

08 a 11 de Outubro de 2018
Instituto Federal Fluminense
Búzios - RJ

USO DE CONTROLADOR PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO PARA NAVEGAÇÃO AUTOMATIZADA DE EMBARCAÇÃO DE PEQUENO PORTE

Gabriela Souza Kautscher de Onofre¹ – gabrielakautscher@gmail.com

Patricia Pessanha Resende¹ – patriciapresende@gmail.com

Luiz Alberto Oliveira Lima Roque¹ - luizlimaroque@gmail.com

Jader Lugon Junior¹ - jlugonjr@gmail.com

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense Campus Macaé – Macaé, RJ, Brasil

RESUMO. *Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de navegação automatizado para controlar o comportamento de uma embarcação de pequeno porte que será utilizada para aquisição de dados ambientais em lagoas costeiras. O algoritmo usa a técnica chamada “Line of Sight” com correção de rota gerada por um controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) para alcançar as coordenadas de destino. Testes foram realizados simulando a ocorrência de erros aleatórios e interferências que podem ocorrer na presença de interferências naturais, tais como ondas e vento.*

Palavras-chave: *Line of Sight, PID, embarcação.*

1. INTRODUÇÃO

As lagoas costeiras ao longo da História brasileira têm contribuído significativamente para as atividades realizadas em seu entorno (TORRES *et al.*, 2012). O aumento da população mundial, o desenvolvimento urbano e a expansão industrial sem os devidos cuidados de proteção e preservação ambiental estão associados à degradação dos recursos hídricos do planeta (CUNHA, 1982).

Nesse contexto, as embarcações náuticas autônomas são capazes de dar suporte às atividades de monitoramento ambiental, ao executarem a coleta de dados necessários à caracterização física, química e biológica da região de interesse, em campanhas periódicas, através de rotas pré-programadas (HORA, 2015).

Para ser capaz de realizar uma rota de forma autônoma, a embarcação precisa estar munida de um sistema de navegação, orientação e controle. O sistema de navegação é responsável por capturar e registrar as informações da posição e da orientação da embarcação, sendo utilizados para esta finalidade o dispositivo GPS e o magnetômetro. O sistema de orientação, baseado na técnica bidimensional *Line of Sight* (LOS), recebe informações do sistema de navegação e é

responsável por gerar comandos para o controle de movimentos do veículo. Por fim, o sistema de controle, baseado na técnica Proporcional-Integral-Derivativa (PID) efetua os cálculos necessários para obter a saída desejada, sem interferência humana, constituindo um sistema de piloto automático.

O presente trabalho tem como objetivo simular o comportamento de um protótipo de veículo náutico não tripulado ao realizar uma rota pré-programada utilizando a técnica de orientação *Line of Sight* e o controlador Proporcional-Integral-Derivativo. A utilização do LOS e do PID permite a realização de correções de deslocamento para que a embarcação percorra o melhor caminho até o *waypoint* final da trajetória estabelecida, sem a presença de desvios bruscos em sua rota.

2. REVISÃO TEÓRICA

Nesta revisão será apresentada a fundamentação teórica utilizada no desenvolvimento do trabalho, englobando os sistemas de navegação, orientação e controle.

2.1 Sistema de Navegação

Entende-se por navegação o processo de aquisição e análise de dados, para inferência de informações acerca de uma embarcação, bem como do ambiente ao seu redor (KENDOUL, 2012). Para que a embarcação autônoma obtenha informações pertinentes ao cumprimento eficiente de sua missão, o Sistema de Navegação utiliza sensores de posicionamento.

Na literatura estão presentes diferentes tipos de sensores para a obtenção desses dados. No presente trabalho são utilizados os sensores denominados magnetômetro e GPS, sendo ambos tecnicamente descritos nas próximas seções.

2.1.1 GPS

O GPS (Sistema de Posicionamento Global) é um sistema espacial baseado em satélites, que tem como função básica fornecer informações precisas sobre o posicionamento do dispositivo através de coordenadas no globo terrestre.

Segundo Marcarini (2015), o GPS funciona com uma constelação de 24 satélites que orbitam a Terra duas vezes por dia, emitindo sinais de rádio para os receptores. É possível determinar a posição do receptor GPS coletando sinais de rádio, quando estão disponíveis as informações de pelo menos quatro satélites, que contêm a posição atual do receptor e o instante em que o pulso foi emitido. De acordo com Alves (2006), o receptor determina a posição do usuário, calculando-a como intersecção das quatro superfícies esféricas obtidas, sendo a localização dada em coordenadas geográficas (latitude, longitude e a elevação).

