

UTILIZAÇÃO DE UM FILTRO COMPLEMENTAR JUNTO AO SENSOR MPU 6050 *USING A COMPLEMENTARY FILTER WITH THE MPU 6050 SENSOR*

Filipe Honório Varaschim¹ Jefferson Wilhelm Meyer Soares² Felipe Augusto de Aguiar Possoli³ Luiz Eduardo Pivovar⁴ Ricardo Breganon⁵ Uiliam Nelson Lenzion Tomaz Alves⁶ 

Resumo: A utilização de sensores sempre foi indispensável para o desenvolvimento de sistemas de controle em malha fechada. Além disso, os conceitos que envolvem os temas de cálculo angular são importantes elementos para estudos e pesquisas em cursos de engenharia de controle e automação e áreas afins. O sensor MPU 6050 é um dos mais populares para a detecção de ângulo de inclinação e velocidade angular. Esse sensor possui um acelerômetro e um giroscópio que podem ser utilizados na medição de ângulo, porém o acelerômetro possui ruídos em sua medição, e o giroscópio, acumula desvio de medição que atrapalha na obtenção de um ângulo preciso. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo apresentar os principais conceitos de utilização de um filtro complementar para agregar os sinais do giroscópio e acelerômetro, presentes no sensor, para obter uma medição de ângulo mais precisa do que os sinais individuais. Para isto, o sensor MPU 6050 foi ligado a um Arduino em conjunto com o *software* Matlab/Simulink®, onde aplicou-se um filtro complementar de modo a mitigar os ruídos e sinais indesejados. Os resultados mostram que esta abordagem é uma opção válida para a aplicação de um filtro complementar juntamente com este tipo de sensor.

Palavras-chave: Filtro Complementar, MPU 6050, Acelerômetro, Giroscópio.

¹ Discente do curso de Engenharia de Controle e Automação, IFPR, Jacarezinho, Paraná, filipe_varaschim@hotmail.com.

² Mestre em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, IFPR, Jacarezinho, Paraná, jefferson.soares@ifpr.edu.br.

³ Mestre em Engenharia Mecânica e de Materiais, IFPR, Jacarezinho, Paraná, felipe.possoli@ifpr.edu.br.

⁴ Mestre em Engenharia Mecânica, IFPR, Jacarezinho, Paraná, luiz.pivovar@ifpr.edu.br.

⁵ Doutor em Engenharia Mecânica, IFPR, Jacarezinho, Paraná, ricardo.breganon@ifpr.edu.br.

⁶ Doutor em Engenharia Elétrica, IFPR, Jacarezinho, Paraná, uiliam.alves@ifpr.edu.br.

Abstract: The use of sensors has always been essential for the development of closed-loop control systems. In addition, the concepts that involve the themes of angular calculation are important elements for studies and research in control and automation engineering courses and related areas. The MPU 6050 sensor is one of the most popular for detecting tilt angle and angular velocity. This sensor has an accelerometer and a gyroscope that can be used to measure the angle. Still, the accelerometer has noise in its measurement, and the gyroscope accumulates measurement deviation that interferes with obtaining a precise angle. In this context, this work aims to present the main concepts of using a complementary filter to aggregate the gyroscope and accelerometer signals present in the sensor to obtain a more accurate angle measurement than the individual signals. For this, the MPU 6050 sensor was connected to an Arduino together with the Matlab/Simulink® software, where a complementary filter was applied in order to mitigate noise and unwanted signals. The results show that this approach is a valid option for applying a complementary filter with this type of sensor.

Keywords: Complementary Filter, MPU 6050, Accelerometer, Gyroscope.

1 INTRODUÇÃO

Com o foco em melhor qualidade nos processos produtivos, o uso de sensores cada vez mais eficientes são indispensáveis. Uma das variáveis de interesse no controle de sistemas é a posição angular. Embora sensores como o giroscópio e o acelerômetro possam ser empregados na medição de ângulo de maneira separada, cada um deles, individualmente, possui erros de medição. A medida realizada utilizando acelerômetro possui alta taxa de ruídos, e a integração necessária para a obtenção do ângulo a partir dos sinais do giroscópio pode ocasionar um erro chamado de desvio (NAYLAMP MECATRONICS, 2016).

