



DESENVOLVIMENTO DE UM MECANISMO DE CONTROLE DE ACELERAÇÃO PARA MOTORES BLDC EM APLICAÇÕES MARÍTIMAS DE PEQUENO PORTE

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2024.5096

Autores: ANDRE LUIZ DE CARVALHO BARAL, TUANI DA SILVA CARVALHO, CINTIA DE FARIA FERREIRA CARRARO

Resumo: Este artigo apresenta o desenvolvimento de um mecanismo de controle de aceleração para motores Brushless DC (BLDC) em veículos aquáticos elétricos de pequeno porte. Uma necessidade identificada pela equipe "Reis do Sol" de barco solar do CEFET/RJ campus Angra dos Reis, é a falta de um mecanismo de aceleração eficiente e prático que reconhecida como um obstáculo para o progresso deste projeto e, portanto, a disciplina Projetos de Engenharia Elétrica do curso Engenharia Elétrica abraçou essa demanda do mercado náutico elétrico. O estudo investiga uma técnica eficiente e sustentável de controle de aceleração para otimizar o desempenho dos motores BLDC em ambientes aquáticos, levando em consideração fatores, como resposta dinâmica, eficiência energética, segurança operacional e resistência à corrosão. Para alcançar esse objetivo, são explorados métodos avançados, como o controle vetorial de velocidade por efeito Hall, um mecanismo de travamento bidirecional por catraca e a utilização da impressão 3D. Essas abordagens visam aprimorar a precisão e a estabilidade do sistema de acionamento. Além disso, são discutidos desafios específicos relacionados ao controle de velocidade em veículos aquáticos, como resistência à água, exposição aos raios UV e, principalmente, a manutenção da estabilidade da velocidade. Os resultados desta pesquisa e prototipagem têm o potencial de contribuir significativamente para o avanço da tecnologia de controle de velocidade em embarcações elétricas de pequeno porte, impulsionando a sustentabilidade e a eficiência energética no transporte aquático.

Palavras-chave: Acelerador, Veículos elétricos, Embarcações sustentáveis, Impressão 3D

DESENVOLVIMENTO DE UM MECANISMO DE CONTROLE DE ACELERAÇÃO PARA MOTORES BLDC EM APLICAÇÕES MARÍTIMAS DE PEQUENO PORTE

1 INTRODUÇÃO

O crescimento exponencial do desenvolvimento eletroeletrônico, juntamente com a necessidade de alternativas sustentáveis para a locomoção, traz um cenário de corrida para o desenvolvimento e otimização dos veículos elétricos. Com isso, o consumo de energia elétrica tem aumentado ano após ano nos países de modo geral, inclusive no Brasil, devido ao intenso uso de tecnologias eletrônicas seja na indústria, no comércio ou nas residências.

Deste modo, o uso de energias alternativas, dentre elas a eólica e a fotovoltaica, tem despertado interesse crescente e redução dos custos iniciais, tornando-se viável em pequenas ou grandes escalas (SILVA; CORREA; BATSTA, 2013).

A utilização da energia solar é uma ótima alternativa para a geração de energia devido às condições climáticas no qual o nosso país está inserido. Esse tipo de energia não tem somente aplicações residenciais e industriais, mas também, tem sua utilização em veículos elétricos. Visando isto, o Desafio Solar Brasil (DSB), que é um projeto de extensão universitária que organiza uma competição de barcos movidos à energia solar, foi criado com objetivo de estimular o desenvolvimento de tecnologias e aplicações das fontes alternativas de energia em embarcações, através do esporte e educação em tecnologia e meio ambiental (DSB, 2023).

A equipe Reis do Sol da instituição de ensino CEFET/RJ campus Angra dos Reis, criada em 2016, segue desde então no desenvolvimento e otimização de seu barco solar para o DSB e foi-se identificado uma falta significativa de peças de reposição e até mesmo peças adaptadas para o veículo náutico solar, principalmente, para o mecanismo de controle de velocidade (acelerador), tendo assim que utilizar peças que não trazem precisão e segurança para navegação.