No que interessa ao presente trabalho, o GPS é responsável por fornecer dados da posição final e inicial da missão da embarcação, além de fornecer informações sobre os *waypoints*, que são coordenadas do conjunto de pontos onde se deseja que a embarcação controlada percorra.

2.1.2 Magnetômetro

Magnetômetros são sensores utilizados na medição de intensidade, direção e sentido de um campo magnético (HORA, 2015). O magnetômetro é um sensor que mede a densidade do fluxo magnético, cuja intensidade é diretamente proporcional à força do campo magnético, sendo

capaz de registrar o campo magnético local (SILVA,2013). Esse sensor faz a medida do azimute diretamente em relação ao norte magnético da Terra.

Neste trabalho o magnetômetro será utilizado para fornecer orientação para embarcação de acordo com a orientação da mesma, para que o trajeto desejado seja alcançado. Através da informação do magnetômetro, é possível verificar se a embarcação está orientada na direção desejada, estando apontada da direção atual para a posição desejada.

2.2 Sistema de Orientação

Segundo Draper *et al.* (1965) o Sistema de Orientação coleta e aplica informações com o objetivo de gerar comandos para o controle de movimentos de um veículo. Logo, a questão de orientação implica em garantir que o veículo percorra uma trajetória previamente programada. Para tal, é necessário utilizar um espaço de referência com as informações dos pontos iniciais do veículo, das coordenadas de localização atual e dos pontos da localização pretendida. A partir destes insumos, o sistema determina se houve desvios na rota e, em caso afirmativo, gera comandos para a correção da posição da embarcação.

Segundo Perez e Fossen (2007) a função fundamental do Sistema de Orientação é a geração de uma trajetória ou caminho de referência, a ser percorrido pela embarcação. Para realizar o cumprimento da missão, o sistema utiliza uma série de tarefas, como a geração de *waypoints* conforme os objetivos da missão, acompanhada da tomada de decisões sobre qual *waypoint* deve ser seguido, para se otimizar o caminho até o *waypoint* final, juntamente com a atualização do *waypoint* corrente.

2.2.1 Waypoints

Segundo Jensen (2011) a descrição de trajetórias a serem usadas como rota de veículos náuticos são feitas através de *waypoints*. A representação tridimensional de um ponto é uma coordenada pertencente ao espaço \mathbb{R}^3 , sendo designada por: $p_n = [x_n, y_n, z_n]^T$, descrevendo movimentos ascendentes, horizontais e verticais, enquanto seu posicionamento no plano é expresso como $p_n = [x_n, y_n]^T$, o qual é associado somente à movimentação no espaço \mathbb{R}^2 .

2.2.2 Lei da Orientação *Line of Sight*

A lei da orientação utilizada neste artigo foi baseada na técnica *Line of Sight*, que originalmente foi utilizada para fins aéreos no controle de mísseis. Segundo Fossen *et al.* (2003), a lei denominada *Line of Sight* é baseada em três pontos principais: um ponto de referência p_n , um ponto intermediário p_{LOS} e, finalmente, um ponto a ser interceptado p_{n+1} , cujo objetivo é forçar que a posição da embarcação convirja para o caminho desejado. O ponto intermediário p_{LOS} é definido através de uma reta entre dois pontos consecutivos componentes da mesma rota, sendo estes p_n e p_{n+1} , respectivamente. O *Line of Sight* também oferece um ângulo α , que é proveniente da posição atual da embarcação e do ponto intermediário, definindo uma das orientações a ser seguida pelo veículo. Assim, se a embarcação está na posição atual $p(t) = [x(t), y(t)]^T$ e há um ponto intermediário localizado em $p_{LOS} = [x_{LOS}, y_{LOS}]^T$, o ângulo a ser seguido pela embarcação pode ser determinado pela seguinte equação:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{y_{LOS}-y(t)}{x_{LOS}-x(t)}\right) \quad (1)$$

2.3 Sistema de Controle

Segundo Perez e Fossen (2007), o Sistema de Controle tem a função de gerar um comando favorável para os atuadores do veículo, visando a diminuição da diferença entre os percursos reais e pretendidos. Esse comando é realizado com base no processamento de dados para inferir o estado do barco.