O presente trabalho tem por finalidade o estudo de um filtro complementar para o sensor MPU 6050, que contém um acelerômetro e um giroscópio integrados. Esse sensor permite medir a aceleração e o ângulo dos movimentos no sensor, sendo muito usado em smartphones, onde sua aplicação é na interpretação de comandos de gestos. Um filtro complementar foi usado para os dados fornecidos pelo giroscópio e pelo acelerômetro, e obter uma medição angular satisfatória. São empregados dados de ambos os sensores para minimizar os erros de desvio gerado na medição do ângulo pelo giroscópio, e também reduzir os ruídos característicos da medida proveniente do acelerômetro. Para isto, realiza-se uma fusão dos sinais dos sensores por meio de um filtro complementar, que elimina as características indesejadas de cada sensor, resultando em um sinal satisfatório de medida angular.

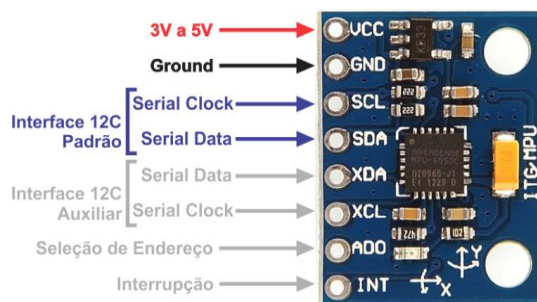
2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Sensor MPU 6050

O MPU 6050, Figura 1, é um sensor com um giroscópio que mede o ângulo de rotação em 3 eixos (X,Y,Z) e um acelerômetro que mede a aceleração em 3 eixos (X,Y,Z) incorporados em um mesmo chip, que utiliza o protocolo I2C para se comunicar (ALBAGHDADI e ALI, 2019). Algumas características básicas

do MPU-6050 são: Sensibilidade do giroscópio: 131 LSB/(°/s); Sensibilidade do acelerômetro: 16384 LSB/g; Escala completa do giroscópio $\pm 250^\circ/\text{s}$; Escala completa do acelerômetro: $\pm 2g$ (OLIVEIRA e GONÇALVES, 2017), sendo que outros valores para estas características possam ser configurados (INVENSENSE, 2013).

Figura 1 – Sensor MPU 6050.



Fonte: Invensense (2013).

Um acelerômetro funciona pelo princípio do efeito piezoelétrico, que é a capacidade de alguns cristais de gerarem tensão elétrica por resposta a uma pressão mecânica, ou seja, o acelerômetro é um transdutor que serve para medir a aceleração, detectar e medir vibrações que ocorrem em veículos, prédios etc. O acelerômetro pode fornecer medições de ângulo quando o sistema está em repouso, porém, quando ele gira, o acelerômetro tem uma resposta lenta e essa característica pode ser superada pelo giroscópio (FIRMAN, 2016).

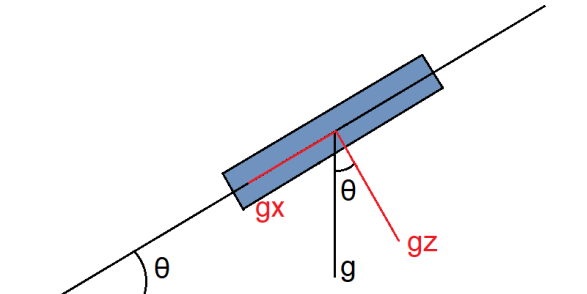
Para calcular o ângulo de inclinação com o acelerômetro leva-se em conta que a única força que atua no sensor é a força da gravidade, como mostrado na Figura 2. Portanto, os valores das componentes de força medidas pelo acelerômetro correspondem à gravidade, sendo o ângulo entre essas componentes a inclinação do plano do sensor, pois a gravidade é sempre vertical. Calcula-se o ângulo de acordo com (1) (LAGE e SEGUNDO, 2015).

$$\theta_x(k) = \tan^{-1} \left(\frac{g_x(k)}{\sqrt{g_x(k)^2 + g_z(k)^2}} \right), \quad (1)$$

sendo $\theta_x(k)$ o ângulo, $g_x(k)$ a componente da força da gravidade no eixo X e

$g_z(k)$, a componente no eixo Z, todos no instante kT_s , sendo T_s o período de amostragem.