Os veículos elétricos como motos, scooters e bicicletas atuais utilizam aceleradores que permitem o controle da velocidade utilizando um sensor Hall que a partir da variação de um campo magnético entrega uma variação de tensão, onde por sua vez controla a velocidade do veículo, ou seja, a corrente que será enviada da controladora para o motor. (CRESCENTINI; SYEDA; GIBIINO, 2021).

Diante do exposto, a utilização do método de controle por efeito Hall se demonstra o mais indicado, tendo em vista que os ESCs¹ e motores utilizados são semelhantes com os que são utilizados nas motos elétricas, tendo uma leve diferença no modo de utilização prática. Onde os aceleradores convencionais utilizam de uma mola de retorno, pois para veículos terrestres não existe a necessidade de uma aceleração constante para manter o movimento, sendo essa a dificuldade de utilizá-los em barcos.

Assim, este trabalho tem como objetivo o estudo e desenvolvimento de um acelerador tecnológico utilizando para a elaboração o software Solidworks e para a construção a tecnologia de impressão 3D. Tendo em vista, ser resistente e sustentável atendendo as demandas em questão e utilizando os conhecimentos adquiridos na disciplina Projetos em engenharia elétrica do curso de Engenharia elétrica e mecanismos do curso de engenharia mecânica do CEFET/RJ, campus Angra dos Reis.

¹ electronic system controller

2 METODOLOGIA

Foi realizado uma análise de sistemas já implementado em scooters, motos e autopropelidos² que possuem sistemas de propulsão e potências satisfatórias para uso em pequenas embarcações.

Esses veículos utilizam um acelerador de punho com retorno por mola, ride-by-wire³ e formato anatômico característico de motocicletas e semelhantes, demonstrado na figura 1. Onde, por sua vez, estes sistemas recebem uma tensão de alimentação do ESC e retorna uma resposta linear que varia de zero à tensão de entrada.

Figura 1 – Acelerador da scooter x14 citycoco.

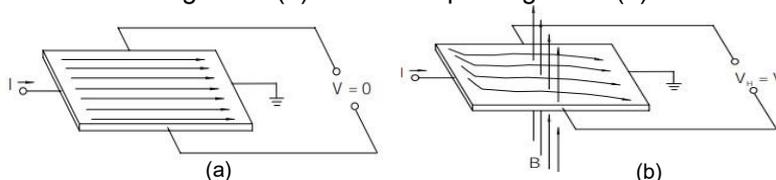


Fonte: TECNOLOGIA, T. Acelerador e manopla peças scooter elétrica citycoco - GoO Elétricos

2.1 Efeito hall

O efeito hall foi descoberto por Dr. Edwin Hall em 1879, que consiste em uma tensão gerada pela interação de um campo magnético a um elemento condutor com uma corrente aplicada. Quando esse condutor é submetido a um campo magnético, uma tensão será gerada perpendicular à ambos. (EDWARD RAMSDEN, 2006). Demonstrado na Figura 2.

Figura 2 – Princípio do efeito Hall, sem campo magnético (a) e com campo magnético (b)



Fonte: MICRO SWITCH Sensing and Control HALL EFFECT SENSING AND APPLICATION

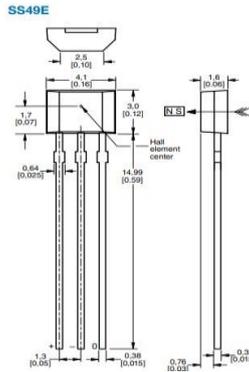
Sensor hall

Utilizando dessa propriedade, criou-se um sensor capaz de medir a presença, intensidade e orientação de um campo magnético denominado de sensor hall. Em aceleradores são necessárias as propriedades de medir intensidade com variação de tensão. E visto isso, a principal escolha por custo e facilidade operacional para essa função é o sensor de efeito hall linear SS49E com encapsulamento TO-92, mostrado na figura 3.