O Sistema de Orientação determinará a orientação a ser seguida pelo veículo, fornecendo um ângulo, que servirá de referência para o controlador. Dessa forma, o Sistema de Orientação e o Sistema de Controle devem ser analisados em conjunto.

Nessa embarcação foi utilizado um piloto automático dedicado a regular a posição da mesma, atuando em conjunto com a técnica de orientação adotada.

2.3.1 Controlador PID

Segundo Ogata (1998), o controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) é composto pelo cálculo das ações proporcional, integral e derivativa para gerar um só sinal de controle, a fim de aproveitar as características de cada uma destas ações para se obter uma melhoria significativa do comportamento transitório e em regime permanente do sistema em questão. A formulação matemática do controlador PID pode ser calculado por:

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2)$$

Onde K é o ganho proporcional (ação proporcional), T_i é o tempo integral (ação integral), T_d é tempo derivativo (ação derivativa), $u(t)$ é o sinal de saída do controlador (variável controlada) e $e(t)$ é o sinal de entrada do controlador (chamado de erro atuante).

Segundo Hora (2015), o termo proporcional faz com que o sistema reaja ao erro no presente, o termo integrativo elimina os erros do processo durante sua atuação em regime permanente e o termo derivativo, a partir da análise da curva do erro ao longo do tempo, antecipa o comportamento do processo.

2.3.2 Controlador PID aplicado à Lei de Orientação

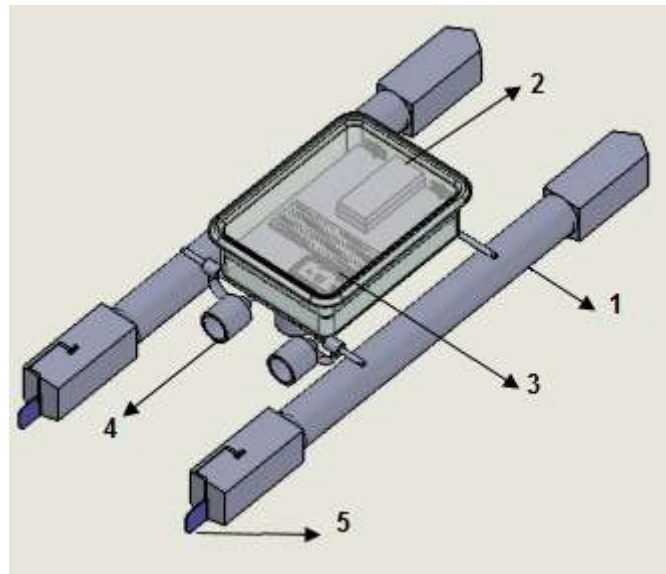
A lei da orientação *Line of Sight* oferece o ângulo α desejado para a correção do rumo da embarcação. Porém, a implementação de piloto automático requer o cálculo de um ângulo χ , para a correção adequada do posicionamento do leme da embarcação.

Para alcançar o desafio de correção autônoma da trajetória veicular, adotou-se o sistema de piloto automático utilizando o padrão PID em série com o LOS. Neste caso, a saída do LOS (o ângulo α) é utilizada como entrada do controlador PID, que gera como saída o ângulo χ , adicionando flexibilidade ao controlador (FOSSSEN,2003).

3. METODOLOGIA

Na Figura 1 está representado o protótipo da embarcação desenvolvida e que é constituído por dois flutuadores (1), que sustentam uma caixa estanque. No interior da caixa estanque está alojada a Bateria (2) e o Circuito Eletroeletrônico (3), no qual se insere a programação do PID. O controlador PID é responsável por acionar os propulsores (4) e por comandar os lemes (5).

Figura 1- Representação do Protótipo



Legendas: 1= Flutuadores; 2=Bateria. 3= Circuito eletroeletrônico. 4= Propulsores. 5= Lemes.
Fonte: Dos autores (2018)

O modelo teórico foi desenvolvido com o objetivo de simular o comportamento de um protótipo de veículo náutico não tripulado, representado na Figura 1, ao realizar uma rota pré-programada. Foi utilizada a técnica de orientação *Line of Sight* e também a correção com o PID. Os *waypoints* iniciais e finais foram coletados com o dispositivo GPS no tanque de testes do Instituto Federal Fluminense *campus* Macaé.

