

# Análise do Sensor MPU-6050: Acelerômetro e Giroscópio

Nathan Spínola Zeidan  
Universidade de Brasília-UnB  
180025864  
180025864@aluno.unb.br

João Vítor da Silva Fonseca  
Universidade de Brasília-UnB  
180113739  
180113739@aluno.unb.br

## I. REPOSITÓRIO

O repositório contendo os códigos utilizados para a execução deste projeto pode ser acessado através do seguinte link no GitHub: [https://github.com/NathanSpinola00/Instrumenta-o-Eletr-nica—UnB/tree/main].

## II. INTRODUÇÃO

A calibração é um procedimento essencial para assegurar que os instrumentos de medição ou sistemas forneçam resultados precisos e confiáveis. Basicamente, consiste em comparar as leituras de um instrumento com um padrão de referência conhecido para detectar e corrigir possíveis desvios ou erros.

Ela desempenha um papel crucial em áreas como ciência, engenharia, manufatura e instrumentação, onde medições confiáveis são fundamentais. Em setores como medicina, aviação, farmacêutica e energia nuclear, a calibração é ainda mais crítica por questões de segurança e saúde. Para cumprir regulamentações e manter a precisão das medições, a calibração regular é necessária.

Laboratórios certificados são responsáveis por conduzir procedimentos de calibração e emitir certificados que atestam a conformidade dos instrumentos testados. Esses certificados são geralmente exigidos por normas de qualidade, regulamentações e clientes. Além disso, a calibração contribui para a manutenção da qualidade e permite a detecção precoce de problemas, viabilizando ações preventivas.

## III. MÉTODO DE CALIBRAÇÃO

Antes de realizar a calibração da MPU-6050, primeiro é preciso entender a parte teórica do processo. Naturalmente o sensor vai sofrer por ruídos no sinal enviado e o erro sistemático. Para reduzir esses fatores que acabam gerando a imprecisão do aparelho, é necessário calcular duas variáveis que vão servir para compensar o erro sistemático. Essas variáveis são o ganho e o valor de offset do sensor.

Como identificado no material de consulta disponibilizado pela professora, o ganho é um parâmetro adimensional. No caso em que os movimentos no sensor somente se vejam afetados pela aceleração devida a gravidade, dentro do ponto de vista teórico, o ganho deve estar muito próximo de 1.

De acordo com o mesmo material, o valor de offset é o valor de aceleração fixo que afeta as leituras em cada eixo do sensor. Pode ser considerado um erro sistemático do sistema

No processo de calibração do sensor MPU-6050, os primeiros passos envolveram a determinação dos valores fixos na equação fundamental

$$A_{Saida} = Ganho \cdot A_{Referencia} + A_{offset} \quad (1)$$

Para isso, a coleta de 100 amostras em cada eixo do sensor foi realizada, considerando tanto o sentido positivo quanto o negativo. O sentido negativo refere-se à orientação contrária à gravidade, enquanto o sentido positivo representa a orientação a favor da gravidade.

Ao coletar essas amostras, um cubo imaginário de dados foi formado, abrangendo todas as direções possíveis do sensor. Este processo é análogo à representação visual da figura 1, onde as amostras são mapeadas nos diversos eixos.

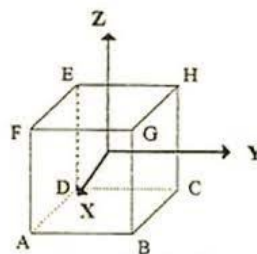


Fig. 1. Zona de coleta de amostras adotado

É importante notar que, embora o procedimento de coleta de amostras tenha sido simplificado para os propósitos deste projeto, recomenda-se uma abordagem mais abrangente durante a implementação de projetos para evitar "pontos cegos" na calibração. Idealmente, a coleta de amostras deve seguir um padrão esférico, conforme ilustrado na figura 2. Este formato permite abranger todas as possíveis orientações do sensor, minimizando assim os erros sistemáticos.

