

MODELAGEM E CONTROLE DE UM BARCO AUTÔNOMO

André P. D. Araújo, Rafael V. Aroca e Luiz M. G. Gonçalves

Universidade Federal do Rio Grande do Norte
DCA-CT, Campus Universitário, 59.072-970, Natal, Brasil.
{andrepda,lmarcos}@dca.ufrn.br, rafaelaroca@ieee.org

Resumo - Com o avanço da tecnologia e a evolução da humanidade, constatou-se a necessidade da criação de robôs autônomos para afazeres de extrema utilidade na atualidade. No oceano, mais especificamente, há interesses no desenvolvimento de barcos autônomos para aplicações em setores acadêmicos, monitoramento ambiental e militar. O artigo em questão foi baseado a partir de um Projeto de Iniciação Científica de um barco autônomo que é controlado por um sistema de controle do tipo PID e um controlador de Lógica Fuzzy. Tal barco é composto por sensores e atuadores que o ajudam na sua navegabilidade em relação à orientação do leme e vela, lembrando que o ele terá a sua propulsão a vela, com isto terá sua locomoção impulsionada pela força do vento. Ressalta-se a implementação dos controladores de malha aberta e malha fechada na ferramenta Matlab que, depois de testados via software, foi embarcado dentro do hardware Arduino. Foram inseridos ainda, softwares e hardwares no projeto com intuito de auxiliar a arquitetura final. A metodologia utilizada foi a pesquisa bibliográfica, documental, observação in loco, a melhoria da parte estrutural do barco autônomo e aplicação de sistemas de controle.

Palavras-Chave: Barco Autônomo, Sistemas de Controle, Inteligência Artificial, Arduino.

I. INTRODUÇÃO

No cenário contemporâneo atual tem-se a necessidade de criação de robôs autônomos para nos auxiliar em diversas atividades sejam elas das mais simples às mais complexas. Tendo isso como base nós tivemos a ideia de projetar um barco autônomo munido de equipamentos do tipo sensores e atuadores com intuito de navegar sozinho. Até o exato momento foi desenvolvido um sistema de controle no software Matlab e um controlador Fuzzy onde será a Inteligência Artificial para poder controlar a velocidade e direção do barco.

Para a construção desse trabalho foi desenvolvida a modelagem matemática do barco se baseando em princípios de modelagem tradicionais e modelagem voltada a barcos, tudo isso retirada da literatura com intuito de desenvolvimento o projeto.

A programação inicial baseou-se no desenvolvimento de uma estrutura de programação para a

ferramenta Matlab no qual houve a necessidade de convertê-la para linguagem de Arduino, linguagem essa voltada para o ATmega (micro controlador) com intuito de que este pudesse ser embarcado no hardware Arduino Mega 2560. Também foi utilizado o hardware Ardupilot que tem a função de ser um controlador automático de veículos autônomos, foi programado para poder ter acesso aos dados do barco e modifica-los em sua plena sua navegação.

O intuito do barco autônomo é que ele seja capaz de trabalhar com áreas de grande importância na atualidade, são elas: setores acadêmicos, monitoramentos ambientais, patrulhamento e vigilância.

A necessidade de utilização de robôs autônomos nas áreas mencionadas anteriormente é relevante, principalmente no que se refere às aplicações em pesquisas acadêmicas relacionadas a estudos de tempestades, estudos oceânicos e ambientais no cenário atual.

No que se refere ao monitoramento e vigilância territorial aquática tem seu nível de importância elevado, pois existe a necessidade de monitoração dos rios e lagos, sem contar a nossa costa se referenciando ao Brasil.

Os resultados até o momento são considerados satisfatório, devido ao fato deste barco ser um protótipo onde irá ser adquirido outro barco de maior porte para a aplicação de placas solares com intuito de que ele possa ter autonomia de navegabilidade a longas durações e distancia em mares abertos.

A ferramenta Matlab foi de bastante relevância para o projeto, pois me possibilitou simular o comportamento do barco em relação ao ângulo do leme e da vela correlacionados com a direção do vento, esses resultados obtidos nos deram um grande passo para encontrar o melhor controlador que atingisse nossas exigências. Alguns dos resultados principais foram que dado uma determinada direção, os controladores pudessem corrigir os erros de ângulos da vela e do leme.

Ressalta-se ainda que o referido projeto está tendo um outra abordagem em paralelo no que se refere a

parte de sensores e comunicação, pelos outros bolsistas do projeto.

