipo) e dos Trim Tabs devido a algumas limitações correlacionadas entre si, a saber, a falta de instrumentação de medição, infraestrutura apropriada e verba. E terceiramente, o caso em questão, i.e. um Trim Tab em escoamento totalmente submerso, não é um de simetria simples o suficiente para poder encontrar-se um desenvolvimento teórico da hidrodinâmica do hidrofólio nessas literaturas. É verdade que aproximações podem ser feitas, como por exemplo uma placa plana totalmente imersa em um escoamento, mas se o critério é fidelidade ao caso real, então uma teoria potente o suficiente para explicitar a situação simplesmente não pode ser desenvolvida.

A equipe então se voltou em direção a outras fontes de pesquisa. Inicialmente a busca se deu nos lugares que tipicamente recebem as primeiras tentativas em situações semelhantes, que são a biblioteca da engenharia mecânica e em ferramentas de pesquisa da internet. Não foi possível encontrar nos livros, artigos e sites averiguados a

informação almejada, no lugar encontra-se em abundância material intelectual a respeito de hidrofólios e aerofólios totalmente imersos.

Surgiu então a ideia de entrar em contato diretamente com as empresas fabricantes dos hidrofólios, na esperança de que elas por sua vez tenham obtido a informação almejada pelo grupo ao longo do desenvolvimento do seu produto. As empresas contatadas foram a LECTROTAB e BENNETT MARINE, ambas estadunidenses e líderes no seguimento de Trim Tabs. A título de registro, a mensagem que foi enviada às empresas pode ser encontrada em anexo. Após alguns dias de espera a equipe não recebeu retorno algum dessas fabricantes, seja ele positivo ou negativo.

A abordagem mudou após esse ponto no que diz respeito a objeto de busca. Foi levantada a hipótese de que o caso em questão, um hidrofólio anexado ao espelho de popa de uma embarcação, pudesse ser aproximado por um mancal de deslizamento axial hidrodinâmico. Tal aproximação foi feita na esperança de que a abordagem teórica, se existente, pudesse servir de base para o projeto. Voltou-se então à primeira etapa de buscas na biblioteca do prédio e em ferramentas de pesquisa, e o caso mais significativo encontrado foi o artigo acadêmico “Análise do Comportamento Operacional de Mancais Axiais Hidrodinâmicos de Sapatas Setoriais Pivotadas” [2]. O artigo tem sua teoria embasada na ilustração a seguir:

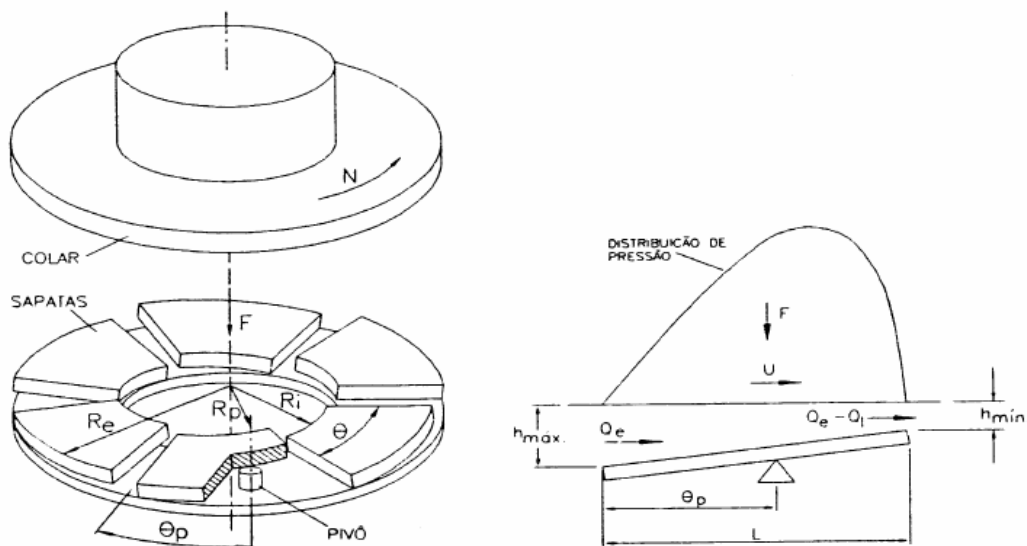


Fig 23 Caso dedicado ao estudo pelos autores de [2]

Após o exame deste trabalho, infelizmente foi inferido que não se podiam trazer as conclusões obtidas pelos autores para o caso do SEMA. Como justificativa principal tem-se o fato que a espessura entre as sapatas e o colar, h_{max} e h_{min} na figura acima, são pequenas e passíveis de serem determinadas. Esse ponto é muito distinto do SEMA, nos quais essas entidades assumem valores demasiado elevados em relação ao caso deste mancal de deslizamento axial, portanto a equipe não obteve frutos dessa pesquisa.

O próximo passo do grupo foi entrar em contato com os professores especializados no assunto do departamento de engenharia naval, dos quais foram consultados o Prof. Dr. Hernani e o Prof. Dr. Andrade. Após serem instruídos na problemática em questão, as orientações e recomendações que a equipe recebeu deles foram três. A primeira foi buscar a relação que o grupo necessitava no CD de compilação “Small Craft Papers” (de SNAME papers, 1985-2002, compilado por Michael F. De Lorme) que contém aproximadamente 300 artigos referentes a embarcações de pequeno porte e que pode ser encontrado na biblioteca do prédio. A segunda foi buscar por um aerofólio próximo o suficiente do caso do SEMA na seção de catálogo do livro “Theory of Wing Sections” (de L.H. Abbott). E a terceira foi aproximar o Trim Tab do SEMA seja por uma placa plana em escoamento submerso seja pelo caso de variação da quantidade de movimento exemplificado a seguir:

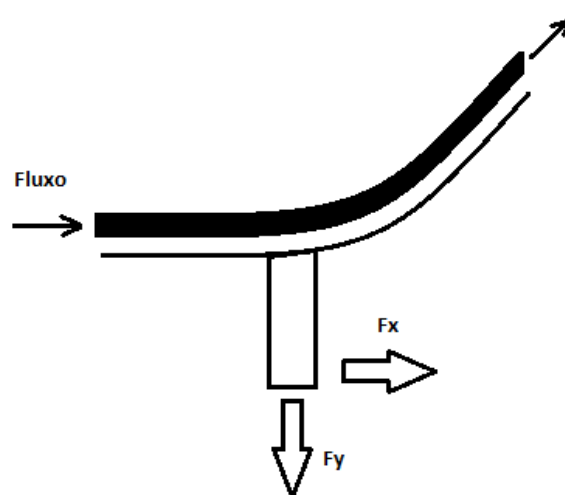


Fig 24 As forças geradas pela variação da quantidade de movimento do fluxo

Para o caso da figura acima, que se afasta do SEMA no sentido de ser um escoamento externo, a teoria encontra a seguinte relação:

$$\Delta_F = \rho S V^2 \sin \delta \quad (1)$$

Onde:

- Δ_F é o incremento de lift.
- ρ é a densidade do fluido.
- S é a seção de área do jato do fluido.
- V é a velocidade de entrada do fluido.
- δ é a deflexão do flap, em graus.

Na literatura indicada pelos orientadores da engenharia naval, “Theory of Wing Sections”, a equipe pode encontrar catálogos empiricamente tabelados de perfis NACA dentre os quais o NACA 66-006, NACA 65-006 e NACA 0006 poderiam ser usados como base de equivalência em relação ao hidrofólio do SEMA devido à baixa espessura do fólio em relação ao seu comprimento de corda, a espessura mede 6% do tamanho da corda em todos os perfis mencionados.

No entanto, diferentemente do que foi relatado até então, a equipe pode encontrar no acervo de compilação recomendado pelos professores a equação a ser aplicada pelo SEMA. O artigo acadêmico “Procedures for hydrodynamic evaluation of planing hulls in smooth and rough water” (Savitsky & Brown-Marine Technology, 1976) apresenta uma relação entre os parâmetros de entrada e a sustentação:

$$\Delta_F = 0.046 L_F \delta \sigma b \left[\frac{\rho}{2} V^2 \right] \quad (2)$$

Onde:

- Δ_F é o incremento de lift, em libra-força.
- L_F é a corda do flap, em pés.
- δ é a deflexão do flap, em graus.
- σ é a razão largura por comprimento do flap.
- b é o comprimento longitudinal da superfície de planagem, em pés.
- ρ é a densidade do fluido.

- V é a velocidade da embarcação, em fps.

Portanto a equipe possui essas duas equações a serem testadas e comparadas.

4.4) A Malha de Controle da Planta

Após encontrar essas equações, passou-se a refletir a respeito da malha de controle. A hipótese para a malha do bloco de controle pode ser encontrada na sequência (referente ao controle do caso empírico), onde o bloco de threshold responsável pela característica de liga-desliga do SEMA estático (Fig 14) foi substituído por um bloco de ganho e um de saturação.

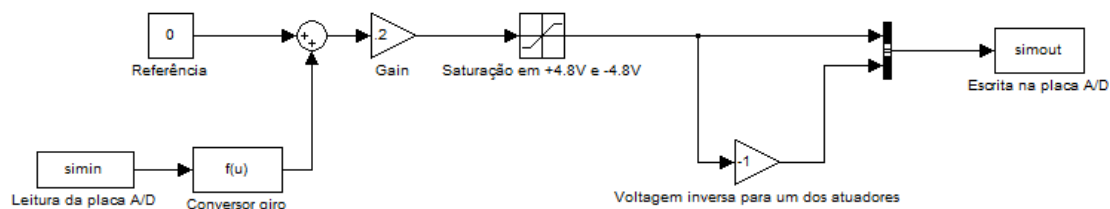


Fig 25 Bloco de controle do caso empírico a ser testado

No entanto essa malha proposta deve ser alterada, devido à natureza do atuador do trim tab. Este é um motor linear elétrico que é regido pelos mesmos princípios de um motor elétrico comum, que oferece uma velocidade em função da carga e corrente imposta nele. O ideal para o caso do SEMA é um atuador linear que atinja uma posição de referência imposta pelo bloco de controle, portanto é necessário finalmente desenvolver dois blocos de controle: o controle da planta, que tem como sinal de referência o valor nulo, e o controle de posição do motor, que tem como referência o sinal que ele recebe do controle de planta.

4.5) A Malha de Controle de Posição

Nesta seção discorre-se sobre os testes realizados a fim de criar uma malha de controle de posição para o SEMA. Foi usado um atuador disponível desde períodos anteriores ao início desse projeto, anulando assim o custo em adquirir um novo. Ele funciona através da rotação de um motor circular DC que transmite sua carga

linearmente através de uma transmissão parafuso/rosca sem fim. O atuador linear age portanto da mesma forma que um motor elétrico que tem sua velocidade determinada pelos parâmetros do sistema dinâmico que ele faz parte, como a carga imposta e a corrente.



Fig 26 O LAM3-3-1-200-12B da HIWIN.

O atuador usado no trabalho foi o modelo LAM3-3-1-200-12B fabricado pela empresa HIWIN. Esses valores são as especificações do produto, que indica que ele tem um alcance de 200 mm, é alimentado por uma bateria de 12V, é da cor negra, e é equipado com limitadores de curso internos.

O gráfico a seguir, retirado diretamente do catálogo de produto da empresa, demonstra a velocidade do motor em função da carga:

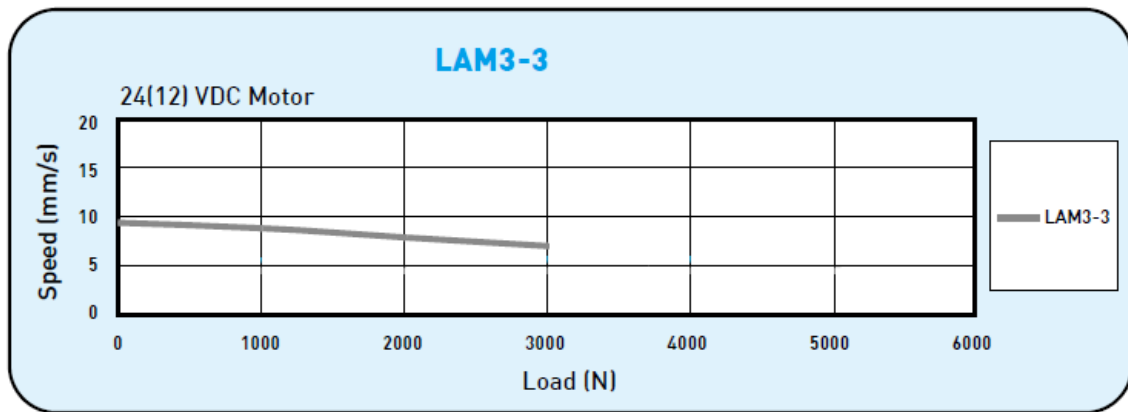


Fig 27 Velocidade em função da carga do motor [13]

