

Identificação da manobrabilidade de AUV's utilizando a equação de primeira ordem de Nomoto

(Identification of AUV's manoeuvrability using the Nomoto's first order equation)

William da Silva Caetano

Department of Mechatronics Engineering of
Polytechnic School of the University of São Paulo
São Paulo, Brazil.

Ettore Apolônio de Barros

Department of Mechatronics Engineering of
Polytechnic School of the University of São Paulo
São Paulo, Brazil.

Abstract — This document presents the results obtained by applying the techniques of identification of dynamical systems with the aim of describing the manoeuvrability of autonomous underwater vehicle (AUV) Pirajuba, developed on Laboratory of unmanned vehicles (LVNT), at University of São Paulo (USP). To carry out identification procedures were performed manoeuvres Zig-Zag and Turning Circle in marine environment with the AUV, it was possible to estimate Nomoto's steering quality indices of manoeuvre K and T [1] that when applied to your first order equation, describing the vehicle movement on a horizontal plane. These experiments were conducted in calm waters in the bay of Angra dos Reis, and thus it was possible to neglect the influence of waves and currents in the small parameter estimation calculations.

Keywords — *AUV, System Identification, Manoeuvrability, Nomoto's Equation, Zig-Zag Manoeuvre, Turning Circle.*

1 INTRODUÇÃO

A avaliação da manobrabilidade de veículos aquáticos é importante para o projeto de seus sistemas de governo (lembres, propulsores, etc.) e piloto automático. Modelos matemáticos que descrevem a dinâmica destes veículos são baseados na representação de esforços inerciais, hidrostáticos e hidrodinâmicos, que são funções de variáveis de movimento (deslocamentos, velocidades e acelerações lineares e angulares) da embarcação.

Ensaio com modelos em escala auto-propelidos, ou "modelos livres", tem apresentado um potencial de aplicação crescente com o aumento da qualidade dos sensores que medem o movimento e a redução de seus custos, bem como dos custos envolvidos na implementação dos veículos. A realização de ensaios demanda recursos de infraestrutura e custos associados bem menores do que aqueles dos ensaios com modelos cativos em tanques de prova. Por fim, as técnicas de identificação de sistemas, relativas ao processamento dos resultados destes ensaios podem ser aplicadas a provas de mar para o veículo em escala real, o que é importante para a

validação das estimativas dos parâmetros provenientes de quaisquer outras técnicas aplicadas a ensaios com modelos livres, e possibilitando, todavia a eliminação de possíveis problemas relacionados à escala de cada veículo.

Este trabalho descreve a aplicação de um procedimento de modelagem da dinâmica de um veículo autônomo submarino, AUV, a partir de técnicas originalmente propostas para o estudo da manobrabilidade de navios. Trata-se da estimativa de parâmetros de uma função transferência de primeira ordem, que modela a mudança de rumo do veículo em resposta à ação do leme. A seção 2 revisa a técnica de Nomoto para a estimativa dos parâmetros do modelo de primeira ordem. A seção 3 aplica o procedimento de modelagem ao AUV Pirajuba, utilizando os resultados de ensaios com manobras pré-programadas realizadas na baía de Angra dos Reis-RJ. Finalmente, a seção 4 apresenta as considerações finais sobre a aplicação da técnica e futuros desenvolvimentos desta investigação.

2 ÍNDICES DE QUALIDADE DE MANOBRA K E T E EQUAÇÃO DE PRIMEIRA ORDEM DE NOMOTO

Em seu trabalho original, baseado em resultados experimentais obtidos com manobras de diversos navios, Nomoto [1] propôs que as dinâmicas de manobra destes veículos podem ser descritos de forma prática, através de uma equação diferencial linear de primeira ordem relacionando sua velocidade angular de guinada com a deflexão do leme (equação de Nomoto de primeira ordem).

Por muito tempo, havia um grande problema para se determinar quais medidas permitiriam descrever a manobrabilidade de um veículo marítimo de forma razoável e a maneira de se obter essas medidas.

O processo atual de estimação dos parâmetros de manobrabilidade do veículo é baseado na análise de uma sucessão de fases transientes de manobras de giro (manobra em

que o veículo possui seu leme vertical em um ângulo fixo, realizando um ou mais giros de 360 graus) com ângulos de leme oscilando de um mesmo valor para estibordo e bombordo conforme o valor atingido pelo ângulo de aproamento da embarcação (ou seja, o veículo realiza uma manobra de Zig-Zag).