II. ARQUITETURA DO SISTEMA

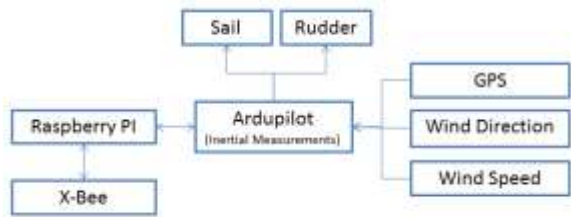


Figura 1. Arquitetura Eletrônica

III. MODELAGEM MATEMÁTICA

Propõe-se um modelo matemático do barco, a fim de determinar as suas variáveis, e, conseqüentemente, as equações para ser usado no sistema de controle. Essa modelagem é dividida em três módulos principais: sistema de coordenadas, cinemática e dinâmica.

A. Sistemas de Coordenadas

Um sistema com seis coordenadas independentes é usado para modelar e estudar a cinemática de posicionamento e orientação do barco. Tal sistema robótico usa localização com base em pontos de referência (Erckens et al, 2010).

Quando se controla um veículo subaquático é imprescindível obter os dados de sua posição e velocidade em relação a um referencial fixo na Terra, entretanto como toda a dinâmica de um veículo é modelada no referencial móvel, existe a obrigação de se conseguir obter transformações (que dependem de coordenadas isoladas) de um referencial para outro, segundo: SNAME (Society of Naval Architects and Marine Engineers) (SNAME, 1950) Como é mostrado na Tabela 2.

Assim, um sistema foi projetado usando duas referências cartesianas: A Terra inercial $\{X, Y, Z\}$, onde a origem do referencial está localizada no plano tangente à área de interesse, e o Corpo referencial $\{X_b, Y_b, Z_b\}$, em que este sofre translação e rotação consoante o movimento do corpo e a origem geralmente coincide com o centro de massa do veículo. Tais valores estão sendo mostrados na Tabela 1.

TABELA I. NOMENCLATURA DE ROTAÇÕES

N1	N2	V1	V2	τ_1	τ_2
X,Y,Z	ϕ, θ, ψ	U,V,W	P,Q,R	X,Y,Z	K,M,N

TABELA II. NOTAÇÃO SNAME, UTILIZADAS EM VEÍCULOS MARÍTIMOS.

Movimento / Rotação	Posição e ângulo de Euler	Velocidade e Linear / Angular	Força/Momento
Movimento em x (Onda)	X	U	X
Movimento em y (Balançar)	Y	V	Y
Movimento em z (Elevação)	Z	W	Z
Rotação em X (Rolar)	Φ	P	K
Rotação em Y (Aremessar)	Θ	Q	M
Rotação em Z (Guinada)	Ψ	R	N

Onde η_1 e η_2 são, respectivamente, as posições e as orientações do referencial fixo ao corpo relativamente ao referencial inercial a Terra; v_1 e v_2 são as velocidades lineares e angulares no referencial fixo ao corpo; τ_1 e τ_2 são as forças e os momentos exercidos sobre o corpo.

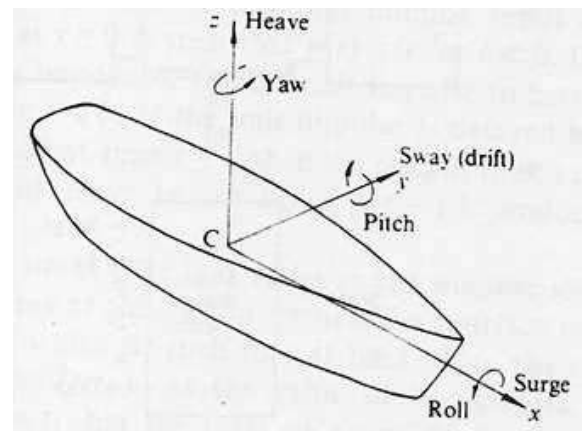


Figura 2. Sistema de Coordenadas

http://www.oceanica.ufrj.br/deno/prod_academic/relatorios/2009/Maues%20e%20Henrique/relat2/Relatorio_Htm.htm

B. Cinemática

Dada à orientação do objeto em questão em relação ao referencial da Terra, é possível obter-se qualquer uma das orientações através de três rotações elementares.

$$R_{X,\phi} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix}$$

$$R_{X,\theta} = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix}$$

$$R_{X,\psi} = \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

C. Dinâmica

O Sistema Dinâmico foi dividido em:

- Hidrodinâmica
- Momento Inercia
- Amortecimento Viscoso
- Lift
- Esforço da vela
- Centro de massa