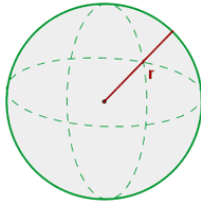


Fig. 2. Zona de coleta de amostras indicado

Uma vez adotado o método de calibração, precisamos encontrar a média das 100 amostras para cada eixo e sentido para contemplarmos o seguinte sistema de equações, onde a equação 2 é referente as amostras do eixo positivo e a equação 3 é referente ao eixo negativo

$$\bar{A}_{1g,i} = \text{Ganho}_i \times (1g) + A_{\text{offset},i} \quad (2)$$

$$\bar{A}_{-1g,i} = \text{Ganho}_i \times (-1g) + A_{\text{offset},i} \quad (3)$$

#### A. Códigos criados

Inicialmente, temos dois códigos escritos na linguagem C, usando o software Arduino IDE:

(1) Código `calculo_medio` - Responsável pela coleta das 100 amostras e pelo cálculo da média de cada eixo.

(2) Código `medicao_calibrada` - Realiza o cálculo do ganho e do offset para cada eixo, onde os valores fixos da média de cada eixo são inseridos no início do código. Após isso, o Código 2 lê os valores atuais dos eixos e realiza a compensação de acordo com os parâmetros de ganho e offset calculados.

#### B. Passo 1 - Coleta das 100 amostras

Para realizar este procedimento, o sensor foi posicionado em seis diferentes orientações em um suporte rotativo, otimizando a coleta de amostras. O conjunto de dados resultante de cada execução do experimento está disponível no repositório, cujo link pode ser acessado na seção "Repositório".

Para a realização desta etapa, foi executado o código (1), também disponível no repositório, incorpora um intervalo de alguns segundos entre cada medida. Esse intervalo permite tempo suficiente para coletar todas as amostras durante a execução única do código.

As ilustrações abaixo representam cada posição de medição:

- **Figura 9:** Medição ao longo do eixo X positivo.
- **Figura 10:** Medição ao longo do eixo X negativo.
- **Figura 11:** Medição ao longo do eixo Y positivo.
- **Figura 12:** Medição ao longo do eixo Y negativo.
- **Figura 13:** Medição ao longo do eixo Z positivo.
- **Figura 14:** Medição ao longo do eixo Z negativo.

Após a coleta das 100 amostras e o cálculo da média, podemos manipular as equações 2 e 3 para determinar os valores de ganho e offset para cada eixo. O ganho é calculado pela equação 4, enquanto o offset é determinado pela equação 5.

$$\text{Ganho}_i = \frac{\bar{A}_{1g,i} - \bar{A}_{-1g,i}}{2g} \quad (4)$$

$$A_{\text{offset},i} = \frac{\bar{A}_{1g,i} + \bar{A}_{-1g,i}}{2} \quad (5)$$

Realizando os cálculos do ganho e do offset com base nos valores disponíveis no repositório, encontramos os seguintes resultados:

EIXO	GANHO	OFFSET
X	1.00	-0.04
Y	1.00	-0.04
Z	1.02	-0.04

TABLE I  
VALORES DE GANHO E OFFSET PARA X, Y E Z

#### C. Passo 2 - Calcular a compensação

Uma vez que calculamos todas as constantes da equação 1, agora é possível determinar o valor verdadeiro da saída com a compensação do offset e do ganho. Basta substituir os valores da I para cada eixo na equação 1.

Para esta parte, foi executado o código (2) do repositório.

## IV. RESULTADOS

Após concluir a calibração, torna-se finalmente possível comparar as medições reais (com compensação) com as medições sem compensação, ou seja, aquelas que exibem um erro sistemático. Para proporcionar uma visão prática do resultado do experimento, podemos observar a diferença entre as medições com e sem compensação no seguinte gráfico:

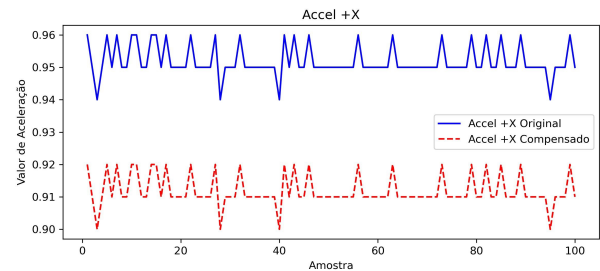


Fig. 3. Comparação +X

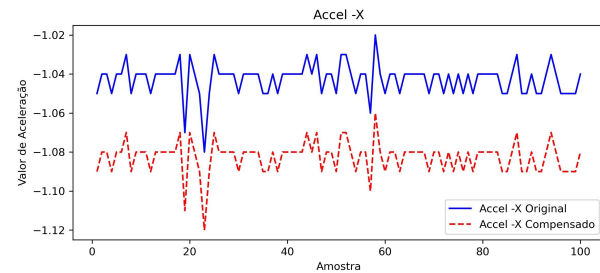


Fig. 4. Comparação -X

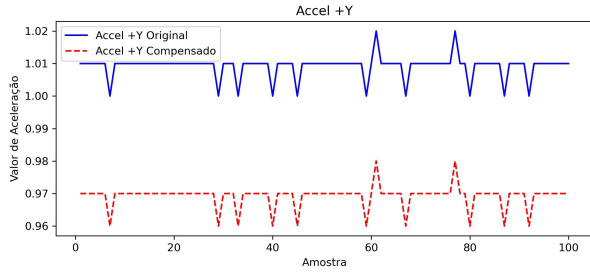


Fig. 5. Comparação +Y

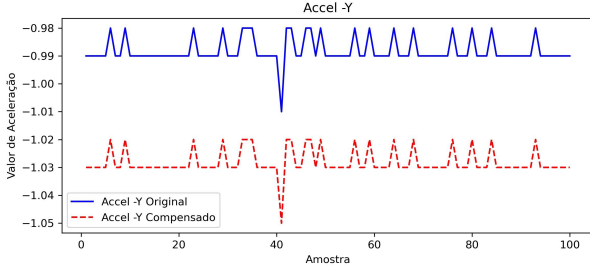


Fig. 6. Comparação -Y

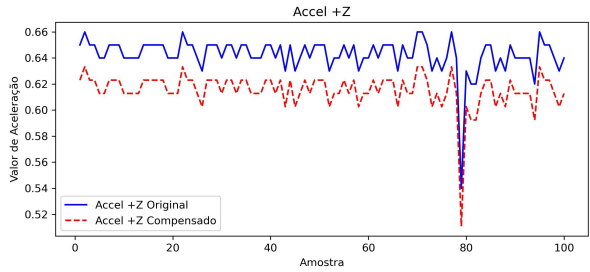


Fig. 7. Comparação +Z

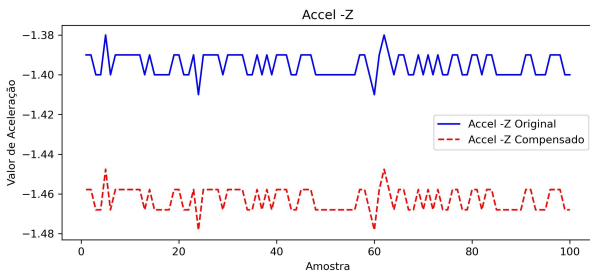


Fig. 8. Comparação -Z

## V. CÁLCULO DO ERRO

Erro Quadrático Médio (EQM) é uma métrica estatística utilizada para avaliar a precisão de um modelo ou a discrepância entre valores observados e valores estimados. No contexto da calibração estática de um acelerômetro, o EQM desempenha um papel fundamental na análise da qualidade da calibração e na avaliação da confiabilidade das medições.

A calibração estática de um acelerômetro visa estabelecer uma relação precisa entre as saídas do sensor e as acelerações reais. No entanto, devido a variáveis como ruídos, desvios ou imprecisões, pode haver discrepâncias entre as leituras do sensor e os valores esperados.

A importância do EQM reside na capacidade de fornecer uma medida quantitativa da precisão do acelerômetro. Isso permite avaliar objetivamente a qualidade da calibração, identificar possíveis fontes de erro e implementarem ajustes necessários para melhorar a precisão das medições.

$$EQM = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{n=1}^n (y_n - p_n)^2} \quad (6)$$

Eixo	RMSE +	RMSE -
X	0.040000	0.0400
Y	0.040000	0.0400
Z	0.027151	0.0679

TABLE II

TABELA COM O ERRO QUADRÁTICO MÉDIO

## VI. DISCUSSÃO

A calibração estática do acelerômetro é um procedimento essencial para assegurar a precisão das medições realizadas por este sensor. Durante esse processo, é comum calcular o Erro Quadrático Médio (EQM) para avaliar a precisão das leituras antes e após a calibração. Os valores de EQM são indicadores importantes da precisão do acelerômetro e podem fornecer informações valiosas sobre a qualidade da calibração realizada.