O atuador tem portanto velocidade máxima de aproximadamente 10mm/s. A fim de elaborar seu controle, foi utilizado uma placa composta de sensores do tipo relê “reed”, que são acionados magneticamente. Esse material também estava disponível previamente, e foi feito sobre encomenda pela empresa LDE-Soluções em Eletrônica.

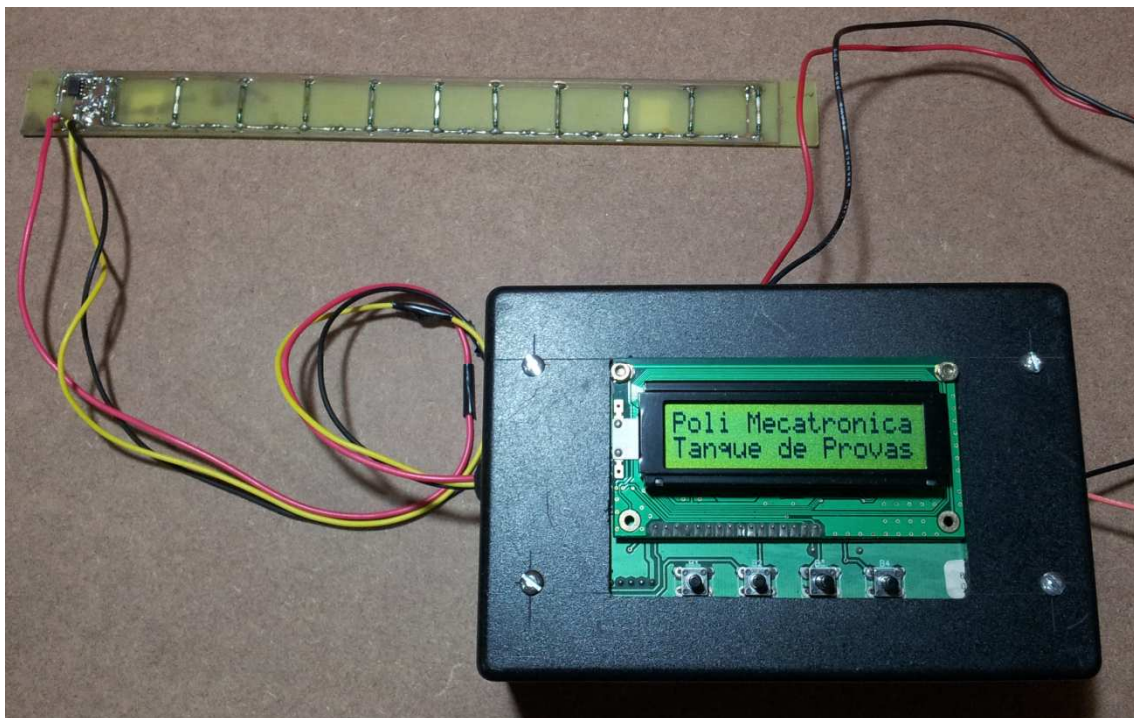


Fig 28 A placa de sensor de posição linear e sua interface

Este sensor funciona da seguinte maneira, a interface interpreta e demonstra ao usuário qual é o “reed” que está ativado. O sensor, que é alimentado por uma bateria de 9V, e impõe um sinal entre 0.25 a 3V em seus cabos de saída em função do “reed”

acionado. Detalhes sobre o diagrama eletrônico e instruções de utilização dessa placa podem ser encontradas no anexo. A figura a seguir demonstra o sensor funcionando quando o seu segundo relê ativado (SW2 na IHM):