Através deste tipo de manobra, estima-se “os índices de qualidade de manobra de giro”, K e T, que constituem uma medida de manobrabilidade do veículo. O parâmetro K representa a habilidade ou a capacidade do veículo em realizar curvas, enquanto o índice T representa a estabilidade em curso e a agilidade de resposta da manobra de giro. Essas habilidades são elementos fundamentais de manobrabilidade.

2.1 EQUAÇÃO DE MOVIMENTO DE PRIMEIRA ORDEM

Utilizando a nomenclatura convencional da área naval indicada em SNAME [2], seguem abaixo as equações lineares do AUV para o plano horizontal.

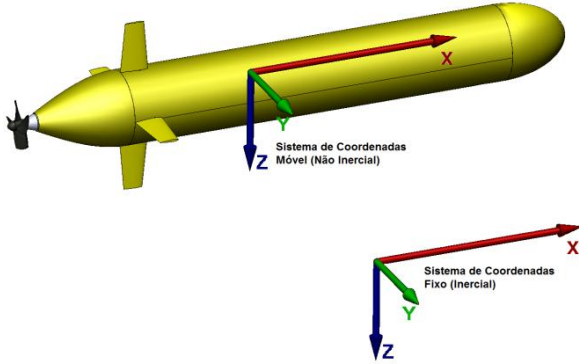


Fig. 1. Sistema de coordenadas fixo e móvel utilizados no AUV Pirajuba.

$$(m - Y_{\dot{v}})\dot{v} = Y_v v + (Y_r - m x_G)\dot{r} + (Y_r - m U)r + Y_{\delta}\delta \quad (1)$$

$$(I_{zz} - N_r)\dot{r} = (N_{\dot{v}} - m x_G)\dot{v} + N_v v + (N_r - m x_G U)r + N_{\delta}\delta \quad (2)$$

Onde:

- m é a massa do veículo [kg];
- x_G é a posição do centro de gravidade do AUV [m];
- δ é o ângulo de deflexão do leme [rad];
- Y_{δ} , Y_r , N_r , ..., representam as derivadas hidrodinâmicas do sistema;
- r é a velocidade angular de rumo;
- U a velocidade linear do corpo;
- v é a velocidade linear no eixo y.

A partir das equações (1) e (2) aplicando-se a transformada de Laplace às mesmas e a regra de Cramer ao sistema de equações, pode-se calcular as funções de transferência que

relacionam as velocidades em deriva e em guinada com o movimento do leme:

$$\frac{v}{\delta}(s) = \frac{K_v(1 + T_v s)}{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)} \quad (3)$$

$$\frac{r}{\delta}(s) = \frac{K_r(1 + T_r s)}{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)} \quad (4)$$

Os índices utilizados nas equações (3) e (4) estão apresentados na tabela 1.

Tabela 1. Definição dos termos das funções de transferência para o movimento no plano horizontal.

Termo	Expressão
$T_1 T_2$	$\frac{(m - Y_{\dot{v}})(I_{zz} - N_r) - (Y_r - m)(N_{\delta} - m x_G)}{Y_v(N_r - m x_G) - N_v(Y_r - m)}$
$T_1 + T_2$	$-\frac{(m - Y_{\dot{v}})(N_r - m x_G) + (I_{zz} - N_r)Y_v - (Y_r - m x_G)N_v + (N_{\delta} - m x_G)(Y_r - m)}{Y_v(N_r - m x_G) - N_v(Y_r - m)}$
T_r	$\frac{(N_{\delta} - m x_G)Y_{\delta} + (m - Y_{\dot{v}})N_{\delta}}{Y_{\delta}N_v - Y_v N_{\delta}}$
T_v	$\frac{(I_{zz} - N_r)Y_{\delta} - (Y_r - m x_G)N_{\delta}}{Y_{\delta}(N_r - m x_G) - N_{\delta}(Y_r - m)}$
K_v	$-\frac{Y_{\delta}(N_r - m x_G) - N_{\delta}(Y_r - m)}{Y_v(N_r - m x_G) - N_v(Y_r - m)}$

Entretanto, foi percebido na prática que descrever a manobrabilidade de um veículo marítimo através dos seus ângulos de deriva e guinada era uma tarefa com alto grau de dificuldade e imprecisão.