² o veículo que tem acelerador e pedal assistido é um veículo autopropelido, caso sua velocidade máxima de fabricação não seja superior a 32 km/h, não tenha largura superior a 70 cm e distância entre eixos maior que 130 cm.

³ nome em inglês do acelerador eletrônico. Ele substitui o cabo do acelerador mecânico por fios.

Figura 3 – Sensor hall SS49E TO-92

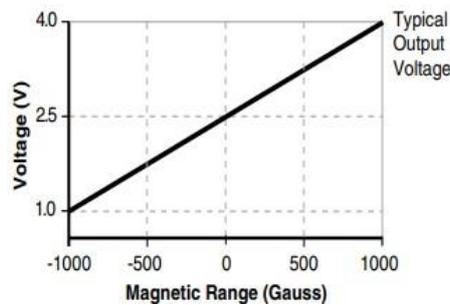


Fonte: SS39ET/SS49E/SS59ET Series Linear Halleffect Sensor ICs honeywell datasheet

Esse sensor se comporta de forma aproximada a uma chave aberta, quando um campo norte estiver perpendicular à face sensora, e uma chave fechada quando um campo sul estiver perpendicular à sua face. Havendo um campo paralelo à face sensora ou a não existência de um campo, a tensão de retorno será metade do VCC.

Nos ESCs comumente encontrados no mercado para a aplicação proposta, entregam uma tensão VCC de 5V e o sensor SS49E retornará uma variação de tensão de aproximadamente 1V à 4V, a partir da variação da posição do imã nas proporções da figura 4.

Figura 4 – Gráfico tensão x densidade de campo



Fonte: SS39ET/SS49E/SS59ET Series Linear Halleffect Sensor ICs honeywell datasheet

2.2 Protótipo

Buscando melhor atender as demandas de uma embarcação de pequeno porte, o design escolhido que supre as necessidades de controle específicos e ergonomia para o condutor, foi o de alavanca com fixação lateral.

Pensando nisso, o protótipo irá atender as especificações ergonômicas e mecânicas para a embarcação, porém, integrando a tecnologia citada no tópico 2.1

Elemento magnético

Um campo magnético variável e bem construído é necessário para a precisão de leitura do sensor, sendo este o maior desafio para a construção do dispositivo.

Para garantir a precisão foi utilizado um imã com formato curvo como na figura 5, onde cada polo se encontra nas pontas desse imã o que proporciona o sensoriamento de apenas

um campo onde a variação de orientação do campo em relação ao sensor se dá a partir da movimentação do sensor indo do polo Norte ao polo Sul do ímã em uma face perpendicular aos polos.

Figura 5 – Ímã curvo

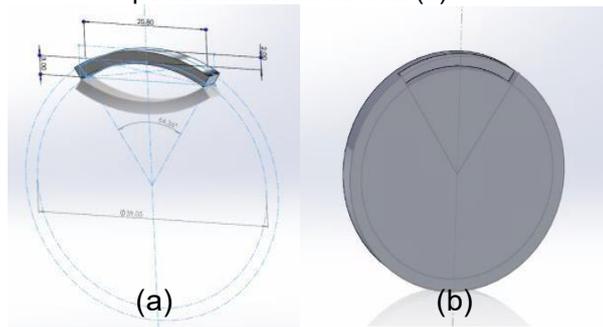


Fonte: Autoria própria

2.3 Projeto

O desenho teve-se todo seu desenvolvimento no software SolidWorks a partir do ímã e do sensor, um esboço foi desenvolvido para ser o pilar principal, figura 6 (a), onde a partir dele, todas as outras peças foram desenvolvidas e fixadas, como é o caso do disco base para o seu posicionamento (b).