Figura 2 – Componentes da aceleração da gravidade medidos por um acelerômetro.



Fonte: Naylamp Mecatronics (2016).

Um sensor giroscópio é um dispositivo para medir ou manter a orientação baseado no princípio da determinação do momento angular. O mecanismo presente neste sensor consiste em uma roda giratória com um disco interno que permanece estável até uma perturbação (FIRMAN, 2016).

O giroscópio fornece a velocidade angular, e para calcular o ângulo atual é necessário integrar esse valor e conhecer o ângulo inicial. Assim, o ângulo pode ser calculado numericamente a partir do sinal medido pelo giroscópio utilizando

$$\theta_x(k) = \theta_{x0} + \sum_{j=0}^k \omega_x(j) T_s, \quad (2)$$

sendo $\theta_x(k)$ o ângulo calculado no instante kT_s , θ_{x0} o ângulo inicial, $\omega_x(j)$ a velocidade angular medida pelo giroscópio do instante 0 até k , e T_s o período de amostragem da medição.

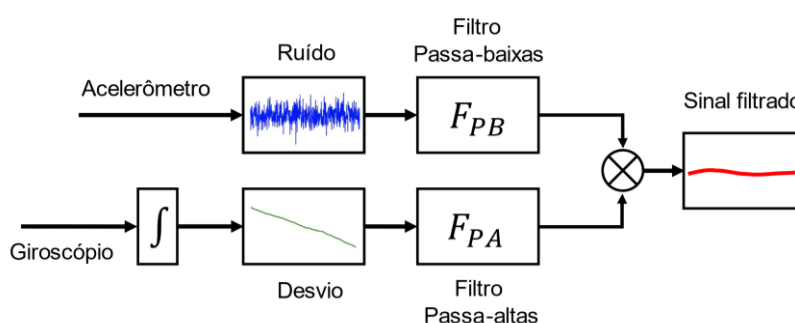
2.2 Filtro Complementar

O giroscópio pode medir mudanças rápidas de rotação, mas tem erro de estado estacionário. O acelerômetro pode obter com precisão o estado estacionário do ângulo, mas é mais lento na contabilização do movimento. Um

método simples de combinar essas duas medições é utilizar um filtro complementar.

O filtro complementar combina um filtro passa-baixas para o sinal do acelerômetro, de modo a mitigar os ruídos de medida, e um filtro passa-altas para o sinal do giroscópio, de modo a mitigar o erro de desvio. Um esquema para o filtro complementar aplicado aos sinais do sensor MPU 6050 é apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Esquemático de uso do filtro complementar nos sinais do sensor MPU 6050 para a obtenção do ângulo.



Fonte: adaptado de Mummadi *et al.* (2018).

