

Medição do Ângulo de Inclinação

Instrumentação Eletrônica para Engenharia

Felipe Costa Gomes, Davi Dantas Lopes

Engenharia Eletrônica

Universidade de Brasília - Faculdade do Gama

Gama, Distrito Federal

E-mails: 190012757@aluno.unb.br , 170031934@aluno.unb.br

Resumo—O propósito deste trabalho consiste em descrever o processo de medição do ângulo de inclinação de um plano utilizando o sensor acelerômetro e giroscópio MPU6050. O estudo tem como objetivo comparar duas estimativas do ângulo: uma obtida por meio da composição trigonométrica a partir dos dados do acelerômetro e outra por meio da integração numérica utilizando os dados do giroscópio. Ambas as estimativas são validadas através da comparação com um sistema de referência, o mesmo utilizado no relatório anterior para a calibração estática do sensor. Os resultados mostram as estimativas do ângulo de inclinação obtidas por ambos os métodos e sua comparação com o sistema de referência. As análises destacam a confiabilidade e precisão das medições realizadas.

palavras-chave: MPU6050. Acelerômetro. Giroscópio. Ângulo de inclinação. Composição trigonométrica. Integração numérica.

I. INTRODUÇÃO

A medição precisa do ângulo de inclinação é de fundamental importância em diversas áreas da engenharia e automação, sendo aplicada em robótica, sistemas de estabilização, veículos autônomos, entre outros. Nesse contexto, o sensor MPU6050 [1], que combina acelerômetro e giroscópio em um único dispositivo [2], tornou-se uma opção popular para essas aplicações devido à sua versatilidade e eficiência.

O objetivo deste trabalho é explorar o uso do sensor MPU6050 para a medição do ângulo de inclinação de um plano. Para tanto, serão empregadas duas estratégias distintas de cálculo do ângulo: a composição trigonométrica utilizando os dados do acelerômetro e a integração numérica com base nos dados do giroscópio. A motivação para a escolha dessa abordagem reside na necessidade de comparar e validar as estimativas do ângulo obtidas por ambos os métodos, assim como verificar sua concordância com um sistema de referência. Esse sistema de referência é o mesmo utilizado no procedimento de calibração estática do sensor, garantindo uma base confiável para a comparação das medições.

Os objetivos traçados para este estudo incluem:

- 1) Comparar as Estimativas de Ângulo: Realizar a medição do ângulo de inclinação utilizando a composição trigonométrica com base nos dados do acelerômetro e a integração numérica a partir dos dados do giroscópio.
- 2) Validar com Sistema de Referência: Comparar as estimativas de ângulo obtidas pelos dois métodos com um

sistema de referência utilizado na calibração, a fim de verificar a precisão das medições.

- 3) Analisar Resultados e Fontes de Erro: Analisar e discutir os resultados obtidos, identificando possíveis fontes de erro e fornecendo insights para aprimoramentos futuros.

Por fim, serão detalhadas a fundamentação teórica dos sensores envolvidos, a metodologia empregada na medição e análise dos resultados, assim como as discussões sobre as estimativas obtidas.

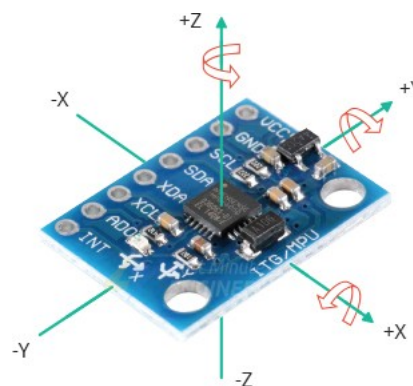


Figura 1. A MPU-6050 representa os 6 graus de liberdade por meio de 6 eixos, sendo 3 dedicados ao giroscópio e outros 3 dedicados ao acelerômetro.

II. METODOLOGIA

1) Preparação e Montagem:

Primeiramente, os equipamentos e materiais necessários serão reunidos, incluindo o sensor MPU6050, Arduino, suporte para fixação do sensor (conforme Fig. 2), e o sistema de referência utilizado durante o procedimento de calibração. O sensor MPU6050 será montado no suporte, assegurando que esteja adequadamente nivelado antes das medições.

2) Escolha do Plano e Posicionamento do Sensor:

O plano para a medição do ângulo de inclinação será selecionado. O sensor MPU6050 será posicionado de maneira adequada no plano escolhido, assegurando que o eixo Z do sensor esteja perpendicular ao plano de referência.