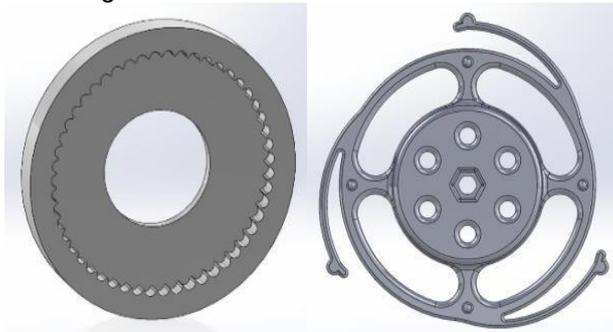
Figura 6 – Desenho do Ímã (a) Disco base para posicionamento do ímã (b)



Fonte: Autoria própria

Um segundo ponto primordial, para esse protótipo, é o mecanismo que realize travamento da posição do eixo para que mantenha um valor fixo de tensão de saída para que o motor com uma potência constante em cada posição do acelerador, assim temos a catraca fixa e a móvel da figura 7 e 8.

Figura 7 – Catraca fixa e catraca móvel



Fonte: Autoria própria

Figura 8 – Montagem da catraca posicionadora bidirecional



Fonte: Autoria própria

Todo o sistema de mensura demanda por precisão em métodos construtivos, robustez e planejamento para uma manutenção mais rápida e fácil, tornando interessante a adição de modularidade.

A metodologia de design seguiu a seguinte ordem:

- Posicionar o sensor o mais próximo o possível do ímã
- Fixar corretamente e de forma robusta o sensor.
- Proteger contra água e esforços físicos.
- Limitar a rotação do eixo que possui o ímã acoplado, para que a mensura se dê de forma correta

E com isso temos um mecanismo composto por diversos componentes, cada um com sua respectiva função, como mostrado na figura 9 e a legenda no quadro 1.

Figura 9 – Conjunto de sensoriamento



Fonte: Autoria própria

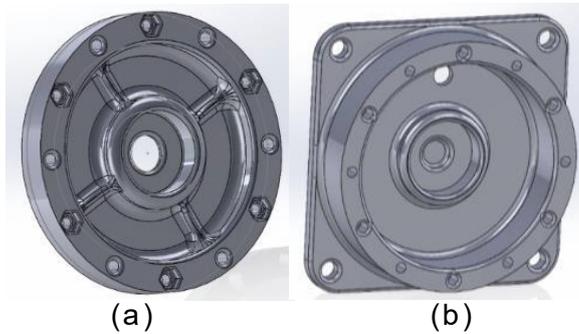
Quadro 1 – Elementos de parte sensora

Componente	Cor
Suporte para ímã	azul
Suporte do sensor hall	vermelho
Limitado maior	amarelo
Limitador menor	verde
Capa do sensor hall	Transparente
catraca	cinza

Fonte: Autoria própria

Uma Capa frontal e traseira, figura 10, foi desenvolvida para que possua rolamentos 608zz para centralizar o eixo, buscando garantir uma resistência à água, proteção mecânica e aumentar a integridade estrutural.

Figura 10 – Capa frontal (a) e capa traseira (b)



Fonte: Autoria própria

Uma alavanca de comando ergonômica foi necessária para fazer a interação de dispositivo e ser humano, como visto na figura 11.

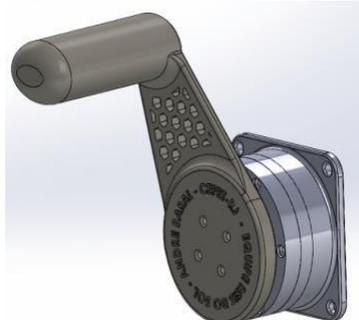
Figura 11 – Alavanca de comando



Fonte: Autoria própria

Juntando todas as peças temos um projeto de acelerador, figura 12, com múltiplas peças de forma modular e de fácil montagem e manutenção.

Figura 12– Acelerador náutico



Fonte: Autoria própria

Todo o design foi dimensionado para atender as particularidades do material escolhido para construção.

2.4 Impressão 3D

Toda estrutura é baseada em impressão 3D, o que a torna reciclável, resistente à corrosão, leve, fácil manuseio e de baixo custo.

Toda impressão foi realizada na impressora *GTMAX A1V2*, figura 13, no filamento PETg onde suas características estão respectivamente representadas nos dois quadros abaixo.