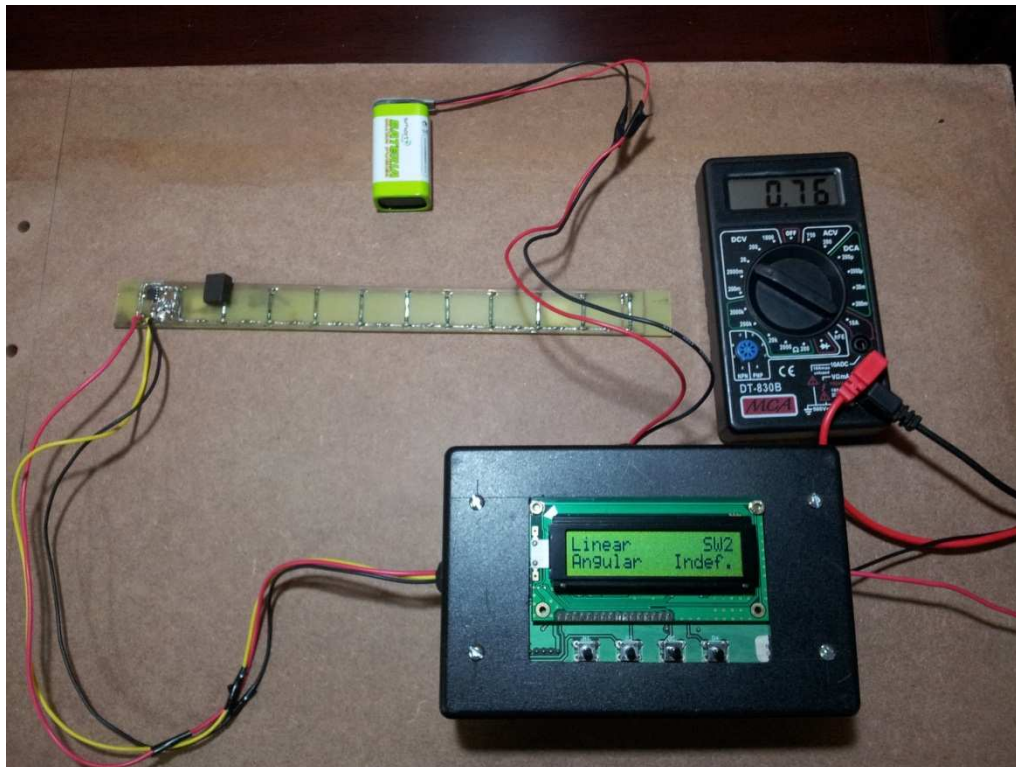


Fig 29 Exemplo de funcionamento do sensor

Nota-se no visor uma indicação “indefinida” de um sensor angular. Isso se dá pois essa placa também possui um sensor angular de posição construída de forma similar à placa linear, i.e., baseada em “reeds”, que não é aplicável para o teste em questão.

Esses componentes foram então agrupados e fixados em uma única prancheta de madeira que serviu de bancada de testes. Todos os componentes usados para anexar estes dois componentes (atuador e conjunto de sensor) na prancheta foram adquiridos na Rua Santa Efigênia e arredores. No que diz respeito ao ambiente e ferramentas usadas nessa etapa de construção e fixação, a oficina do prédio da engenharia mecânica foi utilizada.



Fig 30 Prancheta de testes

O atuador é dirigido pelo mesmo módulo de potência que foi descrito nas seções anteriores, que possui um modo manual e automático. No detalhe da figura a seguir, o circuito de potência se encontra dentro da caixa de cor branca, e o seu controle remoto ao lado da bateria de alimentação.



Fig 31 A alimentação, o módulo de potência e o controle remoto



Fig 32 As funções do controle remoto para dirigir o módulo de potência

Após a etapa de testes do modo manual com o intuito de comprovar a instalação e posicionamento correto do atuador e do módulo, o que se fez foi criar a conexão do sensor com a placa de aquisição A/D da *Advantech*.



Fig 33 A conexão entre o sensor de posição e a placa de aquisição A/D

Esta placa se comunica com o computador de forma semelhante ao caso com o giroscópio, e sua função é possibilitar a leitura da tensão enviada do sensor diretamente no Simulink, ambiente de simulação de sistemas dinâmicos que foi modificado para operar em tempo real, como foi previamente explicado.

Após configurar os parâmetros necessários para essa tarefa no Simulink, desejou-se verificar se os valores coletados referentes à posição estavam sendo recebidos corretamente. Para comprovar, foi elaborado o seguinte bloco:

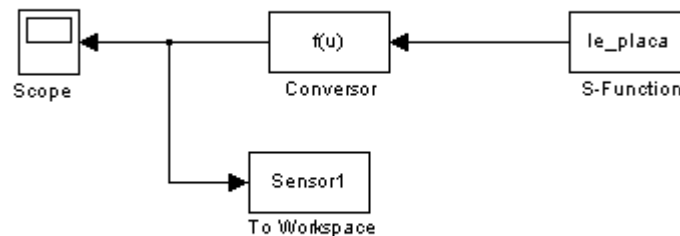


Fig 34 Diagrama para aquisição do sinal do sensor no Simulink

Entendendo o que cada elemento faz, o bloco “le_placa” são blocos associados a scripts (contidos em anexo) que utilizam os objetos enviados da placa de aquisição A/D e que possibilitam sua manipulação no Simulink. O bloco f(u) é um conversor, que recebe o valor em volts e retorna o valor da posição correspondente em relação ao início do curso do atuador linear. Dado que o início do ciclo é exatamente sobre o primeiro “reed” da placa de relês, que existe um “reed” a cada 20 mm, que a tensão de saída com o primeiro “reed” está ativo é 0.5V e que há um incremento de tensão de 0.25V de um “reed” consecutivo a outro, a função f(u) é:

$$f(u) = \frac{(u(1) - 0.50) * 20}{0.25} \quad (3)$$

tal que u(1) é a entrada 1 do bloco (equivalente à saída de “le_placa”).

Os blocos restantes são responsáveis pela aquisição da saída dessa função em relação ao tempo.

O resultado dessa simulação com o motor operando em modo manual na velocidade máxima permitida pelo modulo de controle (menos que 12V, por segurança) do começo ao fim de curso do atuador linear fornece o seguinte gráfico.