Valores de EQM mais baixos indicam uma melhor precisão e proximidade das leituras do sensor em relação aos valores esperados. No entanto, observou-se uma diferença significativa nos valores de EQM para o eixo Z entre as direções positiva e negativa. Esse resultado pode sugerir uma assimetria na precisão do acelerômetro ao medir acelerações nessas direções opostas.

Essa diferença no EQM pode estar relacionada a possíveis fontes de erros no sensor do acelerômetro. Variações na sensibilidade do sensor, imprecisões na calibração, interferências externas ou até mesmo fatores ambientais podem influenciar esses resultados divergentes entre as leituras antes e depois do processo de calibração.

É fundamental enfatizar a importância da coleta de dados em múltiplas orientações durante o procedimento de calibração. Embora tenhamos conduzido medições em seis posições distintas, a discrepância observada nos valores de EQM para o eixo Z evidencia a necessidade de uma abordagem mais abrangente. Realizar medições em uma gama mais ampla de orientações é essencial para uma calibração mais completa e robusta, contribuindo para minimizar possíveis tendências e assegurar uma precisão consistente em todas as direções do sensor.

## VII. CONCLUSÃO

O processo de calibração estática do acelerômetro apresentou resultados significativos e desafiadores. Ao analisar os valores do Erro Quadrático Médio (EQM) após a calibração, notou-se que a precisão das medições variou consideravelmente entre as diferentes direções do sensor. Enquanto as direções X e Y demonstraram valores de EQM de aproximadamente 0.04, indicando uma boa precisão nas leituras, observou-se uma disparidade nos valores do eixo Z, com um EQM de 0.027151 na direção positiva e 0.0679 na direção negativa.

Essa discrepância pode sugerir não necessariamente uma imprecisão, mas sim nuances na sensibilidade do sensor em orientações específicas. Contudo, é fundamental reconhecer que a limitação de realizar um número reduzido de medidas pode ter impactado na avaliação da precisão do acelerômetro. O procedimento de calibração poderia se beneficiar de uma abordagem mais ampla, realizando medições em mais orientações para uma compreensão mais abrangente do desempenho do sensor em todas as direções. É importante considerar a possibilidade de imprecisões durante o processo de calibração, variações na sensibilidade do sensor em direções distintas e interferências externas. Esses fatores podem influenciar significativamente os resultados do EQM, afetando a uniformidade e a precisão das medições.

Apesar da variação observada nos valores do EQM entre as diferentes direções do acelerômetro, os resultados obtidos sugerem, de maneira geral, uma precisão satisfatória das medições após o processo de calibração. Embora tenha sido identificada uma discrepância nos valores do eixo Z, é essencial ponderar sobre a precisão global das medições.

É válido destacar que, embora a quantidade de medidas possa ser considerada limitada, os valores de EQM nas direções X e Y, em torno de 0.04, indicam uma boa precisão nas leituras do sensor. Mesmo a discrepância observada no eixo Z, com valores de EQM de 0.027151 na direção positiva e 0.0679 na direção negativa, não necessariamente indicam uma imprecisão generalizada, mas devido aos seus valores indicam que também está dentro do esperado de uma calibração satisfatória.