Impressora

A impressora utilizada foi a *GTmax3D Core A1V2* com as seguintes especificações no quadro 2.

Quadro 2 – Impressora

Característica	GTmax3D A1V2
Sistema de impressão	Bowden
Qualidade de impressão	0,05mm a 0,32mm
gabinete	Em aço e tampas em acrílico
Hot-end	All metal
bico	volcano
Mesa aquecida	De alumínio com tampo de vidro
Temperatura de mesa	Até 135C°
Temperatura de bico	Até 295C°

Fonte: Impressora 3D Pro - GTMax3D Core A1v2

Figura 13– Impressora A1V2



Fonte: Impressora 3D Pro - GTMax3D Core A1v2

Material

O material de impressão utilizado foi o PETg, figura 14, com as seguintes características para impressão no quadro 3.

Quadro 3 – Características do PETg da GTmax3D

Curso	Turno
Marca	GTmax3D
Temperatura de bico	225C° a 270C°
Temperatura de mesa	80 à 95C°
Resistência à UV	sim
Reciclável	sim

Fonte: Filamento PETG 1.75mm GTMax3D

Figura 14 – Filamento PETg



Fonte: Filamento PETG 1.75mm GTMax3D

O programa utilizado para impressão das peças foi o UltiMaker Cura, essa é uma fatiadora gratuita proposta pela própria fabricante, onde se encontra na versão 5.5.0 e que para o material foram utilizadas as seguintes configurações mostradas no quadro 4.

Quadro 4 – Configurações de impressão

Curso	Turno
Altura de camada	0,2mm
Número de paredes	3
preenchimento	20% - ziguezague
bico	240C°
mesa	75C°
Velocidade de impressão	90mm/s
retração	4,8mm a 25mm/s
Ventoinha de refrigeração	80%

Fonte: Autoria própria

2.5 Teste

Após impressão, foi realizada a solda dos terminais do sensor, figura 15, iniciou-se a montagem e o sensor foi posicionado para realizar um teste de funcionamento.

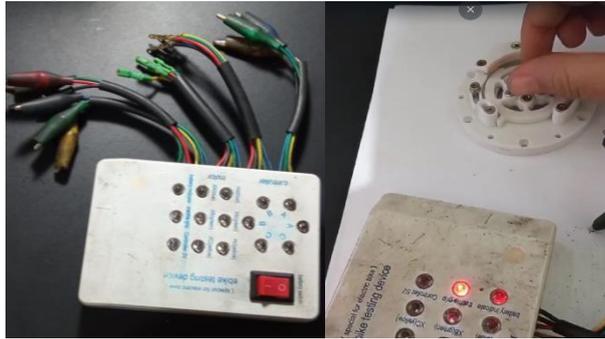
Figura 15 – Processo de solda de terminais



Fonte: Autoria própria

Com a montagem concluída, testes se demonstraram necessários. Onde, para isso, iniciamos o teste para averiguar se o componente estava funcionando e variando a saída de tensão, e para isso foi utilizado um aparelho já conhecido em procedimento de manutenção de scooters e motocicletas, conhecido como E-bike tester, onde ele irá indicar se o sensor está ligando, isso com um led que acende e alterna a intensidade luminosa com a variação de saída do acelerador, figura 16.

Figura 16 –E-bike tester (a) e teste realizado (b)

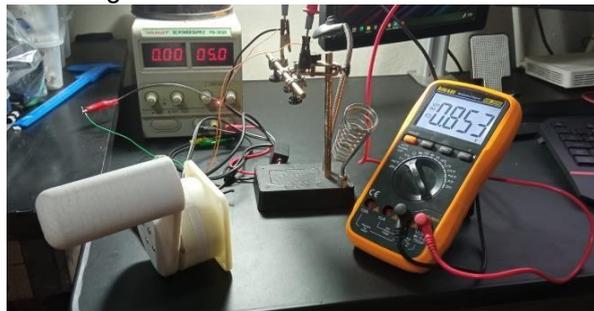


Fonte: Autoria própria

Com o sensor funcionando, o próximo teste foi do funcionamento do travamento com catraca e se ele limitava de forma linear a variação de tensão, figura 17.