E tendo em vista que as equações de movimento de giro são apresentadas na forma de equações diferenciais relacionando o movimento de deriva, acoplado com o movimento angular de curva do veículo em manobra de giro, o ângulo de deriva é bastante pequeno, relativamente, de modo que o movimento de giro do veículo pode ser descrito substancialmente apenas definindo o ângulo de rumo como uma função do tempo.

Assim, eliminando a equação de deriva do movimento e representando a manobrabilidade desses veículos através do ângulo de rumo que é facilmente obtido, foi gerada por Nomoto uma equação de movimento da seguinte forma:

$$T_1 T_2 \frac{d^2 \Psi}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{d \Psi}{dt} + \Psi = K T_3 \frac{d \delta}{dt} + K \delta \quad (5)$$

Onde:

- Ψ representa a velocidade angular de rumo do veículo e é igual a r [°/s ou rad/s].
- δ representa o ângulo de leme do veículo em função do tempo [° ou rad].

- K sendo a taxa entre a velocidade angular estável de curva e o ângulo do leme, representando a capacidade de curva do veículo [1/s].

Sendo que K, T1, T2 e T3 dependem da forma do casco, dimensões relativas do leme e outros fatores do veículo, a equação anterior pode ser ainda aproximada por uma equação de primeira ordem, utilizando como simplificação o índice $T = T1+T2-T3$, desta forma resultando na equação de primeira ordem de Nomoto [1]:

$$T \frac{d\dot{\Psi}}{dt} + \dot{\Psi} = K\delta \quad (6)$$

Onde:

- T representa a estabilidade em curso e o acúmulo do movimento angular de giro [s].

Porém, para identificar os índices K e T, utilizam-se as respostas de uma manobra de Zig-Zag, que é uma manobra bastante conhecida e utilizada para a verificação da manobrabilidade de veículos marítimos. As técnicas utilizadas para estimar os índices K e T estão definidas no item a seguir.

2.2 DETERMINAÇÃO DOS ÍNDICES DE QUALIDADE DE MANOBRA USANDO MANOBRA DE ZIG-ZAG

O princípio da análise da manobra de Zig-Zag abaixo é encontrar o valor dos índices K e T, com que a equação de movimento de primeira ordem pode descrever um movimento observado de um veículo marinho. Sendo assim, o procedimento é indicado a seguir:

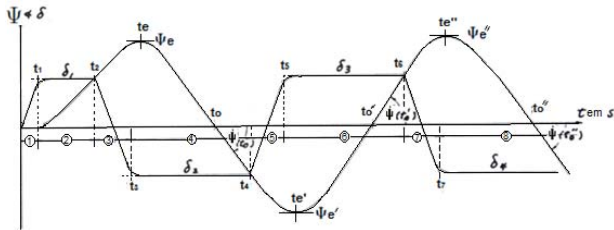


Fig. 2. Notações utilizadas para a análise da manobra de Zig-Zag, (NOMOTO, 1960).

Como a equação de movimento requer o veículo em trajetória natural em linha reta com o leme à meia nau, é necessário realizar uma correção do ângulo de leme observada acima antes de utilizá-lo na equação de Nomoto, então assume-se que:

$$\delta(t) = \delta_m(t) + \delta_r \quad (7)$$

onde $\delta_m(t)$ é o ângulo observado do leme e δ_r é o ângulo residual do leme, sendo esta a diferença entre $\delta(t)$ e $\delta_m(t)$.

Este ângulo residual pode ser considerado como uma constante desconhecida no início da análise.

Substituindo-se a equação (6) na equação (7) obtém-se:

$$T \frac{d\dot{\Psi}}{dt} + \dot{\Psi} = K\delta_r + K\delta_m(t) \quad (8)$$

Integrando ambos os lados de $t = 0$ até $t = t$:

$$T \int_0^t \frac{d\dot{\Psi}}{dt} dt + \int_0^t \dot{\Psi} dt = K\delta_r \int_0^t dt + K \int_0^t \delta_m(t) dt \quad (9)$$