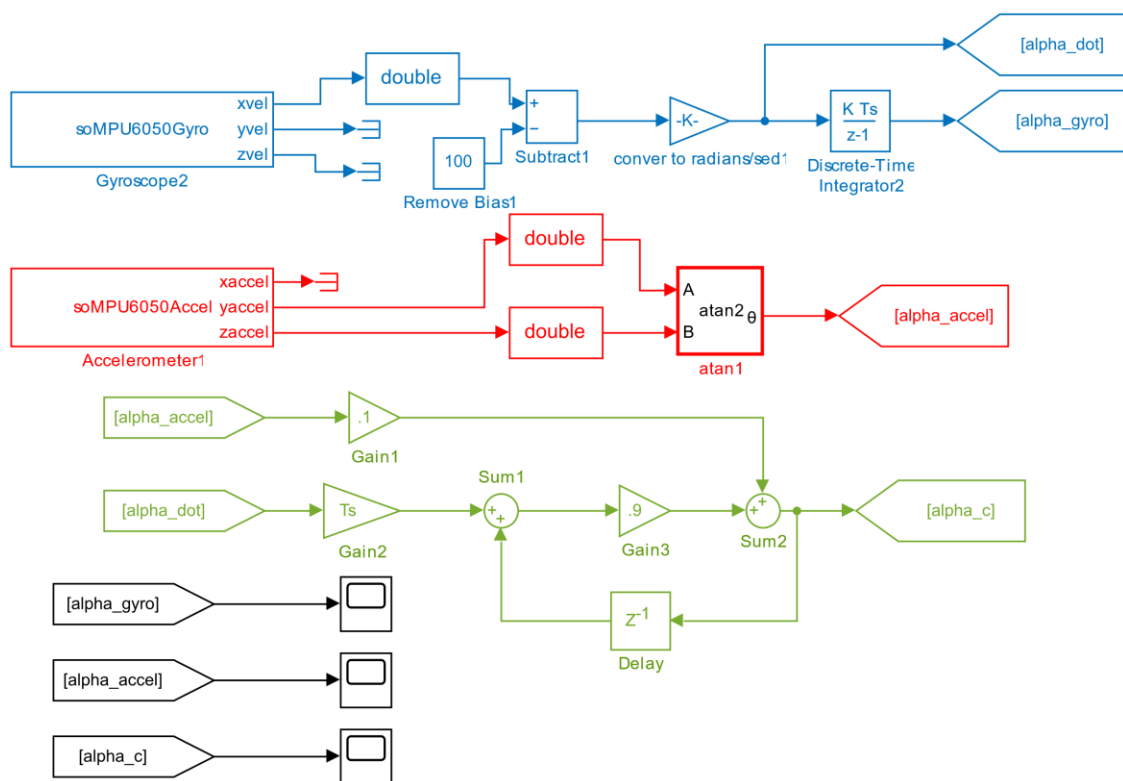
A implementação do filtro complementar é destacada na cor verde na Figura 4. Foi usada apenas a variável no eixo X, assim o sinal do giroscópio está sendo integrado para produzir a estimativa da posição angular (alpha_gyro). Se o *hardware* não ler exatamente zero enquanto estiver em repouso, pequenos valores causarão um aumento ou diminuição constante na leitura. Este é o “bias” do giroscópio. Um termo de polarização é usado para remover isso antes da integração, que no caso foi calibrado manualmente e encontrado experimentalmente um valor de 100 para “bias”, como mostrado na Figura 4 em azul.

O giroscópio precisa apenas de uma pequena correção para compensar o acúmulo de desvio, então a maior parte do ângulo é medida a partir do giroscópio, nesse caso 90%. Mas para dar conta de qualquer desvio que possa acumular, 10% do ângulo calculado vem do acelerômetro. Essa ponderação entre os sinais dos dois sensores é feita pelo filtro complementar, mostrado na Figura 4 em verde. Os pesos (0,1 e 0,9) podem ser ajustados para fornecer um

equilíbrio entre a velocidade de resposta e erro de estado estacionário, mas sua soma deve ser 1.

Os dados de 2 eixos do acelerômetro (yaccel, zaccel) são usados para calcular a posição angular. A força da gravidade é considerada constante: se a placa mede um componente Z de 9,81 m/s², mas nada no componente Y, ele sabe que está na posição horizontal. Se a aceleração em Z diminui, mas o acelerômetro em Y mede uma força não nula, pode-se calcular o ângulo usando um bloco arco-tangente, Equação (1), (MINSEG, 2021), como mostrado na Figura 4 em vermelho.

Figura 4 – Filtro complementar em diagrama de blocos no Matlab/Simulink®.



Fonte: adaptado de Minseg (2021).