Depois de ter sido feito o estudo do sistema dinâmico, foi achado um modelo matemático que rege todas as forças:

$$\begin{aligned} (M_{RB} + M_A(\text{Hidrodinâmica}))\dot{v} + (C_{RB}(\text{Dinâmica (centro de massa)})\dot{v}) + C_A(\text{Hidrodinâmica (Coriolis e centrípeto)})\dot{v})\dot{v} + \\ (D_k(\text{Lift (momentos gerados pela quilha)})\dot{v})\dot{v} + D_h(\text{Lift (forças que atuam no casco)})\dot{v} + g(\eta) = \tau_s + \tau_r \Leftrightarrow \\ (M_{RB} + M_A(\text{Hidrodinâmica}))\dot{v} = \tau_s + \tau_r - (C_{RB}(\text{Dinâmica (centro de massa)})\dot{v}) + C_A(\text{Hidrodinâmica (Coriolis e centrípeto)})\dot{v})\dot{v} - \\ (D_K(\text{Lift (momentos gerados pela quilha)})\dot{v}) - D_h(\text{Lift (forças que atuam no casco)})\dot{v} - g(\eta) \end{aligned}$$

D. Controle e resultados

A partir do modelo matemático obtido, e analisando as limitações intrínsecas para o veleiro, foram desenvolvidos dois controladores: um controlador PID, que controla os movimentos do leme para corrigir os ângulos e o outro foi o controlador Fuzzy que controla os

movimentos da vela. Os testes foram feitos com os controladores em malha aberta e malha fechada.

1) Malha Aberta

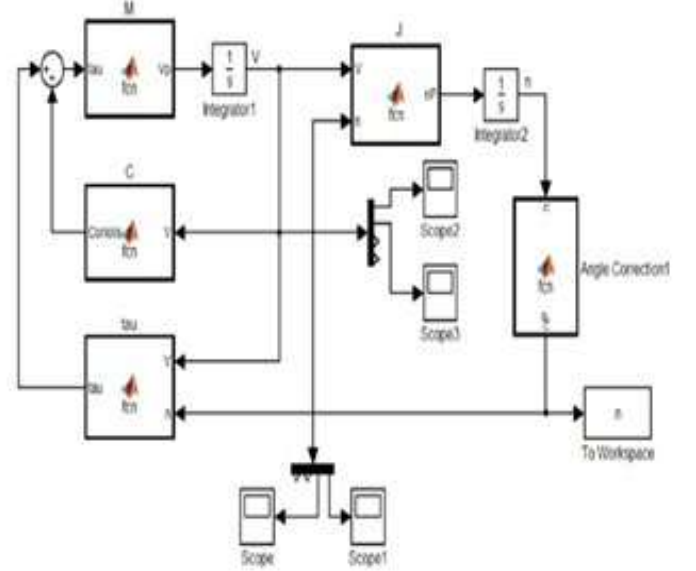


Figura 7. Diagrama de blocos do sistema global em malha aberta.

Foram realizados testes para avaliar se o comportamento do modelo corresponde à realidade, foram realizadas simulações em que o corpo inicia do repouso, com uma orientação de $-\pi$ rad e com $u_{tw} = [-5,0]$ J.T. Primeiramente colocou-se o leme a 0 rad e para diferentes valores de ângulos da vela estudou-se o trajeto efetuado pelo barco. Finalmente, deduziu-se empiricamente qual o valor do ângulo que o leme teria de ter, para um ângulo da vela de $\pi/6$ rad, de forma a que este mantivesse uma orientação de $-\pi$ rad.

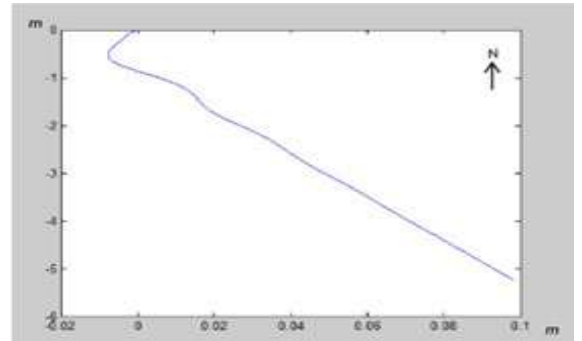


Figura 3. Percurso efetuado pelo barco (x,y).