Configurando o tempo de origem no início do teste, medindo $\Psi(t)$ a partir da base, e sabendo que o veículo estava navegando em linha reta antes do início dos testes, as condições iniciais são consideradas como:

$$\Psi = 0 \text{ e } \dot{\Psi} = 0 \quad \text{em } t = 0$$

Com isso obtém-se,

$$T \cdot \dot{\Psi} + \Psi = K \cdot \delta_r t + K \int_0^t \delta_m(t) dt \quad (10)$$

Sendo esta a equação fundamental para o presente procedimento. Então, aplicando-se a equação anterior para $t = t_e$ e t_e' obtém-se:

$$K \cdot \delta_r t_e' + K \int_0^{t_e'} \delta_m(t) dt = \Psi_e' \quad (11)$$

$$K \cdot \delta_r t_e'' + K \int_0^{t_e''} \delta_m(t) dt = \Psi_e'' \quad (12)$$

Desde que $\dot{\Psi} = 0$ nestes instantes. As integrais $\int_0^{t_e'}$, $\int_0^{t_e''}$ $\delta_m(t)$ podem ser obtidas através de um simples cálculo indicado na sequência. Desta forma, os parâmetros desconhecidos simultaneamente nestas equações são os valores de K e δ_r . Esses parâmetros podem ser determinados resolvendo as equações anteriores simultaneamente. O K calculado nesta etapa equivalente à segunda metade do período do teste é chamado de $K_{6,8}$.

Assim, aplicando o tempo $t = t_e$ nas equações (11) e (12), obtém-se:

$$K = \frac{\Psi_e}{\delta_r t_e + \int_0^{t_e} \delta_m(t) dt} \quad (13)$$

Sendo que este K é referente à primeira metade do período do teste, chamado então de K_4 . Os valores de K_4 e $K_{6,8}$ são

mais ou menos diferentes entre si, por consequência da redução de velocidade no teste e dos efeitos não lineares para os índices de qualidade de manobra de giro. Usualmente pode ser considerada a média entre os valores de K_4 e $K_{6,8}$ como o valor a ser utilizado para o índice K . Depois de encontrado o valor de K , é aplicado na equação (13) para os $t = t_0$, $t = t_0'$ e $t = t_0''$, obtendo-se então:

$$T = \frac{K}{\Psi(t_0)} \left(\int_0^{t_0} \delta_m(t) dt + \delta_r t_0 \right) \quad (14)$$

$$T = \frac{K}{\Psi(t_0')} \left(\int_0^{t_0'} \delta_m(t) dt + \delta_r t_0' \right) \quad (15)$$

$$T = \frac{K}{\Psi(t_0'')} \left(\int_0^{t_0''} \delta_m(t) dt + \delta_r t_0'' \right) \quad (16)$$

Sendo os tempos t_0 , t_0' e t_0'' registrados quando $\psi = 0$. Ao serem realizados os cálculos, é razoável utilizar K_4 para a primeira equação e usar $K_{6,8}$ para as outras duas. Os valores para $\Psi(t_0)$, $\Psi(t_0')$ e $\Psi(t_0'')$ podem ser determinados através do gráfico de $\psi(t)$.

A integral $\int_0^{t_0, t_0', t_0''} \delta_m(t) dt$ pode ser calculada facilmente, e o procedimento para realizar este cálculo é indicado na sequência. O valor de T obtido para a equação (14), que representa a primeira metade da análise do período é chamado de T_4 , e os T calculados para a segunda metade da análise do período são chamados de $T_{6,8}$, sendo a média entre essas constantes o valor final de T . Seguem abaixo as equações utilizadas para resolver a integral $\int_0^{t_0, t_0', t_0''} \delta_m(t) dt$:

$$(4) \Rightarrow \int_0^t \delta_m(t) dt = \delta_1 \left\{ -\frac{t_1}{2} + \frac{1}{2}(t_2 + t_3) \right\} + \delta_2 \left\{ -\frac{1}{2}(t_2 + t_3) + t \right\}$$

$$(6) \Rightarrow \int_0^t \delta_m(t) dt = \delta_1 \left\{ -\frac{t_1}{2} + \frac{1}{2}(t_2 + t_3) \right\} + \delta_2 \left\{ -\frac{1}{2}(t_2 + t_3) + \frac{1}{2}(t_4 + t_5) \right\} + \delta_3 \left\{ -\frac{1}{2}(t_4 + t_5) + t \right\}$$

$$(8) \Rightarrow \int_0^t \delta_m(t) dt = \delta_1 \left\{ -\frac{t_1}{2} + \frac{1}{2}(t_2 + t_3) \right\} + \delta_2 \left\{ -\frac{1}{2}(t_2 + t_3) + \frac{1}{2}(t_4 + t_5) \right\} + \delta_3 \left\{ -\frac{1}{2}(t_4 + t_5) + \frac{1}{2}(t_6 + t_7) \right\} + \delta_4 \left\{ -\frac{1}{2}(t_6 + t_7) + t \right\}$$