A implementação do filtro complementar é mostrada na Figura 4 na cor verde. Observe que, sendo a saída do filtro o sinal após o bloco ‘sum2’ tem-se que

$$\alpha_c(k) = 0,1\alpha_a(k) + 0,9.T_s.\dot{\alpha}_g(t) + 0,9\alpha_c(k - 1), \quad (3)$$

na qual $\alpha_c(k)$ e $\alpha_c(k - 1)$ são as amostras do sinal do filtro complementar no instante k e $k - 1$, respectivamente, $\alpha_a(k)$ é a amostra do ângulo medido pelo acelerômetro, $\dot{\alpha}_g(t)$ é a derivada do ângulo, medida pelo giroscópio, e T_s o período de amostragem. Adotando-se a aproximação para $\dot{\alpha}_g(t)$ em tempo discreto dada por

$$\dot{\alpha}_g(t) = \frac{\alpha_g(k) - \alpha_g(k - 1)}{T_s}, \quad (4)$$

tem-se, substituindo (4) em (3), que

$$\alpha_c(k) = 0,1\alpha_a(t) + 0,9T_s \frac{\alpha_g(k) - \alpha_g(k - 1)}{T_s} + 0,9\alpha_c(k - 1). \quad (5)$$

Utilizando a transformada Z em (5) segue que

$$\alpha_c(z) = 0,1\alpha_a(z) + 0,9(\alpha_g(z) - z^{-1}\alpha_g(z)) + 0,9z^{-1}\alpha_c(z)$$

$$\alpha_c(z)(1 - 0,9z^{-1}) = 0,1\alpha_a(z) + 0,9(1 - z^{-1})\alpha_g(z)$$

$$\alpha_c(z) = \frac{0,1}{1 - 0,9z^{-1}}\alpha_a(z) + \frac{0,9(1 - z^{-1})}{1 - 0,9z^{-1}}\alpha_g(z)$$

$$\alpha_c(z) = \frac{0,1z}{z - 0,9}\alpha_a(z) + \frac{0,9(z - 1)}{z - 0,9}\alpha_g(z)$$

$$\alpha_c(z) = F_{PB}(z)\alpha_a(z) + F_{PA}(z)\alpha_g(z),$$

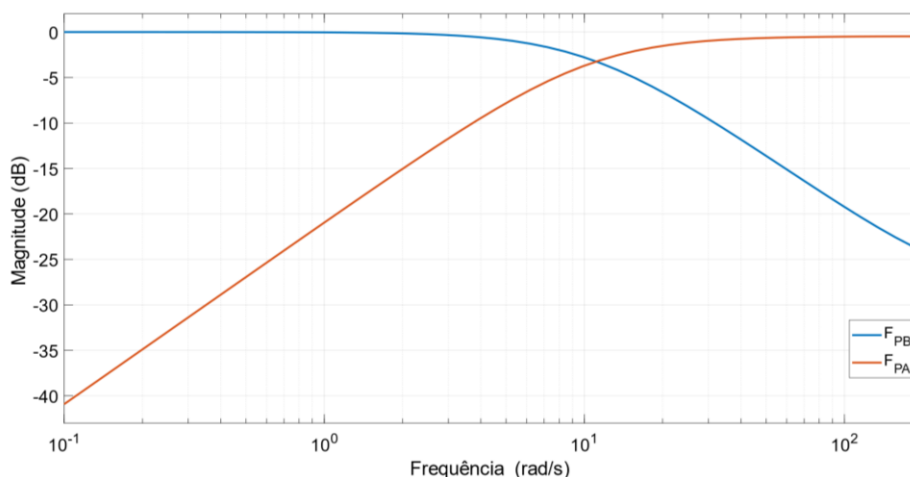
sendo

$$F_{PB} = \frac{0,1z}{z - 0,9} \text{ e } F_{PA} = \frac{0,9(z - 1)}{z - 0,9}. \quad (6)$$

Os diagramas de Bode de magnitude das funções $F_{PB}(z)$ e de $F_{PA}(z)$ são apresentados na Figura 5. Observe que $F_{PB}(z)$, a função de transferência entre

a saída do filtro complementar e o ângulo medido pelo acelerômetro, é um filtro passa-baixas, de modo a mitigar os erros devido a ruídos de alta frequência. A função de transferência entre o ângulo medido pelo giroscópio e a saída do filtro complementar é um filtro passa-altas, para mitigar o erro de desvio.