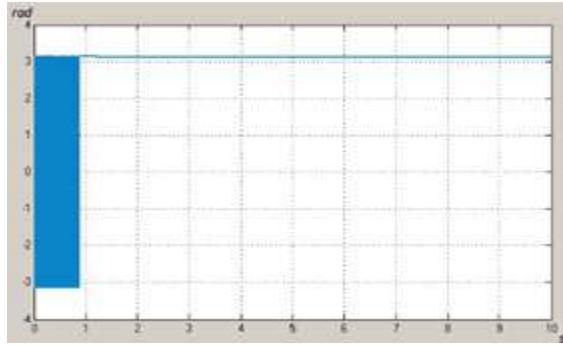


Figura 4. Representação gráfica do ângulo yaw.

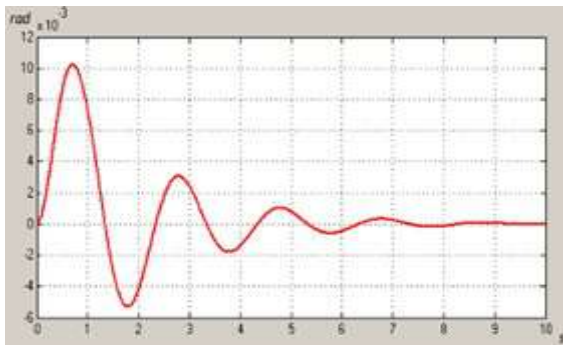


Figura 5. Representação gráfica do ângulo roll

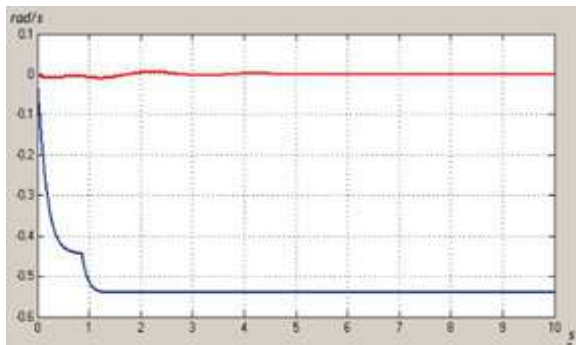


Figura 6. Representação gráfica dos componentes da velocidade u e v (linha a azul e vermelho respetivamente).

2) Malha fechada

As regras de controle do leme foram idealizadas um controlador PID em que a entrada é o erro da orientação (orientação desejada menos a orientação atual).

Também utilizados os três componentes para calcular o ângulo de leme (saída). Com relação aos valores para cada componente, estes foram obtidos utilizando uma análise empírica do comportamento do veleiro e com recurso ao Tune do Matlab e com um snapshot para 10 segundos (pois como o modelo é não linear, é necessário indicar o tempo de linearização ao Matlab para que consiga obter os valores) foi possível obter os seguintes ganhos:

K_p	K_i	K_d
0.68	0.125	-0.130

Visando o controle da vela, estudou-se inicialmente o comportamento dos movimentos do robô para uma determinada orientação, para posteriormente se construir um controlador baseado em Lógica Fuzzy capaz de representar e controlar esses movimentos.

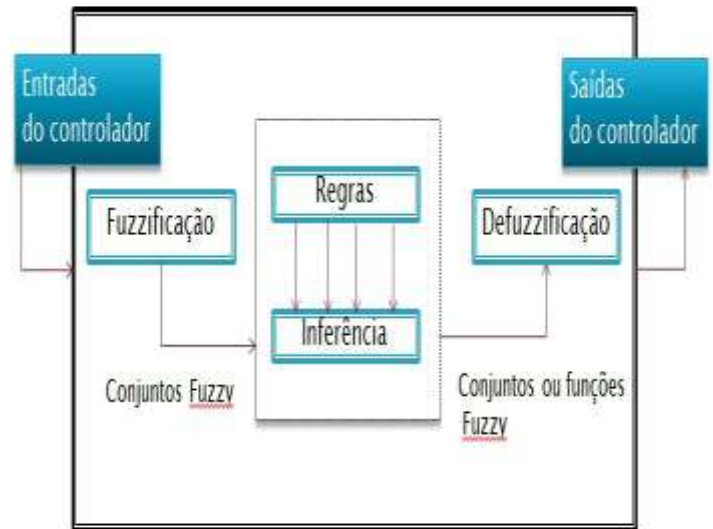


Figure 7. Representação do diagrama de fuzzificação e defuzzificação.

Salienta-se que a escolha do método de inferência incidiu sobre o Takagi-Sugeno devido ao fato de as saídas se basearem em funções ao qual são dados diversos pesos para as variáveis de entrada do sistema, entretanto, é muito mais complexo que o Mandani.