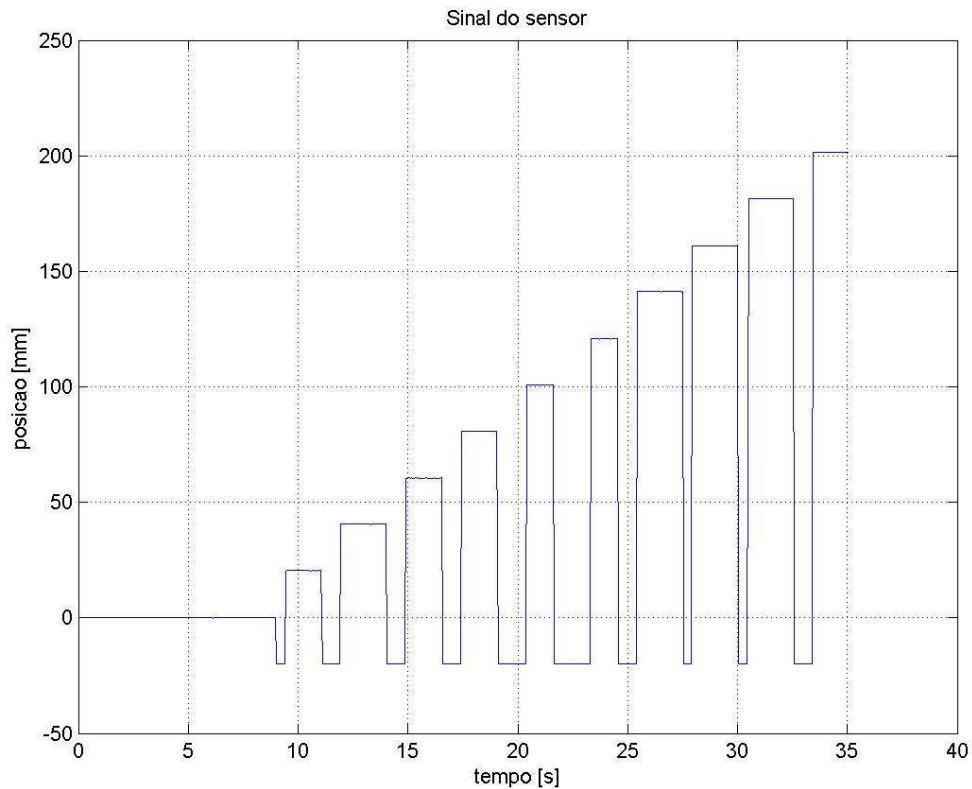


Fig 35 Leitura do sensor no computador

Desse gráfico nota-se que quando o atuador está nos espaços intermediários aos relês, o sensor envia o sinal indefinido (“Indef.” na IHM). Adicionalmente, a placa de sensor foi construída de forma a enviar 0.25V quando se encontra nesse estado. E devido ao “offset” que foi inserido na tensão do primeiro “reed” no bloco de f(u), quando o atuador está nos espaços intermediários aos relês, tem-se essa posição negativa, errônea infiel à posição do atuador, que dura até que ocorra uma nova leitura verdadeira por parte dos relês restantes.

Tem-se então uma limitação ao sensor de caráter de hardware. Alguns dias foram investidos tentando corrigir esse problema através da malha de controle, através de blocos do tipo S-function com memória. De forma simples, blocos desse tipo tem a capacidade de não somente guardar um valor do passado como também fornecer as instruções necessárias para criar um bloco no diagrama que realiza um script com a

entrada e devolve a resposta na saída. A ideia era introduzir um bloco na saída de $f(u)$ que armazenasse o ultimo instante no passo de simulação e compará-lo com o valor atual. Um filtro que diz respeito ao sinal dos estados atual e anteriores seria aplicado, e no caso de um sinal atual negativo, o sinal anterior substituiria o sinal do atual. O resultado seria um gráfico em formato de escada. No entanto, tal solução não pode ser implementada devido à incompatibilidade de funções em S-functions que tem memória em uma simulação em tempo real.

No entanto, isso não impediu o controle de posição do motor em relação a uma entrada do tipo degrau.

Fazendo uso então dos blocos da figura 35, tem-se a seguinte malha.

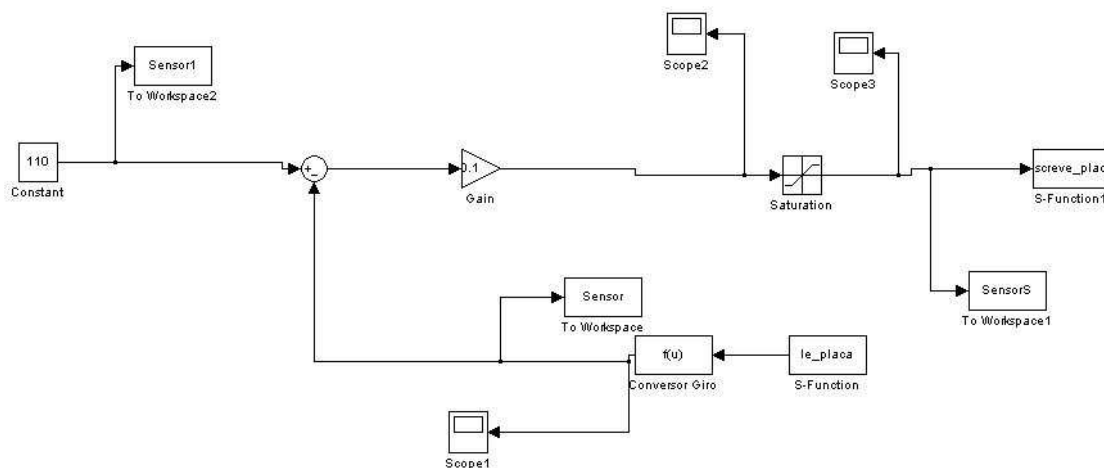


Fig 36 Malha de controle de posição do robô

Percebem-se então os blocos que leem a tensão no sensor de posição, em sua saída o bloco que o converte o valor em milímetros. Isso é somado negativamente ao valor de referência, escolhido nesse caso como sendo arbitrariamente 110mm, o erro é então multiplicado pelo controle do tipo proporcional, cuja saída é limitada por uma saturação entre 4.5 e -4.5V.

A resposta para essa simulação é a seguinte.