3) Coleta de Dados:

A coleta dos dados do acelerômetro e giroscópio da

MPU6050 será iniciada por meio do Arduino. Serão lidas as acelerações nos eixos X, Y e Z do acelerômetro, bem como as velocidades angulares em torno dos mesmos eixos do giroscópio.

- 4) **Cálculo do Ângulo de Inclinação pelo Acelerômetro:** A fórmula da composição trigonométrica, Eq. 1, será utilizada para calcular o ângulo de inclinação em cada eixo (X, Y e Z), fazendo uso do acelerômetro. Posteriormente, será realizado o ajuste utilizando os parâmetros de calibração ($Ganho$ e A_{offset}) obtidos no procedimento de calibração estática, visando melhorar a precisão da estimativa.

- 5) **Cálculo do Ângulo de Inclinação pelo Giroscópio** As leituras de velocidade angular para cada eixo (X, Y e Z) serão integradas numericamente ao longo do tempo para calcular o ângulo de inclinação, de acordo com a Eq. 3. Serão levados em consideração os possíveis erros de *drift* resultantes da integração.

- 6) **Comparação com o Sistema de Referência:** O sistema de referência foi utilizado para realizar a medição direta do ângulo de inclinação do plano. As estimativas de ângulo obtidas pelo acelerômetro e giroscópio foram comparadas com o valor medido pelo sistema de referência, avaliando a precisão e confiabilidade dos métodos de medição. Esse sistema de referência é apresentado na Fig. 2.

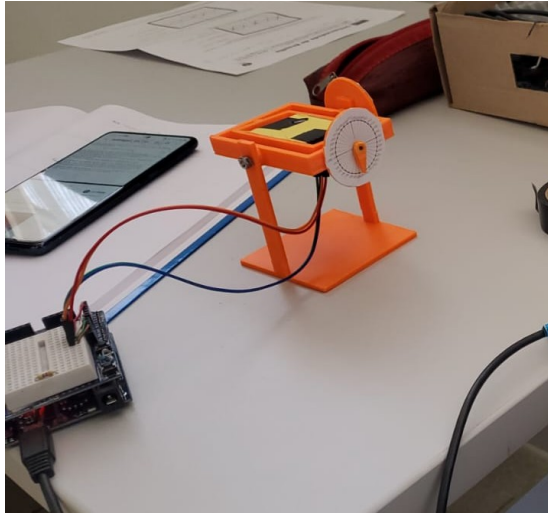


Figura 2. Sistema de referência utilizada no projeto para averiguar se os valores de ângulo estão corretos.

- 7) **Análise dos Resultados:**

As diferenças entre as estimativas de ângulo obtidas pelos dois métodos e o sistema de referência foram analisadas. Foram identificadas possíveis fontes de erro e discutida sua influência nos resultados.

Vale ressaltar que todos os códigos que foram gerados para a leitura dos dados e geração dos gráficos estão apresentados no repositório do GitHub dentro da pasta 'Ponto de Controle 3'.

III. CÁLCULO DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO

A medição do ângulo de inclinação utilizando o sensor MPU6050 é realizada combinando as informações provenientes do acelerômetro e do giroscópio. Cada sensor possui vantagens e limitações distintas, e a combinação de suas saídas permite obter uma estimativa mais precisa e confiável do ângulo de inclinação em relação à gravidade e ao plano de referência.

A. Cálculo do Ângulo de Inclinação pelo Acelerômetro

1) **Leitura do Acelerômetro:** As leituras do acelerômetro (A_X, A_Y, A_Z) fornecem os valores das acelerações nos três eixos.

2) **Cálculo do ângulo:** O acelerômetro do MPU6050 mede as acelerações nos três eixos espaciais (X, Y e Z). Quando a MPU6050 está em repouso e devidamente nivelada, a componente da aceleração gravitacional é diretamente medida pelo acelerômetro na direção do eixo Z, que é perpendicular ao plano de referência. Assumindo que o acelerômetro está idealmente calibrado, a magnitude da aceleração gravitacional (A_g) é igual a $1g$ ($9,81 \text{ m/s}^2$), considerando a aceleração da gravidade padrão na superfície da Terra.