Afirma-se que este controlador terá duas entradas (o erro da orientação e a respetiva derivada) e uma saída que vai ser o ângulo da vela, ou seja, o quanto apertado ou esticado deve estar à corda da vela. O conjunto de regras implementadas no controlador é representada abaixo:

- 1.If (teta is A1) and (velTeta is B1) then (roS is roS1)
- 2.If(teta is A1) and (velTeta is B2) then (roS is roS2)
- 3.If (teta is A2) and (velTeta is B1) then (roS is roS3)
- 4.If (teta is A2) and (velTeta is B2) then (roS is roS4)

A saída do controlador é composta por quatro equações distintas que fazem a desfuzzificação. Estas equações são do tipo $A\psi + B\Delta\psi + C$, em que A é um coeficiente que vai multiplicar pelo erro, B um coeficiente que vai multiplicar pela derivada do erro e C uma constante. Desta maneira, a saída vai tomar o valor do resultado da equação anterior. Em seguida apresentam-se

as quatro equações de saída do nosso sistema:

$$\begin{aligned} roS1 &= 0.01602 \psi + 0.01646 \dot{\psi} + 1.09 \\ roS2 &= 0.0353 \psi + 0.0219 \dot{\psi} + 0.19 \\ roS3 &= 0.0353 \psi + 0.0219 \dot{\psi} - 0.19 \\ roS4 &= 0.01602 \psi + 0.01646 \dot{\psi} - 1.09 \end{aligned}$$

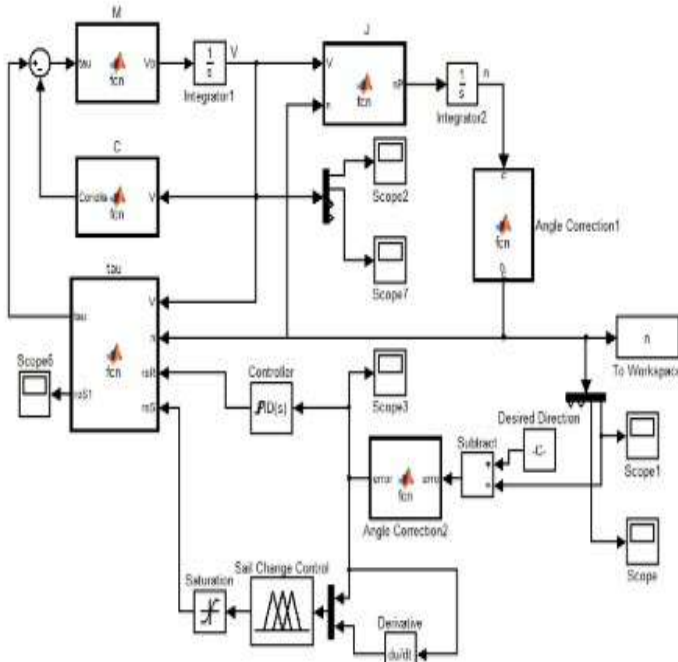


Figura 8. Diagrama de blocos em Matlab do modelo global em malha fechada

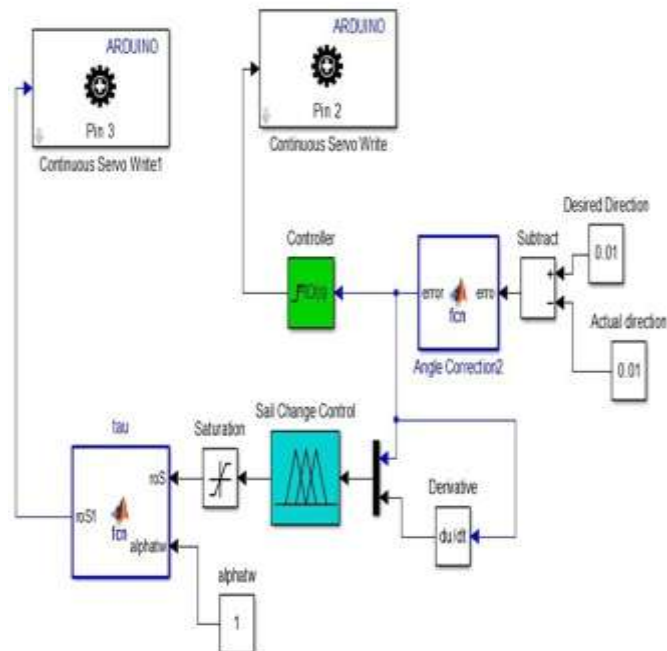


Figura 9. Diagrama de blocos em Matlab do modelo de comunicação do Matlab com o Arduino.