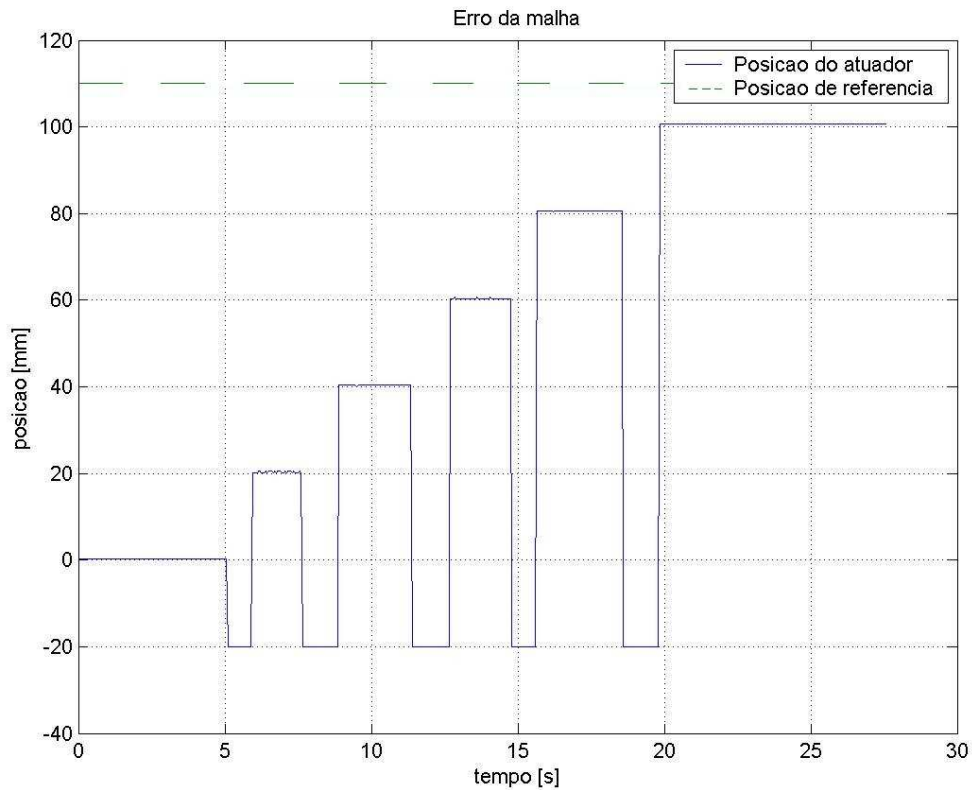


Fig 37 Resposta para uma entrada degrau

Nota-se que existe uma diferença de 10mm após o sistema atingir o regime permanente. Isso se deve ao fato de que existe uma faixa de banda morta envolta do 0V na saída da caixa de potência. Isso pode ser explicado devido ao fato que é necessária uma tensão não desprezível acima ou abaixo de zero para que os componentes mecânicos possam romper sua inercia inicial. Outros valores foram testados arbitrariamente e o mesmo resultado foi atingido.

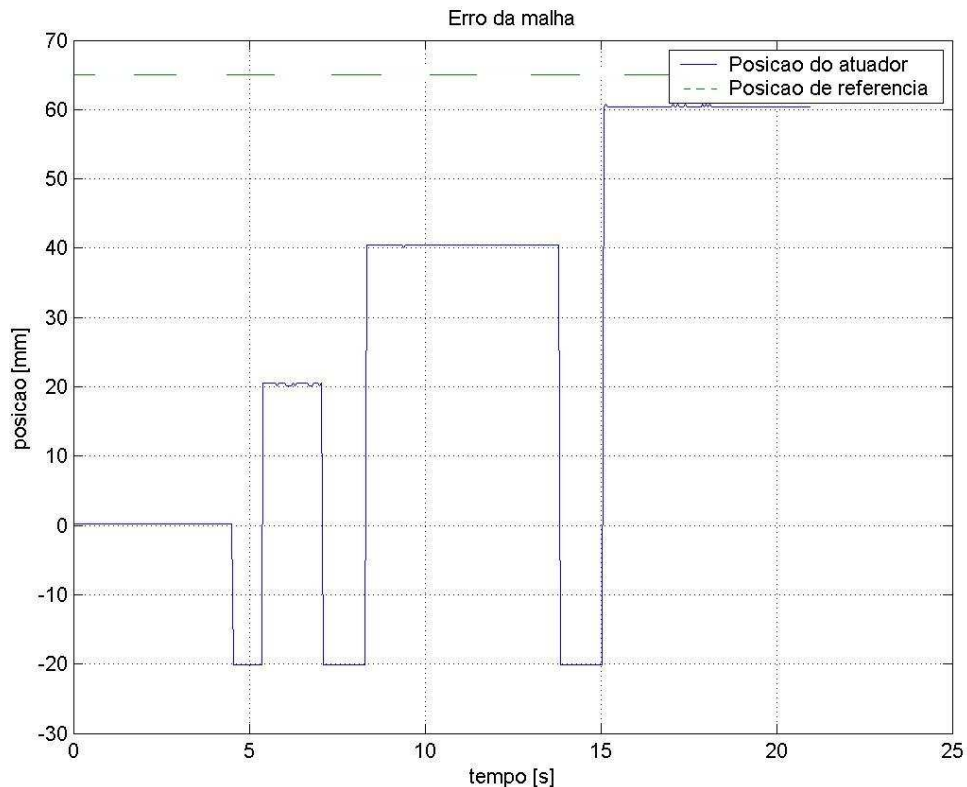


Fig 38 Controle de posição aos 65mm

5) Conclusão e Passos Futuros

As conclusões mais marcantes que podem ser retiradas do trabalho descrito nesse texto são, primeiramente, a dificuldade em encontrar resultados teóricos em literaturas especializadas a respeito de hidrofólios parcialmente submersos como o do caso em questão. A predominância daqueles totalmente imersos, sejam hidrofólios ou aerofólios, pode ser provavelmente atribuída à presença cotidiana de aviões na sociedade moderna.

No que diz respeito ao controle de posição do motor linear, algumas limitações e entraves solidários aos equipamentos de trabalho, que são o sensor de posição e o atuador linear, surgiram ao longo das experimentações. Apesar disso, a conclusão deste teste é que os equipamentos de controle e potência usados no ano anterior podem ser usados também para o controle linear, o que é uma constatação importante já que dispensa a aquisição de módulos adicionais, caso seja dada continuidade ao tema. O principal responsável por essa versatilidade é o MATLAB, que possibilita um grau de detalhamento profundo, devido à sua vasta biblioteca de blocos de função. Todavia, um detalhe deve ser mencionado, que é a incompatibilidade de alguns blocos (como os do

tipo S-functions) com o modo de simulação em tempo real, o que pode obrigar o usuário a buscar soluções alternativas.

A descrição dos próximos passos se constitui em melhorar a gestão do sinal proveniente do sensor de posição do atuador. Apesar de ele fornecer diretamente somente 11 posições dentro de 200 milímetros, que resulta na tolerância mínima de 20mm positivos ou negativos, a forma de lidar com blocos S-function de memória em tempo real deve ser explorada. Isso não aumentaria a precisão, mas traria vantagens como movimento relativamente mais uniforme. Outro caminho a ser seguido é fazer uso das equações pesquisadas para modelar o sistema como um todo no Simulink ,conjuntamente com essa malha de controle de posição do atuador, a fim de obter resultados teóricos. A continuação seria acoplar os atuadores lineares no espelho de popa da embarcação, adaptar a rede de instalação e alimentação dos sensores e atuadores, e testar uma possibilidade de malha de controle, como a sugerida na figura 25 na embarcação em seguimento.