Para a realização da simulação foi elaborada uma planilha no software Excel para representar de uma forma teórica os *waypoints* gerados pelo sistema de orientação LOS e as correções realizadas pelo controlador PID, a fim de se obter o gráfico de representação da trajetória da embarcação.

A Figura 2 ilustra o local com a disposição dos pontos coletados. O conjunto de pontos representados em latitude e longitude são: -22.405142, -41.843960 (O) e -22.405273, -41.844151 (P).

Figura 2- Disposição de *Waypoints*



Fonte: Dos autores (2018)

Para o desenvolvimento do modelo, considerou-se a velocidade de deslocamento do protótipo, medida experimentalmente, como sendo igual a 0,35 m/s. Para calcular a direção desejada utilizou-se a técnica LOS, responsável por fornecer o ângulo α através da fórmula (1), com a substituição dos pontos iniciais e finais na mesma, ficando o primeiro α da seguinte maneira :

$$\alpha = \arctan\left(\frac{-41.844151 - (-41.843960)}{-22.405273 - (-22.405142)}\right) \quad (3)$$

A velocidade com que o protótipo se desloca pode ser dividida em duas componentes, no plano x e y, sendo definidas pelas seguintes equações:

$$Vx = V_m \cdot \cos(\beta - \theta) \quad (4)$$

$$Vy = V_m \cdot \sin(\beta - \theta) \quad (5)$$

onde Vx e Vy são, respectivamente, a velocidades nos eixos x e y, β é a direção seguida pelo barco e θ é um valor de correção para que a diferença entre a direção desejada α e a direção traçada pelo barco β seja zero.

Para traçar a direção a ser seguida pelo barco a fim de alcançar o destino final, projeta-se os pontos intermediários da trajetória, que podem ser decompostos nos eixos x e y, sendo dadas por:

$$X(t + \Delta t) = x_a + (x \cdot V_m) + w \quad (6)$$

$$Y(t + \Delta t) = y_a + (y \cdot V_m) + w \quad (7)$$

sendo x_a e y_a os pontos x e y percorridos anteriormente, V_m é a velocidade média de 0,35m/s e w é um valor aleatório utilizado para simular a ação do vento e das ondas sobre o barco.

Feito isto, aplica-se o controlador PID a fim de se obter um melhor itinerário para o protótipo. A ação Proporcional-Integral-Derivativa é obtida utilizando a função de correção do LOS (θ) como função de entrada (erro) deste controlador. Para a correção PID foram utilizadas as seguintes constantes: $K_p = 2.0$ para o ganho proporcional, $K_i = 0.07$ para o ganho integrativo e $K_d = 0.00001$ para o ganho derivativo. Essas constantes foram obtidas pelo método de tentativa e erro através da realização de testes com o protótipo no tanque de teste do Instituto Federal Fluminense *campus* Macaé.

Dessa forma, a nova velocidade do barco, decomposta nos eixos x e y, pode ser dada por:

$$Vx_\phi = V_m \cdot \cos(\beta - \Phi) \quad (8)$$

$$Vy_\phi = V_m \cdot \sin(\beta - \Phi) \quad (9)$$

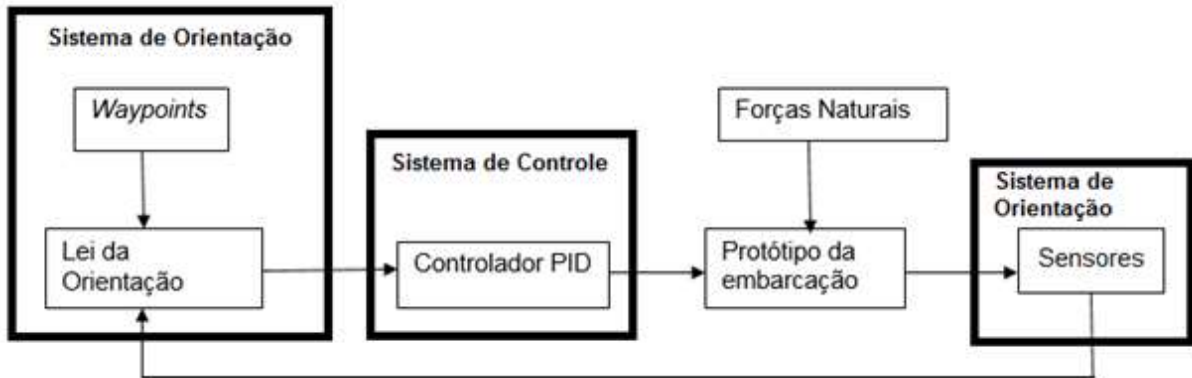
em que Φ é a correção gerada pelo PID. Os novos pontos a serem seguidos pelo veículo são alcançados pelas seguintes equações:

$$X_\phi(t + \Delta t) = x_a + (x \cdot V_m) + w \quad (10)$$

$$Y_\phi(t + \Delta t) = y_a + (y \cdot V_m) + w \quad (11)$$

O processo englobando o Sistema de Orientação, Navegação e Controle, está representado pela Figura 3.

Figura 3 – Representação dos Sistemas da Embarcação.



Fonte: Dos autores (2018)

A Tabela 1 representa a descrição das tarefas a serem seguidas para geração da trajetória da embarcação até o *waypoint* final.

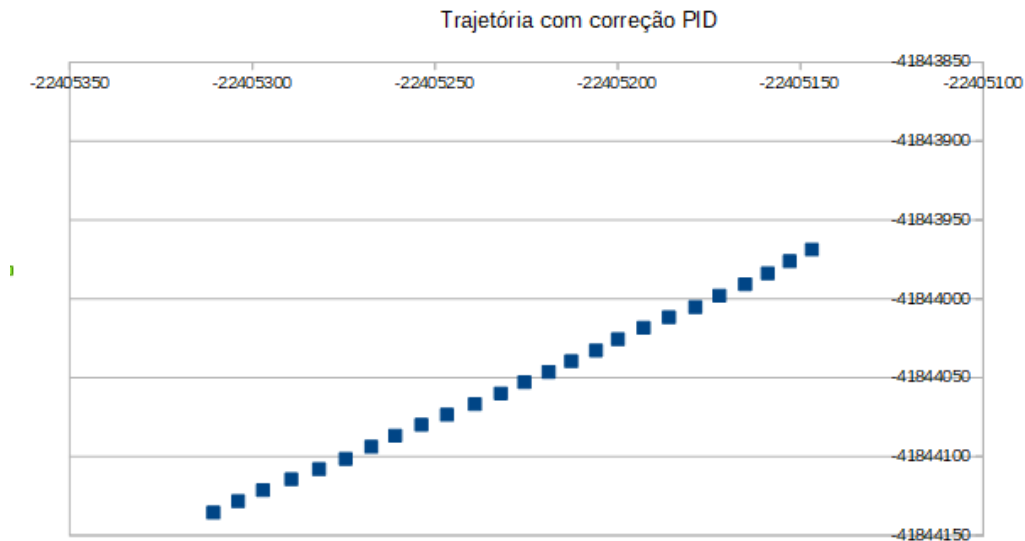
Tabela 1- Descrição das tarefas para o cumprimento da missão

Tarefa	Descrição
1º	Coletar os <i>waypoints</i> iniciais e finais da rota pré-programada para se inserir ao banco de dados.
2º	Obter a posição atual do veículo através do dispositivo GPS e o ângulo em direção ao norte magnético pelo magnetômetro.
3º	Calcular a distância e a orientação para o próximo <i>waypoint</i> utilizando o <i>Line of Sight</i>
4º	Comparar a orientação atual com a desejada e utilizar a correção PID para evitar desvios bruscos no deslocamento.
5º	Se o veículo não tiver atingido o <i>waypoint</i> final, retornar ao passo dois para traçar o novo ponto de deslocamento.
6º	Verificar se último <i>waypoint</i> foi atingido. Se verdadeiro, desligar os motores.

4. RESULTADOS OBTIDOS

Utilizando a técnica LOS aplicada ao Sistema de Orientação para o cumprimento da missão e o controlador PID como forma de correção dos possíveis distúrbios sofridos pela embarcação, que neste trabalho, foram gerados através de números aleatórios no software Excel, a rota seguida pela embarcação de pequeno porte está representada na Figura 4.

Figura 4 - Trajetória do veículo com a correção gerada pelo controlador PID.