Figura 5 – Diagrama de Bode de magnitude do filtro passa-baixas (F_{PB}) e do filtro passa-altas (F_{PA}), dados por (6), do filtro complementar utilizado para os sinais do sensor MPU 6050.

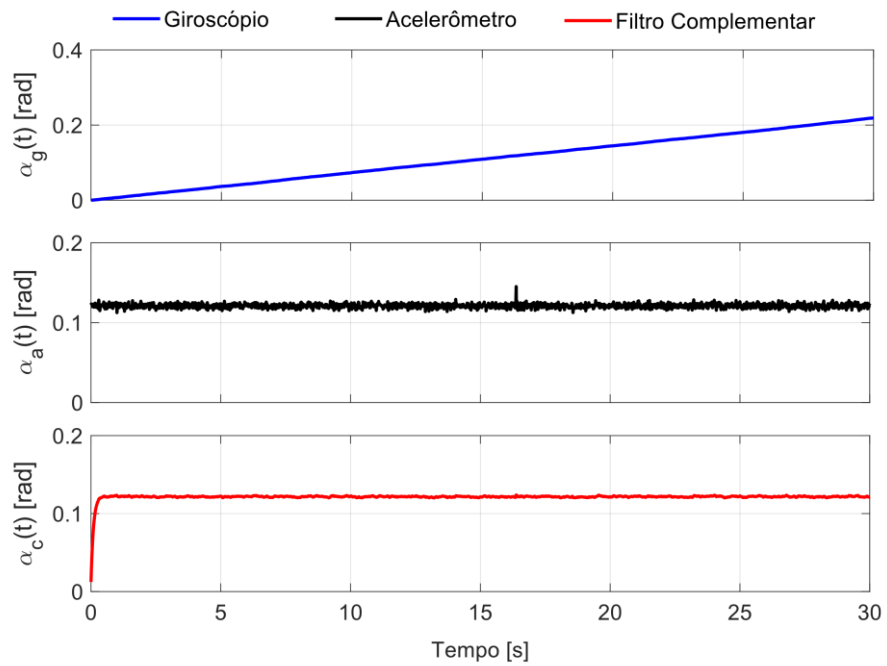


Fonte: Dos autores.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

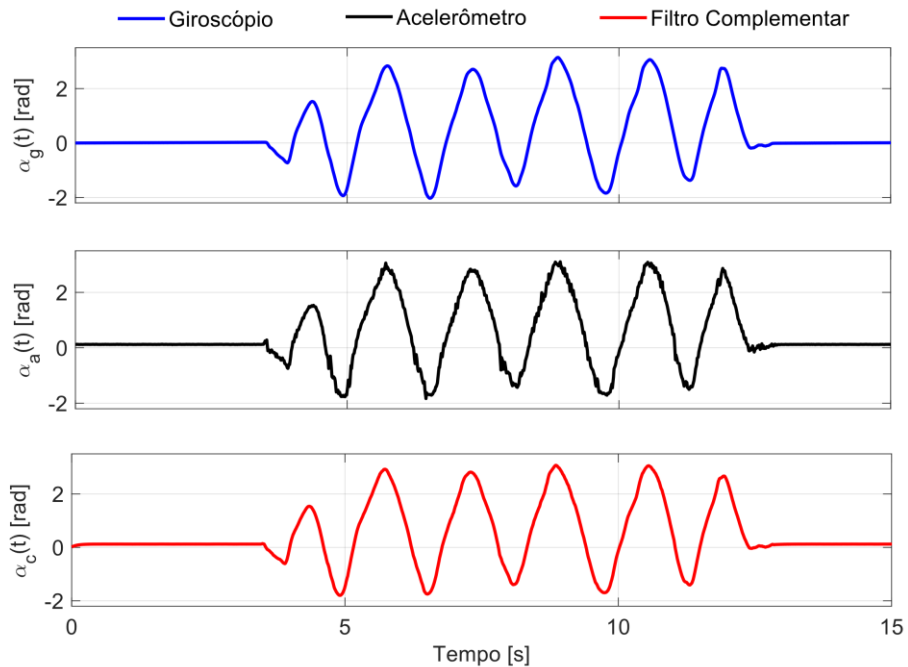
O ângulo medido utilizando o acelerômetro, o giroscópio, e com o filtro complementar são representadas nas Figuras 6 e 7. Na Figura 6 são apresentados os ângulos medidos a partir de um ensaio do sensor em repouso; na Figura 7, com o sensor sendo movimentado. Com a utilização do filtro complementar, tem-se uma resposta do sistema de medição angular satisfatória, com a suavização do erro estacionário gerado pelo acelerômetro, ou seja, um tipo de ruído gerado quando o acelerômetro está em repouso ou com movimentações suaves, e a diminuição do acúmulo de desvio do giroscópio, evidenciada na Figura 6.