Para isso foi utilizado uma fonte de bancada yaxun PS-305D a 5V e um multímetro Hikari HM-2090 para mensurar o valor do sinal de saída do sensor.

Figura 17 – Teste de sinal de saída



Fonte: Autoria própria

3 RESULTADOS

Com os dados retirados do teste de sinal de saída, tabela 1, foi possível a análise da linearidade da tensão gerando um gráfico para melhor visualização.

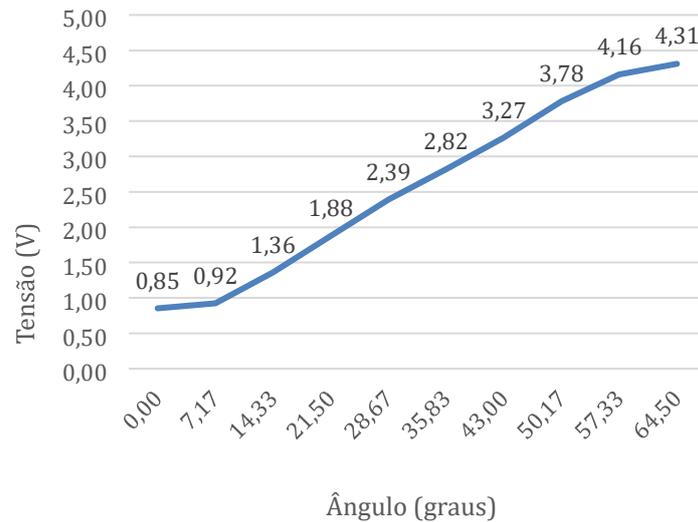
Tabela 1 - Tensão de saída do sensor hall em função do ângulo da alavanca

Ângulo (Graus)	Tensão de Saída (V)
0,00	0,85
7,17	0,92
14,33	1,36
21,50	1,88
28,67	2,39
35,83	2,82
43,00	3,27
50,17	3,78
57,33	4,16
64,50	4,31

Fonte: Autoria própria

O ângulo da alavanca foi deduzido a partir do ângulo de atuação do mecanismo de $64,5^\circ$ e o passe de 9 dentes da catraca dentro deste ângulo, sendo um mecanismo simétrico temos cada passe com, aproximadamente, $7,17^\circ$ cada, temos a linearidade mostrada no gráfico 1.

Gráfico 1- Tensão de saída do sensor hall em função do ângulo da alavanca



Fonte: Autoria própria

É importante levar em conta que o sensor tem sensibilidade eletrostática, levando assim a uma pequena margem de erro na análise, porém levando em consideração o datasheet do sensor usado, temos que o resultado pode ser considerado aceitável já que podemos ver uma linearidade no sinal de saída.

Já o protótipo final montado ficou conforme o esperado mostrado na figura 19 abaixo, toda a fixação foi feita com parafusos inox e porcas sextavadas.

Figura 18 – Protótipo final



Fonte: Autoria própria

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os parâmetros esperados foram alcançados de forma satisfatória, todas as peças possuem robustez de construção, bom acabamento e integridade dimensional. Os dados entregues de saída estão dentro dos parâmetros estimados pelo fabricante e o necessário para controlar o motor.

A catraca funcionou da forma esperada, trava o eixo nos pontos corretos e tem resistência ao movimento suficiente para garantir que manterá a posição.

Por final se demonstrou que é facilmente fabricado, montado e manipulado. Além de ser de materiais recicláveis e resistente às intempéries comumente encontradas no ambiente marítimo.

Os resultados dos testes em bancada foram suficientes para alegar que irá funcionar em situações de uso. Mas isso abre o próximo passo que será testar esse dispositivo nas embarcações.

REFERÊNCIAS

CRESCENTINI, M.; SYEDA, S. F.; GIBIINO, G. P. **Hall-Effect Current Sensors: Principles of Operation and Implementation Techniques**. IEEE Sensors Journal, p. 1– 1, 2021.