Fonte: Dos autores (2018)

5. CONCLUSÃO

A estratégia de navegação, adotando o sistema de orientação *Line of Sight* e a correção PID, apresenta uma solução adequada para que a embarcação possa cumprir a trajetória pré-estabelecida, ocasionando pequenos desvios na rota, como pode ser observado pela Figura 4.

As principais dificuldades de implementação do sistema estão associadas à modelagem precisa do protótipo e à representação das eventuais condições físicas que podem interferir na trajetória da embarcação, como ventos, ondulações etc. A solução encontrada foi representar essas incertezas como distúrbios aleatórios ao sistema na planilha elaborada, com o objetivo que a estratégia de controle assegure a robustez e confiabilidade.

Para trabalhos futuros, será implementado um sistema de rede neural para ajustar dinamicamente o sistema PID.

REFERÊNCIAS

- ALVES, S. A Matemática do GPS. Revista do Professor de Matemática, v. 59, p. 17-26, 2006.
- CUNHA, LUIZ VEIGA D., Gestão das Águas: Principais Fundamentos e sua Aplicação em Portugal, Fundação Calouste Gulbenkian. 1982.
- DRAPER, C. S.; WRIGLEY, W.; HOAG, D. G.; BATTIN, R. H.; MILLER, J. E.; KOSO, D. A.; HOPKINS, A. L.; VELVE, W. E. V. Apollo: Guidance and Navigation. United States of America: Massachusetts Institute of Technology, 1965.
- FOSSEN, T. I.; BREIVIK, M.; SKJETNE, R. Line-of-Sight Path Following of Underactuated Marine Craft. [S.l.]. IFAC, 2003.
- HORA, H. M. C. Desenvolvimento de sistema de navegação, orientação e controle para veículo náutico de superfície Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação Industrial) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense. Macaé, RJ, 2015.
- JENSEN, T. M. Waypoint-Following Guidance Based on Feasibility Algorithms. 2011. 115 p. Thesis (Master of Science in Engineering Cybernetics) – Department of Engineering Cybernetics. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2011.
- KENDOUL, F. Survey of Advances in Guidance, Navigation, and Control of Unmanned Rotorcraft Systems. Journal of Field Robotics, v. 29, n. 2, p. 315 – 378, 2012. DOI: 10.1002/rob.20414

- MARCARINI, I. M. UTFPR Mapa - Sistema de auto-localização utilizando GPS em mapas para a plataforma Android. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Pato Branco, 2015. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/6123/1/PB_CEETJ_III_2015_07.pdf> Acesso em: 12 jul. 2018.
- OGATA, Katsuhiko. Engenharia de Controle Moderno. 3. ed. Rio de Janeiro: PrenticeHall, 1998. 800 p. ISBN 8587918230
- PEREZ, T.; FOSSEN, T. I. Tutorial on Modelling and Simulation of Marine System Dynamics. In: IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems (CAMS), Croatia, 2007. Anais eletrônicos... [S.l.: S.n, 2007]. Disponível em: Acesso em: 12 abr. 2018.
- SILVA, S. C. P. Desenvolvimento para uma Metodologia para Realização de Levantamentos Magnéticos Marinhos para Detecção de Objetos. Universidade de Lisboa, 2013. Disponível em: <http://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/10294/1/ulfc106098_tm_Sandra_Silva.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2018.
- TORRES, J. N. C.; COIMBRA, R. S. C.; MELO, D. S.; FERREIRA, M. I. P. A Lagoa Imboacica: proposta de criação de uma unidade de conservação como estratégia de proteção adicional do ecossistema. Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego, Campos dos Goytacazes/RJ, v. 6 n. 1, p. 29 – 42, jan. / jun. 2012.

USE OF PROPORTIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVE CONTROLLER TO AUTOMATED NAVIGATION IN SMALL VESSELS

Abstract. *This work presents the development of an automated navigation system to control the behavior of a small vessel that will be used for environmental data acquisition in coastal lagoons. The algorithm uses the technique called “Line of Sight” with route correction generated by a Proportional-Integral-Derivative (PID) controller to achieve the destination coordinates. Tests were performed simulating the occurrence of random errors that may occur due to the presence of natural interference, such as waves and wind.*

Keywords: *Line of Sight, PID, vessel.*