Figura 6 – Resposta do sistema em repouso.



Fonte: Dos autores.

Figura 7 – Resposta do sistema com o filtro complementar.



Fonte: Dos autores.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o presente artigo, apresentou-se as principais características do sensor giroscópio e acelerômetro MPU 6050, *hardware* esse considerado de baixo custo, muito usado atualmente. Discutiu-se também aspectos de um filtro complementar para processar os sinais advindos desse sensor. Para fins de validação, foi apresentado o sinal de medida do ângulo do sensor com e sem o filtro complementar, e notou-se a melhora no sinal no que se trata de ruídos, erro de estado estacionário e acúmulo de desvio, tornando-o mais preciso e com o sinal mais suavizado em comparação com a não utilização do método.

REFERÊNCIAS

ALBAGHDADI, Ahmed F.; ALI, Abduladhem A. An Optimized Complementary Filter for An Inertial Measurement Unit Contain MPU6050 Sensor. Iraque, **Iraqi Journal for Electrical & Eletronic Engineering**, 2019.

FIRMAN, Beny. Implementasi sensor imu mpu6050 berbasis serial i2c pada self-balancing robot. Indonésia, **Jurnal Teknologi Technoscientia**, 2016.

INVENSENSE. **MPU-6000/6050 product specification**. Sunnyvale (CA), EUA, 2013.

LAGE, Vinícius N.; SEGUNDO, Alan K. R. **O uso de giroscópios e acelerômetros para a modelagem matemática de uma plataforma com dois graus de liberdade**. Ouro Preto: UFOP, 2015.

MINSEG. **The Miniature Balancing Robot: A Low-cos Mobile Lab Experiment Kit for Education**, 2021.

MUMMADI, Chaithanya K.; LEO, Frederic P. P.; VERMA, Keshav D.; KASIREDY, Shivaji; SCHOLL, Philipp M.; KEMPFLE, Jochen; LAERHOVEN, Kristof V. Real-Time and Embedded Detection of Hand Gestures with an IMU-Based Glove. Alemanha, **Informatics**, 2018.

NAYLAMP MECATRONICS. **Tutorial MPU6050, Acelerómetro y Giroscopio**, 2016. Disponível em: https://naylampmechatronics.com/blog/45_tutorial-mpu6050-acelerometro-y-giroscopio.html. Acessado em: 10/10/2022.

OLIVEIRA, Waldri S; GONÇALVES, Eduardo N. Implementação em C: Filtro de Kalman, Fusão de Sensores para Determinação de Ângulos. Formiga, **Revista Científica do IFMG**, 2017.

Edição especial – Simpósio de Engenharia de Controle e Automação - SIMECA
- IFPR

Enviado em: 26 nov. 2022

Aceito em: 30 nov. 2022

Editor responsável: Mateus das Neves Gomes