DSB O Desafio. Disponível em: <<https://desafiosolar.com.br/odesafio/>>. Acesso em: 09 maio. 2024.

Ed Ramsden (2006). **Hall-effect sensors: theory and applications** (2, illustrated ed.). Elsevier. ISBN 0-7506-7934-4.

Filamento PETG 1.75mm GTMax3D - Branco 1KG. Disponível em: <<https://www.gtmax3d.com.br/filamentos/petg/175mm-gtmax3d-branco>>. Acesso em: 14 maio. 2024

Impressora 3D Pro - GTMax3D Core A1v2 + 1 kg de filamento ABS. Disponível em: <<https://www.gtmax3d.com.br/impressora-3d-pro/gtmax3d-core-a1v2>>. Acesso em: 14 maio. 2024

MICRO SWITCH Sensing and Control **HALL EFFECT SENSING AND APPLICATION**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://denethor.wlu.ca/pc300/projects/sensors/hallbook.pdf>>. Acesso em: 10 maio. 2024

R. S. Popović (2004). **Hall effect devices** (2, illustrated ed.). CRC Press. ISBN 0- 75030855-9.

SILVA, Guilherme Goularte da; CORREA, Rodolfo Levien; BATISTA, Flávio Alberto Bardemaker. **Desenvolvimento do Barco Solar do IFSC**. *Revista Ilha Digital*. Florianópolis; v. 4, n. 4, jan. 2013. p. 91-96. Disponível em:

<<https://ilhadigital.florianopolis.ifsc.edu.br/index.php/ilhadigital/article/view/45>> Acesso em: 10 maio. 2024.

SS39ET/SS49E/SS59ET Series Linear Hall-effect Sensor ICs. [s.l: s.n.], 2015 Disponível em: <<https://prod-edam.honeywell.com/content/dam/honeywell-edam/sps/siot/enus/products/sensors/magnetic-sensors/linear-and-angle-sensor-ics/common/documents/sps-siot-ss39et-ss49e-ss59et-product-sheet-005850-3-en-ciid50359.pdf>>. Acesso em: 08 maio. 2024

SUZURIKAWA, J. et al. Estimation of Steering and Throttle Angles of a Motorized Mobility Scooter with Inertial Measurement Units for Continuous Quantification of Driving Operation. *Sensors*, v. 22, n. 9, p. 3161, 20 abr. 2022.

TECNOLOGIA, T. **Acelerador e manopla peças scooter elétrica citycoco - GoO Elétricos - Loja Virtual.** Disponível em: <<https://www.fvn.com.br/acessorios/manopla-deacelerador>>. Acesso em: 09 maio. 2024.

DEVELOPMENT OF AN ACCELERATION CONTROL MECHANISM FOR BLDC ENGINES IN SMALL MARINE APPLICATIONS

Abstract: *This article presents the development of an acceleration control mechanism for Brushless DC (BLDC) motors in small electric water vehicles. A need identified by the "Reis do Sol" solar boat team at CEFET/RJ campus Angra dos Reis, is the lack of an efficient and practical acceleration mechanism which is recognized as an obstacle to the progress of this project and, therefore, the Projects discipline in Electrical Engineering of the Electrical Engineering course embraced this demand from the electrical nautical market.*

The study investigates an efficient and sustainable acceleration control technique to optimize the performance of BLDC motors in aquatic environments, considering factors such as dynamic response, energy efficiency, operational safety, and corrosion resistance. To achieve this goal, advanced methods are explored, such as Hall effect vector speed control, a bidirectional ratchet locking mechanism and the use of 3D printing. These approaches aim to improve the accuracy and stability of the drive system.

Furthermore, specific challenges related to speed control in water vehicles are discussed, such as water resistance, exposure to UV rays and, mainly, maintaining speed stability. The results of this research and prototyping have the potential to significantly contribute to the advancement of speed control technology on small electric vessels, driving sustainability and energy efficiency in water transport.

Keywords: *Accelerator, Electric vehicles, sustainable vessels, 3D printing*