Utilizando trigonometria, podemos calcular o ângulo de inclinação (θ_{acel}) do plano em relação à direção da gravidade a partir das leituras do acelerômetro nos eixos X, Y e Z:

$$\theta_{\text{acel}} = \arctan \left(\frac{A_{\text{eixo}}}{\sqrt{A_X^2 + A_Y^2 + A_Z^2}} \right) \quad (1)$$

Onde:

- θ_{acel} é o ângulo de inclinação estimado pelo acelerômetro no eixo em questão.
- A_X, A_Y, A_Z são as leituras do acelerômetro nos eixos X, Y e Z, respectivamente.
- A_{eixo} é o valor do acelerômetro no eixo de interesse (X, Y ou Z).

3) **Ajuste com base na calibração estática:** Após o cálculo do ângulo de inclinação utilizando o acelerômetro, é importante aplicar os devidos ajustes com base nos parâmetros de calibração ($Ganho$ e A_{offset}) obtidos durante o procedimento de calibração estática do sensor. Esses ajustes são necessários para corrigir possíveis desvios e erros sistemáticos nas medições, garantindo maior precisão na estimativa do ângulo.

4) **Conversão para graus:** Vale ressaltar que é necessário realizar a conversão do valor obtido para graus ($^\circ$). Para isso, é necessário utilizar a seguinte relação trigonométrica:

$$\text{angulo em graus} = \text{angulo em rad} \times \frac{180}{\pi} \quad (2)$$

B. Cálculo do Ângulo de Inclinação pelo Giroscópio

O cálculo do ângulo de inclinação pelo acelerômetro é baseado nas medições das acelerações gravitacionais nas três direções espaciais (X, Y e Z). Quando a MPU6050 está em repouso e devidamente nivelada, o acelerômetro registra apenas a componente da aceleração gravitacional ao longo do eixo Z, que é perpendicular ao plano de referência.

1) **Leitura do acelerômetro:** As leituras do acelerômetro (A_X, A_Y, A_Z) fornecem os valores das acelerações nos três eixos. Em repouso e nivelada, o valor da aceleração gravitacional (A_g) ao longo do eixo Z é igual a $1g$ ($9,81 \text{ m/s}^2$), considerando a aceleração da gravidade padrão na superfície da Terra.

2) **Cálculo do ângulo de inclinação:** Para calcular o ângulo de inclinação (θ_{giro}) a partir das leituras do giroscópio, realizamos a integração numérica das velocidades angulares ao longo do tempo. Supondo um intervalo de tempo discreto Δt entre as amostras, a integração é realizada da seguinte forma:

$$\theta_{\text{giro}} = \theta_{\text{giro}} + \omega_{\text{eixo}} \times \Delta t \quad (3)$$

Onde:

- θ_{giro} é o ângulo de inclinação estimado pelo giroscópio no eixo em questão (X, Y ou Z) em graus.
- ω_{eixo} é a leitura do giroscópio na velocidade angular no eixo de interesse (X, Y ou Z) em $^\circ/\text{s}$.
- Δt é o intervalo de tempo entre as amostras em segundos.

A integração é realizada a cada intervalo de tempo Δt , acumulando as variações de velocidade angular para atualizar o ângulo de inclinação estimado.

3) **Considerações sobre o Drift:** A integração numérica do giroscópio pode resultar em erros acumulados ao longo do tempo, conhecidos como "drift". Esses erros são causados por pequenas imprecisões nas leituras do giroscópio e podem levar a uma divergência significativa do valor estimado do ângulo de inclinação em relação ao valor real.

IV. RESULTADOS

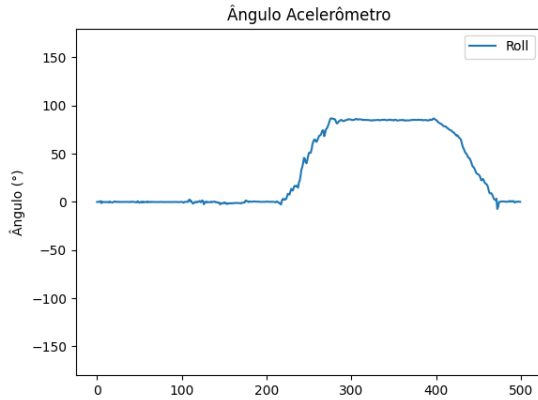


Figura 3. Saída da leitura de ângulo utilizando o acelerômetro.