## VIII. ANEXOS

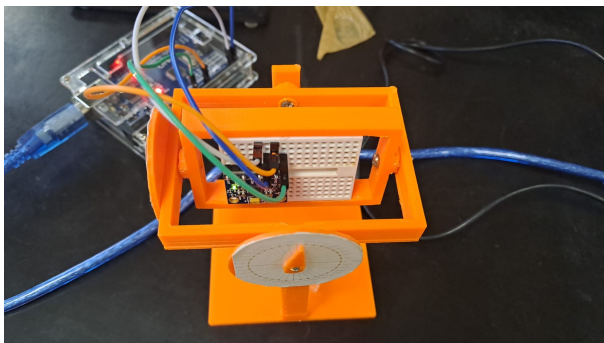


Fig. 9. Eixo X positivo

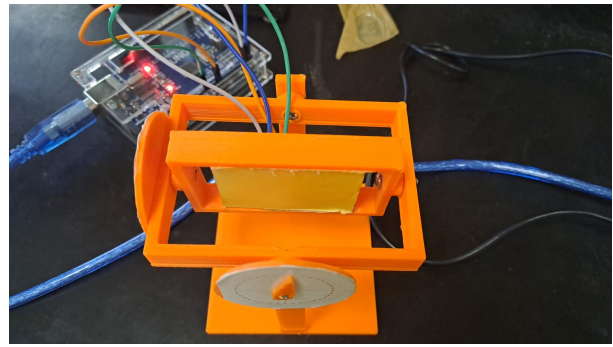


Fig. 10. Eixo X negativo

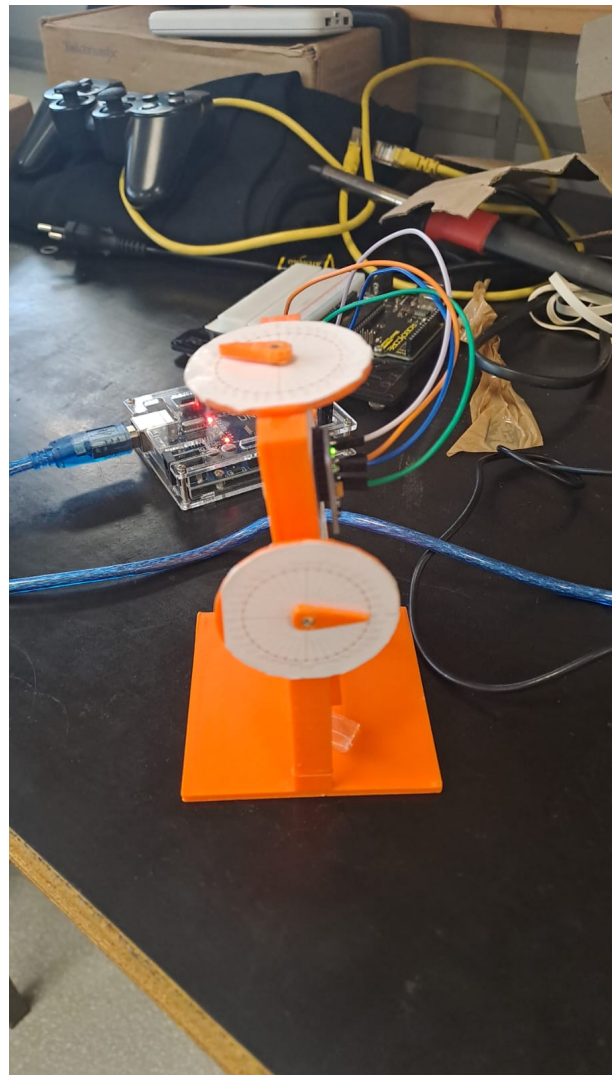


Fig. 11. Eixo Y positivo