Apesar de não concluído ainda, o projeto do SEMA pode avançar alguns passos com os principais resultados desse trabalho, que são a pesquisa das equações para o ensaio teórico, e o controle de posição do atuador linear.

6) Referências Bibliográficas

[1]- SISTEMA DE ESTABILIZAÇÃO MULTI-ATIVA PARA EMBARCAÇÕES – SEMA (Fovitzky,B. R.; Andrade, L. G.; Milani, R. C.; São Paulo 2010)

[2]-Análise do Comportamento Operacional de Mancais Axiais Hidrodinâmicos de Sapatas Setoriais Pivotadas (Galvão,M.M; Schwarz ,V.A.;Chiarello, A.G.).

[3]- <http://epocanegocios.globo.com/Revista/Common/0,,EMI272997-18055,00-MERCADO+NAUTICO+BRASILEIRO+VAI+MUITO+BEM+OBRIGADO.html>
Acessado em 24/11/2011

[4]- <http://economia.estadao.com.br/noticias/economia,china-quer-o-mercado-nautico-brasileiro,82287,0.htm> Acessado em 24/11/2011

[5]- <http://www.boatshow.com.br/> Acessado em 25/11/2011

[6]-Catálogo WESMAR-“Three powerful new active stabilization systems”; disponível em http://www.wesmar.com/pdf/Stabilizers/dsp4800_newcontrols_web.pdf
Acessado em 25/11/2011

[7]-Catálogo GYROFIN Stabilizers; Disponível em <http://www.sperrymarine.northropgrumman.com/CustomPages/BrochureDownloads/Downloads/33/Product%20Brochure.PDF> ; Acessado em 25/11/2011

[8]- <http://www.nauticexpo.com/prod/seakeeper/stabilizers-for-ship-29412-200801.html> ; Acessado em 26/11/2011

[9]- Catálogo giroscópio LPY410AL; Disponível em http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/CD00254136.pdf ; Acessado em 27/11/2011

[10]-Catálogo placa de aquisição USB-4711; http://www.neteon.net/data/pdf/Neteon_P444_USB-4711A.pdf ; acessado em 27/11/2011

[11]-Catálogo ABNT “Oscilações de embarcações”; JUN./1990; CDU: 629.12:532.59:001.4

[12]- <http://gulffishing.com/trimtabs.html> ; Acessado em 27/11/2011

[13]-Catálogo série LAM da HIWIN; Disponível em <http://www.hiwin.com/html/la/lam1.html>

7) Anexos

A) Mensagem eletrônica enviada às fabricantes de Trim Tabs:

From: marcusvi@usp.br

To: sales@lectrotab.com , info@BennettTrimTabs.com

Greetings,

Please allow me to introduce myself, my name is Marcus de Melo, a senior in mechatronics engineering from the Polytechnic School of São Paulo-Brazil, and i'm writing you this message regarding your line of trim tab products.

I reckon the main point of this email would be easier to understand if firstly i was to briefly lay my position to you, and such is that i find myself working on a graduation project in the line of vessel stabilization. In sort terms, this project's goal is to develop an automatic stabilization control to reduce the heeling effect acting on the vessel due its interaction with the water. (a demonstration of the state of the project so far can be seen here: <http://youtu.be/IENSutR2NXw>)

The next step is to ensure the dynamic stabilization of a vessel, and for that we decided to utilize a pair of trim tabs to be the main actors of the automatic control. However we find ourselves in a uncomfortable point where it's fundamental to understand the reactions this pair causes on the hull (as a function of the trim tab's angle and boat speed), in order to properly model the automatic control, but unfortunately we don't have the necessary means to obtain this information.

That being said, the reason i contact you is to ask if during your product's development you manage to acquire this information, and with risk of imposing, if by any chance there might be a way you can kindly provide these values (the tab's reaction on the hull as a function of the tab's angle and boat speed).

Of course, from my part and the rest of my team, i can assure utter credit to your contribution and also guarantee any information would be used for educational purposes only.

Whichever your position might be, i'm already very thankful for your concern.

Marcus de Melo

B) O datasheet da placa de aquisição

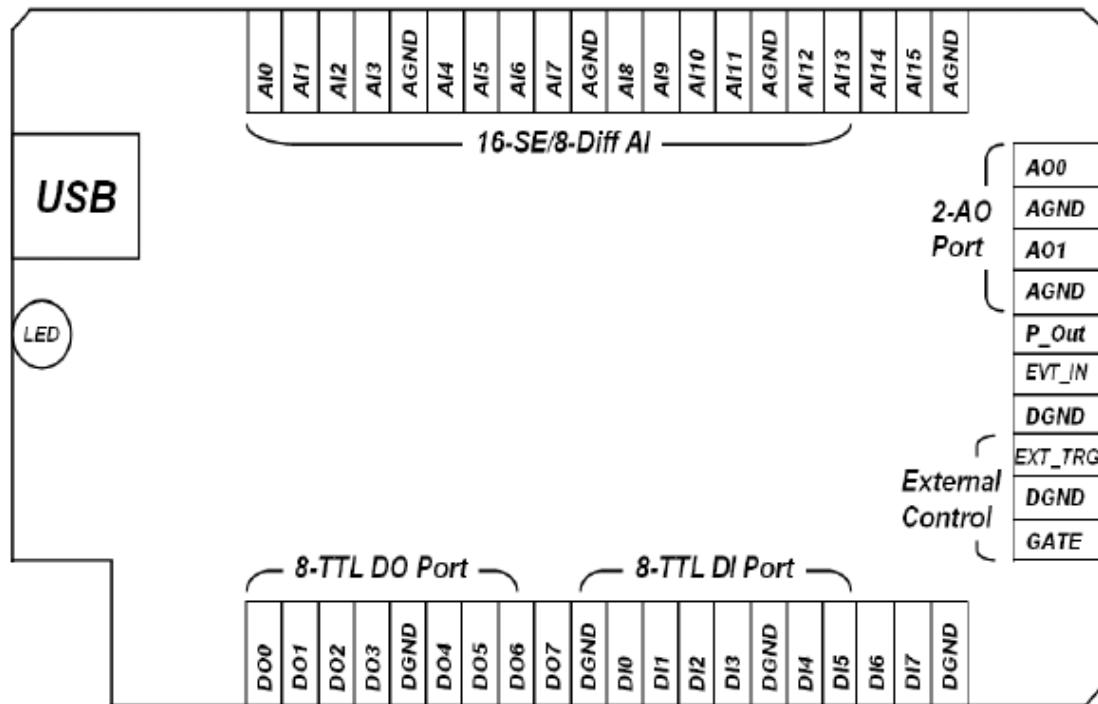


Fig 39 A placa A/D

C) Códigos dos arquivos em MATLAB , S-functions, que fazem uso dos objetos recebidos a partir da placa de aquisição