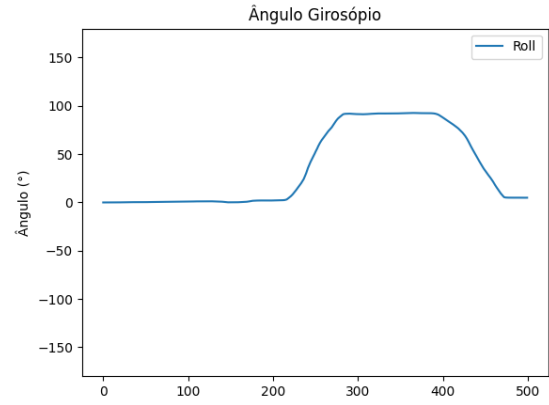


Figura 4. Saída da leitura de ângulo utilizando o giroscópio.

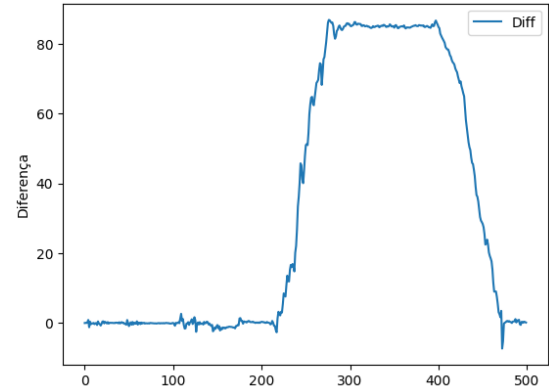


Figura 5. Diferença de cálculo do ângulo entre os sensores.

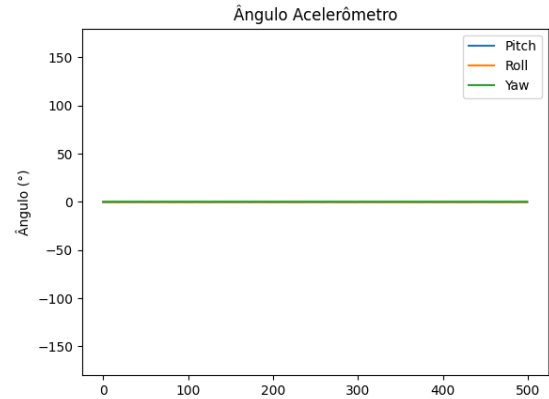


Figura 6. Ângulos estáticos extraído do sensor acelerômetro.

V. CONCLUSÕES

O presente relatório teve como objetivo descrever o processo de medição do ângulo de inclinação utilizando o sensor MPU6050, por meio do acelerômetro e giroscópio, bem como a comparação com um sistema de referência. Ao longo do estudo, obtivemos resultados satisfatórios em relação às medições realizadas pelo acelerômetro, que apresentaram uma boa precisão após a devida calibração estática. No entanto,

os resultados obtidos pelo giroscópio apresentaram um considerável de *drift*, diferentemente dos valores adquiridos pelo sensor acelerômetro, como demonstrado na figura 7 e na figura 6, comprometendo a precisão e confiabilidade das estimativas do ângulo de inclinação que podem ser analisadas a partir da diferença de resultados entre os sensores na figura 5.

Dessa forma, são recomendados futuros estudos para a implementação e configuração de filtros como por exemplo o o

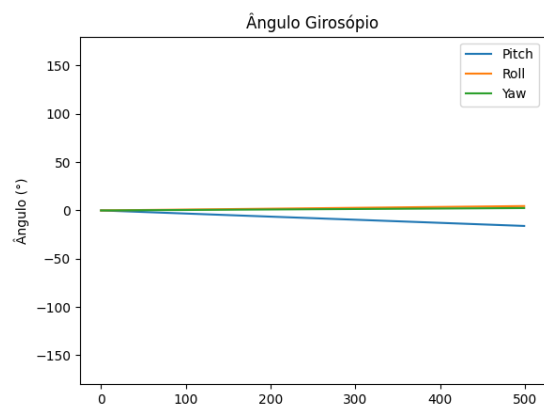


Figura 7. Ângulos estáticos extraído do sensor giroscópio.

Butterworth utilizado por [3], buscando aprimorar a precisão e estabilidade das estimativas do ângulo de inclinação, bem como a redução dos erros de drift do giroscópio.

REFERÊNCIAS

- [1] InvenSense, “Mpu-6000 and mpu-6050 product specification revision 3.4,” <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>, 2015, acesso em: 06 mai. 2023.
- [2] “Calibrating mpu6050,” <https://wired.chillibasket.com/2015/01/calibrating-mpu6050/>, 2015, acessado em: 18 de junho de 2023.
- [3] M. Garcia and R. Barbosa, “Análise do salto vertical com contramovimento utilizando sensores inerciais,” 2022.