IV. RESULTADOS

Em um modelo experimental, simulado em MatLab, a lei de controle corresponde às expectativas iniciais. Como pode ser visto nas figuras de controle 8-11, os objetivos pretendidos foram alcançados. Cada gráfico apresentado mostra claramente tanto a rota que o barco deve fazer de acordo com as entradas, como o ângulo de cada eixo no sistema de coordenadas. Para uma montagem experimental, os dados dos sensores podem ser obtidos e o sistema proposto utilizado para enviar comandos para o motor de vela e do leme, de acordo com a posição final desejada.

V. CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta uma arquitetura e um modelo de lei de controle básico para veleiros autônomos. Os resultados apresentados foram validados com simulações e mostram que as leis de controle de igualar o desempenho esperado para o deslocamento do barco em uma determinada região.

Como as simulações validaram o modelo proposto, já estamos trabalhando em uma instalação experimental para testar o algoritmo de controle sobre o veleiro real, que já está montado.

Propomos um sistema de controle para o barco de tal forma que ele pudesse ter autonomia na sua navegação.

No projeto foi detalhado o estudo realizado sobre modelagem e controle e a aplicação da mesma no Software Matlab. Existiu a necessidade de embarcação do sistema desenvolvido nos Hardware Arduino e Ardupilot para possibilitar a sua navegabilidade automatizada, logo foram realizados estudos náuticos para barcos autônomos já existentes na atualidade, partindo desses estudos posteriormente foram feitos outros estudos relacionados à criação e modelagem de um modelo matemático que pudesse alcançar um resultado mais eficiente possível.

Também foram realizados estudos bibliográficos de diversos autores relacionados a veleiros autônomos para poder chegar a um modelo adequado. Com a obtenção desses resultados, foi realizada uma análise de como seriam feitos a aplicação do modelo em controladores que pudessem propiciar inteligência ao projeto, após esse processo decidiu-se a utilização dos controladores PID e controlador Fuzzy Takashi-Sugeno, sendo o primeiro para o leme e segundo para a vela. No entanto, o modelo retrata exhaustivamente as forças que atuam no veleiro, e os resultados das simulações permitiram validar alguns termos do modelo, embora seja ainda preciso afinar certos parâmetros.

Tal veio a ser infortúnio, pois apenas considerava o erro da orientação e a respectiva derivada, não tendo em atenção o aspecto mais importante num barco à vela e o vento. Visando tornar os controladores mais robustos, foram realizadas pesquisas para se conhecer as limitações dos movimentos de um veleiro e, a partir desses estudos, foi realizado um controle de alto nível para a determinação do ângulo da vela e do leme, consoante o estado do controle: normal, arriba, e consoante à orientação desejada, velocidade e direção do vento e posição angular do leme.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq, agência de fomento Brasileira de Pesquisa para o apoio financeiro a este projeto.

REFERÊNCIAS

B. Belcher, Wind-vane Self-Steering. International Marine Publishing Company, 1982.

SNAME, The Society of Naval Architects and Marine Engineers. *Nomenclature for Treating the Motion of submerged Body Through a Fluid*. Technical and Research Bulletin No, 1-5. 1950.

Hendrik Erckens, Gion-Andri Beusser, Cedric Pradalier and Roland Y. Siegwart. /Navigation Strategy and Trajectory Following Controller for an Autonomous Sailing Vessel. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2010.

Stelzer, R.; Jafarmadar K. (2012): "The Robotic Sailing Boat ASV Roboat as a Maritime Research Platform" in Proceedings of 22nd International HISWA Symposium on Yacht Design and Yacht Construction, Amsterdam, The Netherlands.

Alves, J.C.; Cruz, N.A., "FASt - an autonomous sailing platform for oceanographic missions," *OCEANS 2008*, vol., no., pp.1,7, 15-18 Sept. 2008

Erckens, H.; Busser, G.-A.; Pradalier, C.; Siegwart, R.Y., "Avalon," *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, vol.17, no.1, pp.45,54, March 2010

FOSSSEN, Thor I. Guidance and Control of Ocean Vehicles . John Wiley & Sons Ltd, England. 1994.

Faltinsen, O. M. 2005. Hydrodynamic of high speedmarine vehicles. Cambridge, USA, 2005.