3 CARACTERIZAÇÃO DA MANOBRABILIDADE E ESTABILIDADE DO AUV PIRAJUBA

Em 2007, o Laboratório de Veículos não Tripulados (LVNT) da Universidade de São Paulo (USP) iniciou o projeto e posteriormente desenvolveu um veículo autônomo submarino (AUV) que recebeu o nome de Pirajuba. O AUV Pirajuba foi criado através da necessidade de uma plataforma de validação experimental, que tinha como objetivo apoiar algumas pesquisas realizadas no laboratório, entre elas sobre a investigação de derivadas e funções hidrodinâmicas de

veículos submarinos. Mais detalhes sobre o AUV podem ser vistos em m de Barros et. al. [3][4].

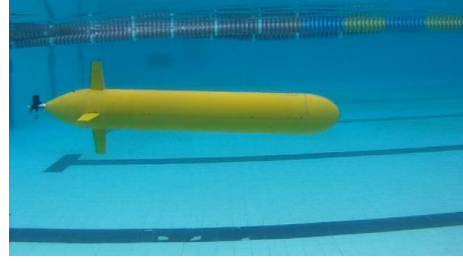


Fig. 3. AUV Pirajuba realizando testes em ambiente restrito.

O AUV Pirajuba durante os últimos anos sofreu algumas atualizações em suas estruturas mecânica e elétrico-eletrônicas referentes aos seus atuadores de lemes, propulsores, realocação de massa total (inércia do veículo mais a massa adicional quando submersa), hardwares e softwares embarcados, onde desta forma fez-se necessário verificar a manobrabilidade e o desempenho do veículo quando este esteja realizando missões tanto em ambientes restritos como tanques, piscinões, lagos e lagoas, quanto em ambientes abertos como em grandes rios, mares e oceanos.

Para isso, foram utilizados gráficos de manobras de Zig-Zag, para estimar os índices de qualidade de manobra de Nomoto K e T do AUV Pirajuba, utilizando as equações indicadas nos itens anteriores, para que seja possível descrever de forma simples e qualitativa a manobrabilidade do veículo.

3.1 MANOBRA EM AMBIENTE MARINHO: BAÍA DE ANGRA DOS REIS

Para estimar os índices K e T do AUV Pirajuba foram realizadas manobras de Zig-Zag com o veículo possuindo velocidade longitudinal de avanço no eixo x de 1m/s. A manobra de Zig-Zag foi realizada para uma entrada de leme de 5°. Devido a diferentes condições dinâmicas em relação ao momento de execução dos testes, foram utilizadas quatro manobras de Zig-Zag e calculado os índices K e T referentes a cada manobra, e após obtido esses valores foi utilizado a média aritmética para estimar o valor final.

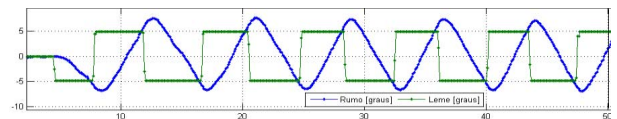


Fig. 4. 1ª Manobra de Zig-Zag do AUV Pirajuba em ambiente marinho, com leme a 5 graus.

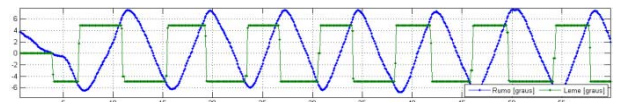


Fig. 5. 2ª Manobra de Zig-Zag do AUV Pirajuba em ambiente marinho, com leme a 5 graus.

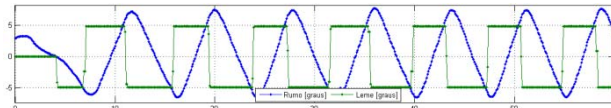
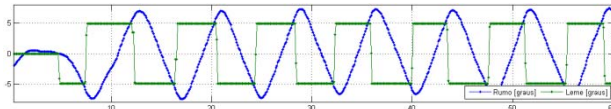


Fig. 6. 3ª Manobra de Zig-Zag do AUV Pirajuba em ambiente marinho, com leme a 5 graus.