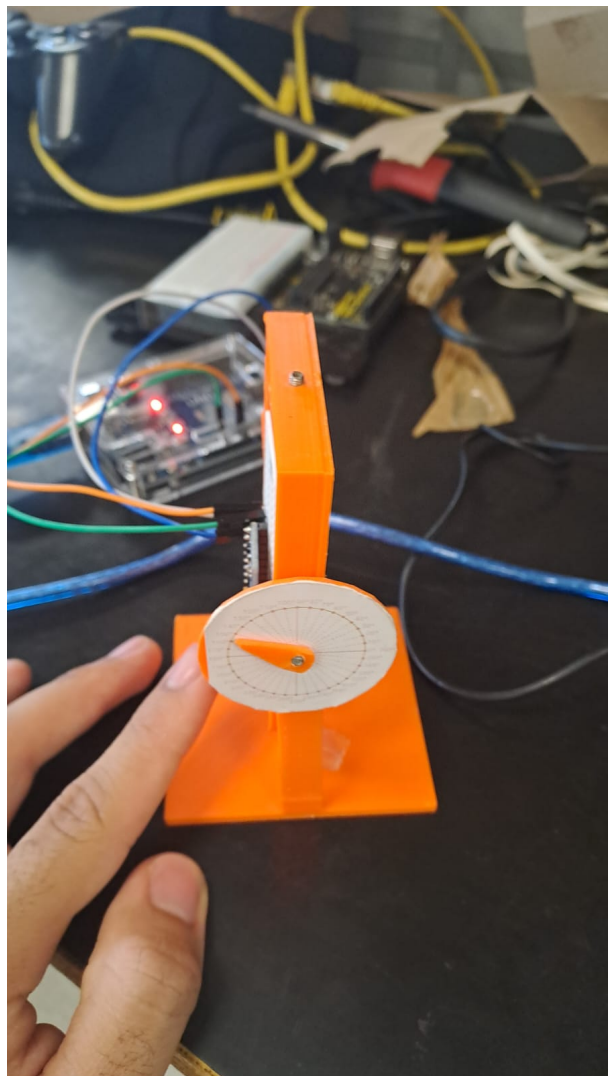


Fig. 12. Eixo Y negativo

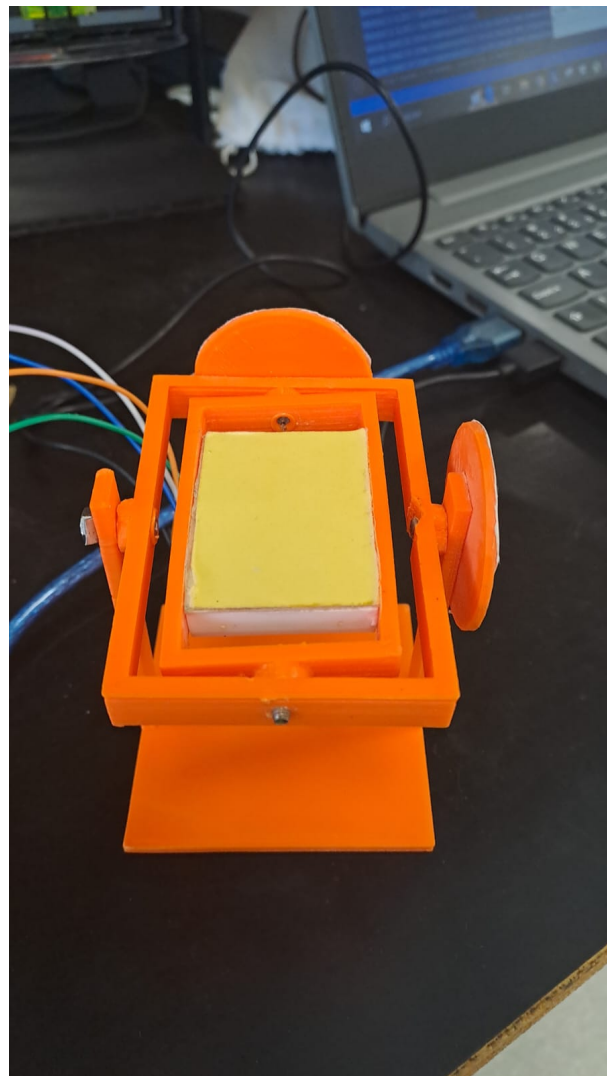


Fig. 13. Eixo Z positivo

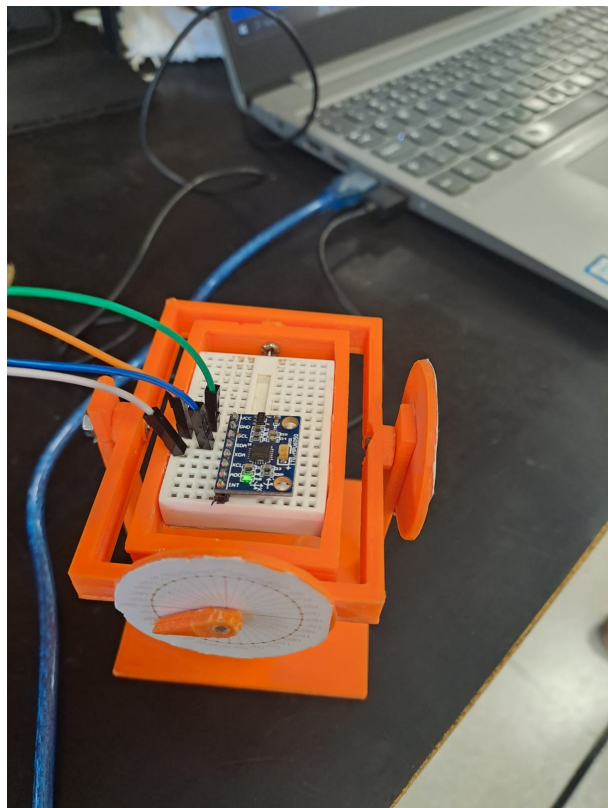


Fig. 14. Eixo Z negativo