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

```

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
```

D) Detalhes e Tecnicalidades do Sensor de Posição

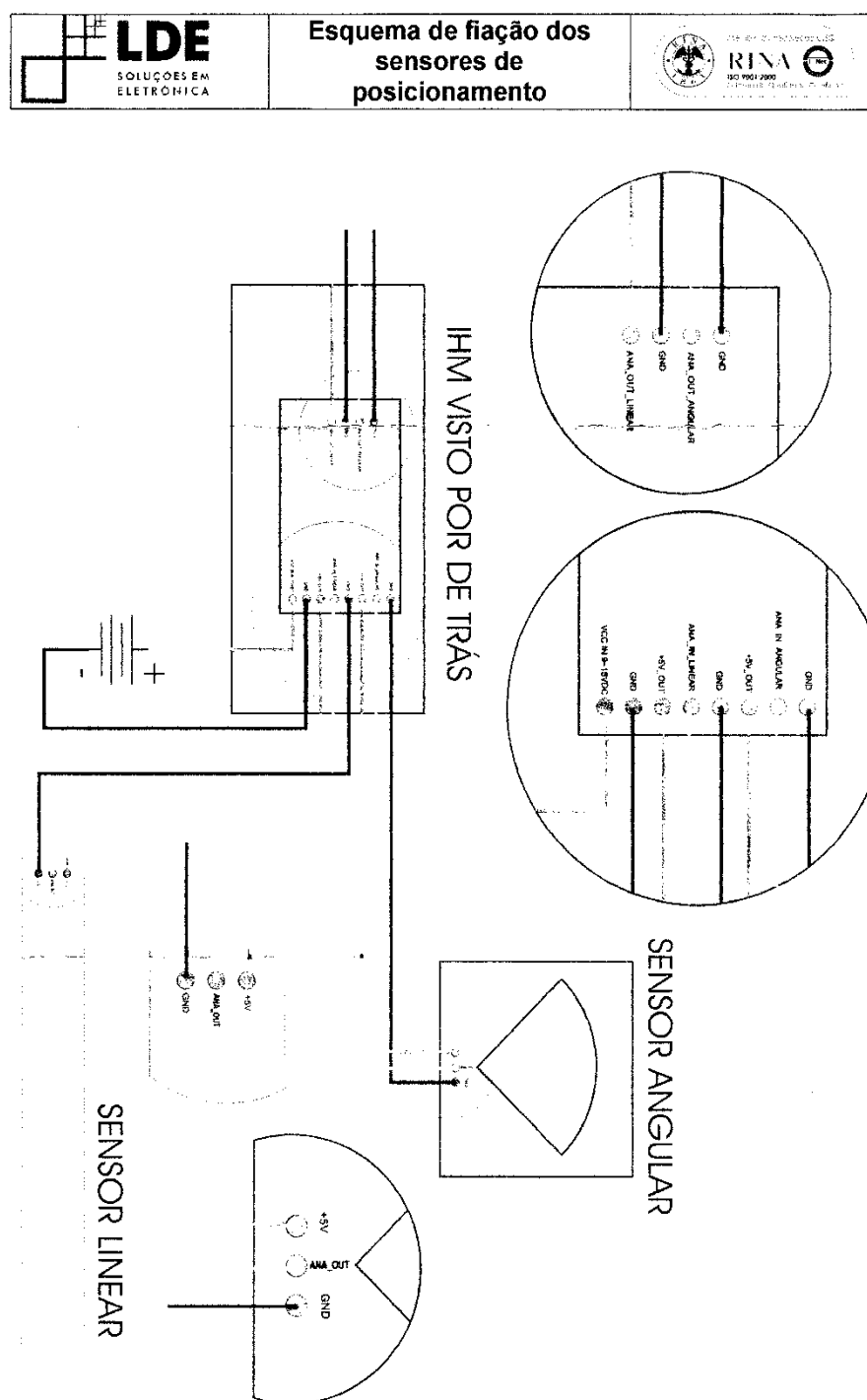


Fig 40 Designação de fios do sensor



Sensor linear:

Esta placa contém 11 sensores do tipo “reed”, acionados via campo magnético, onde cada sensor identificará a posição linear do atuador.

Sensor Angular:

Esta placa contém 10 sensores do tipo “reed”, acionados via campo magnético, onde cada sensor identificará a posição angular do atuador.

IHM:

Interface onde se interpreta a posição dos atuadores e converte em níveis de tensão de 0 à 3.25 volts com resolução de 0.25 volts. Sinaliza também problemas de conexão IHM – Placa Sensor são elas: posição indefinida (nenhum sensor “reed” acionado) , curto circuito ou rompimento dos cabos.

Os níveis de tensão e avisos que são mostrados no display, são mostrados na tabela abaixo:

Posição	Mensagem	Nível CC
1° posição -----	SW1-----	0.50 V
2° posição -----	SW2-----	0.75 V
3° posição -----	SW3-----	1.00 V
4° posição -----	SW4-----	1.25 V
5° posição -----	SW5-----	1.50 V
6° posição -----	SW6-----	1.75 V
7° posição -----	SW7-----	2.00 V
8° posição -----	SW8-----	2.25 V
9° posição -----	SW9-----	2.50 V
10° posição -----	SW10-----	2.75 V
11° posição -----	SW12-----	3.00 V
Posição Indefinida -----	Indef. -----	0.25 V
Curto entr. Analógica + gnd -----	Crt. GND -----	0.00 V
Curto entr. Analógica + 5V -----	Crt. VCC -----	> 3.5 V
Entr. Analógica aberta -----	Aberto -----	3.25 V

Fig 41 Tensão em casa leitura do sensor