4ª Manobra de Zig-Zag do AUV Pirajuba em ambiente marinho, com leme a 5 graus.

Tabela 2. Resultados estimados para os índices K, T em ambiente marinho e para o ângulo residual do leme.

Índices de Qualidade	Gráfico 1	Gráfico 2	Gráfico 3	Gráfico 4	Média
K [s^{-1}]	0,8997	0,8166	0,7958	0,8798	0,848
T [s]	0,4964	0,5095	0,2934	0,505	0,4511
δr [°]	1,32	0,8971	1,0905	0,7596	1,0168

É possível verificar através dos resultados obtidos para os índices de qualidade de manobra K e T conforme indicados na tabela 1, que os resultados obtidos através das manobras de Zig-Zag retornaram valores distantes entre si, que podem ser explicadas pelas trimagens de leme executadas pelo veículo antes do início de cada manobra, que podem ser visualizadas pelos valores de δr na tabela.

3.2 UTILIZAÇÃO E VALIDAÇÃO DE K E T— MANOBRA DE GIRO

Para validar os valores encontrados para os índices K e T, foram realizadas manobras de Giro com o veículo e sua resposta comparada com a predição realizada utilizando a equação de primeira ordem de Nomoto. Para isso foi projetado um simulador em ambiente do software comercial Matlab/Simulink onde através de gráficos e tabelas comparativos foi possível verificar a qualidade da predição da manobrabilidade do AUV Pirajuba. Sendo estes resultados apresentados a seguir:

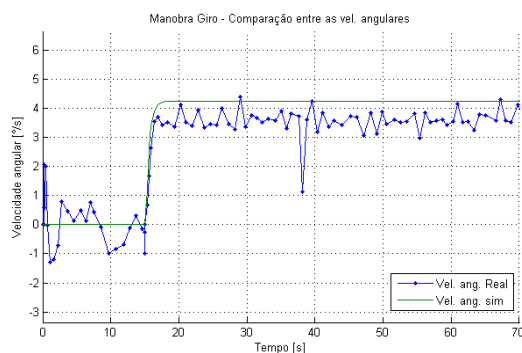


Fig. 7. Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 5 graus de leme.

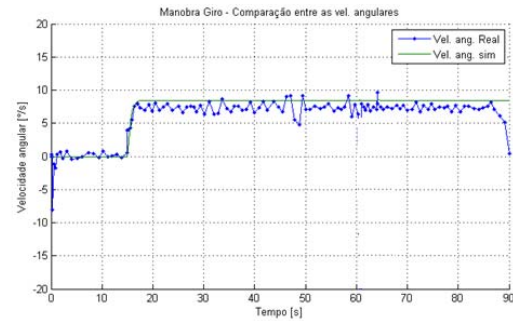


Fig. 8. Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 10 graus de leme.

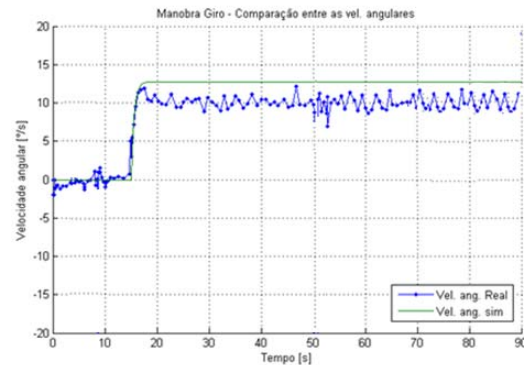


Fig. 9. Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 15 graus de leme.

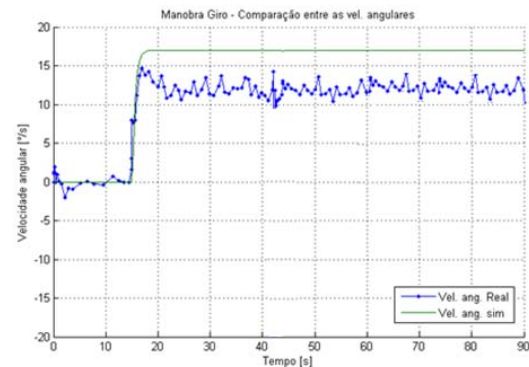


Fig. 10. Comparação entre as velocidades angulares da manobra de giro em ambiente marinho, para 20 graus de leme.

Tabela 3. Tempo estimado para o veículo completar uma volta em comparação aos dados experimentais.

Tempo para o AUV completar uma volta de 360°		
Leme [°]	Simulação [s]	Experimental [s]
5	90,36	88,93
10	47,90	48,04
15	32,78	35,25
20	25,96	29,53

Tabela 3. Comparação entre as curvas das velocidades angulares.

Velocidade angular da manobra de Giro		
Leme [°]	Simulação [°/s]	Experimental (média) [°/s]
5	4,240	3,553
10	8,480	7,146
15	12,720	10,103
20	16,960	11,989

Tabela 4. Comparação entre os raios de giro, para velocidade de 1 m/s.

Raio da manobra de Giro		
Leme [°]	Simulação [m]	Experimental [m]
5	13,51	16,13
10	6,76	8,02
15	4,50	5,67
20	3,38	4,78

Tendo em vista os valores obtidos de K e T posteriormente utilizados na equação de primeira ordem de Nomoto quando comparados com os dados reais do comportamento do AUV em ambiente marinho, foram percebidos através dos gráficos de velocidade angular de r e nas tabelas de raio de giro que os dados simulados e obtidos ficaram bem próximos entre si, indicando uma ótima qualidade de predição de manobras. Entretanto, como esperado, o erro de predição aumenta conforme os ângulos de leme nas manobras atingem valores distantes da região de linearização ($\delta = 5^\circ$).

CONCLUSÕES

A utilização da equação de primeira ordem de Nomoto para descrever a manobrabilidade de veículos marinhos é normalmente aplicada para descrever o comportamento de navios e outras embarcações de superfície aquática. A proposta do experimento indicado nesse documento utiliza os índices de qualidade de manobra de Nomoto para prever o comportamento do AUV Pirajuba, que por sua vez resultou em uma boa aproximação da realidade baseada nos testes padrões de Zig-Zag e foram validadas através das manobras de Giro.

Percebeu-se também que ao serem comparados os dados reais das manobras com os dados gerados pelo simulador que utiliza a equação de Nomoto como base, as predições realizadas para ângulos de entrada próximos ao ponto de linearização ficaram com um erro médio mínimo em regime o que se acentua conforme os ângulos chegam próximo ao limite de 20° .

A utilização desse método de identificação de manobrabilidade quando empregada em veículos submarinos como no caso do AUV tem a vantagem de proporcionar um procedimento de estimação de simples execução. Mesmo com as diferenças entre as predições e os resultados experimentais observadas para manobra de giro, o método proporciona de forma eficaz um modelo da dinâmica do veículo que pode ser facilmente aproveitado para o projeto de seu piloto automático.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NOMOTO, K., Analysis of Kempf's Standard Manoeuvre Test and Proposed Steering Quality Indices, First Symposium on Ship Manoeuvrability, October 1960.
- [2] SNAME. Nomenclature for Treating the Motion of a Submerged Body Through a Fluid. [S.l.], 1950.
- [3] de BARROS, E. A.; FREIRE, L. O.; DANTAS, J. L. D. Development of the Pirajuba AUV. In: Proceedings of CAMS 2010 - Control Applications in Marine Systems. [S.l.: s.n.], 2010.
- [4] de BARROS, E. ; DANTAS, J.; FREIRE, L. O.; OLIVEIRA, L. M. de; VALE, R. T. S. New aspects in the Pirajuba AUV project. In: ABCM (Ed.). COBEM 2011 - 21st International Congress of Mechanical Engineering. Natal, RN, Brazil: [s.n.], 2011.
- [5] FOSSEN, T. I, Guidance and Control of Ocean Vehicles, 1ª edição, Inglaterra, 1994.
- [6] GARCIA, C. Apostila da disciplina PTC-5719: identificação de sistemas. São Paulo, Brasil, 2011.
- [7] JOURNÉE, J.M.J., A Simple Method for Determining Manoeuvring Indices K and T from Zigzag Trial Data, Ship Hydromechanics Laboratory, Delft University of Technology, Netherlands, 2001.