

Acelerômetro MPU-6050

Ponto de controle 2 - Calibração e medição do ângulo de inclinação

1st Gabriel Vieira da Silva Leite
Instrumentação Eletrônica para Engenharia
Universidade de Brasília (UnB)
Brasília, Distrito Federal

2nd Mauricio Maiyson Hoffman de Melo
Instrumentação Eletrônica para Engenharia
Universidade de Brasília (UnB)
Brasília, Distrito Federal

3rd Thalles Antonio Neiva Souto
Instrumentação Eletrônica para Engenharia
Universidade de Brasília (UnB)
Brasília, Distrito Federal

Abstract—The research project about the device MPU-6050 was proposed in class about Electronic Instrumentation for Engineering. The file is about how works the sensor accelerometer and compare results theoretical and practical using the MPU-6050.

Index Terms—Accelerometer, MPU6050

I. INTRODUÇÃO

Um sensor é um dispositivo que tem como função principal interagir a um estímulo físico ou químico e efetuar uma resposta proporcional à intensidade do mesmo, fornecendo-a através de um sinal mensurável. Através da captação dos sinais, é possível extrair informações objetivadas do meio para diversas finalidades.[5]

O MPU-6050 é um dispositivo que possui em seu chip um acelerômetro, um giroscópio MEMS e um sensor de temperatura. Este é capaz de efetuar medições de aceleração e rotação em determinados cenários. calibração do sensor acelerômetro e medição do ângulo de inclinação. [1]

Este projeto tem como objetivo compreender o funcionamento e as características do sensor acelerômetro MPU-5060, assim como desenvolver uma configuração otimizada para a obtenção, processamento e amostragem de dados relativos ao ângulo de inclinação através da necessária calibração do acelerômetro. Em síntese, aplicar-se-ão conceitos de instrumentação eletrônica, de forma prática, utilizando o MPU-6050 em um circuito digital, para que seja calculado o ângulo de inclinação de um sistema com um grau de liberdade através da unidade de medição inercial presente no sensor.

II. PROCESSO DE CALIBRAÇÃO DO ACELERÔMETRO E CONVERSÃO DE DADOS

A. Processo de calibração

Primeiramente, começamos pela calibração estática do MPU-6050. Dessa forma, para executar a calibração do sensor, inicialmente foram coletados 100 variações de dados para cada eixo presente no acelerômetro, com ele parado, afim que ficasse apenas sobre o efeito da aceleração relacionada à gravidade.

Deste modo sendo 100 valores para Y+ e Y-, para X+ e X- e também para Z+ e Z-. Após serem aferidos os dados, pudemos obter a média simples em relação aos valores coletados da seguinte forma:

$$Media = (SA/T)$$

Onde SA se refere a soma dos valores das amostras, e T se refere ao total de amostras. Após Isso, obtivemos a seguinte tabela com as médias simples dos valores coletados:

TABLE I
MÉDIA DOS VALORES AFERIDOS REFERENTES A CADA EIXO

Y+	Y-	X+	X-	Z+	Z-
0,972	-1,01	1,036	-0,965	0,904	-1,09

Após o efetuarmos o calculo das médias relacionadas a cada eixo, pudemos calcular os valores de Offset e ganho, a partir de um sistema para cada um dos eixos utilizando as equações abaixo:

$$A_{+1g,i} = Ganho_i \cdot (1g) + A_{offset,i}$$

$$A_{-1g,i} = Ganho_i \cdot (-1g) + A_{offset,i}$$

Deste modo, após montarmos o sistema de equações e efetuarmos os cálculos, chegamos aos seguintes valores de Ganho e Offset, como podem ser observados na seguinte tabela:

TABLE II
VALORES CALCULADOS REFERENTES AO GANHO E OFFSET DE CADA EIXO

-	Y	X	Z
Offset	-0,019	0,0355	-0,093
Ganho	0,991	0,9995	0,997

Pode-se observar que o range de saída é de 2g a -2g, sendo o valor aproximado da gravidade de $9,81 \text{ m}^2/2$.

Portanto, para realizar a conversão dos dados brutos em dados reais será utilizada a seguinte formula:

$$Valg(x, y, z) = ValObt(AcX, AcYeAcZ/sensibilidade)$$

Sendo a sensibilidade no valor de 16384. [1]

Com os valores encontrados de offset e ganho, é possível fazer uma readequação dos valores encontrados de aceleração, afim de amenizar os erros nos valores finais de ângulo aferidos pelo sensor, elevando assim a acurácia das medições. Para cada eixo é acrescentado o valor de offset referido. Desse modo temos:

$$Ayt = Ayi - 0,019$$

$$Axt = Axi + 0,0355$$

$$Azt = Azi - 0,093$$

Onde Ayi, Axi, e Azi representam os valores iniciais aferidos com o sensor antes de descontar os valores de offset e Ayt, Axt, e Azt representam os valores de aceleração final de cada eixo, após serem descontados os valores de offset referentes ao determinado eixo.

B. Conversão dos valores Em Ângulo

Após o processo de calibração do sensor, e a constatação do correto funcionamento do mesmo, pudemos então determinar um modelo para que os dados aferidos de aceleração fossem transformados em graus, para que pudéssemos avaliar se os valores encontrados de aceleração correspondiam com os seus correspondentes angulares.

Tendo como exemplo e inspiração o emprego do acelerômetro na aviação, onde é possível com o auxílio do mesmo encontrar valores de ângulos de inclinação e rotação, efetuando os cálculos da seguinte forma:

Para o ângulo de Rotação:

$$Ar = \arctan\left(\frac{Ax}{\sqrt{Ay^2 + Az^2}}\right)$$

Para o ângulo de Inclinação:

$$Ai = \arctan\left(\frac{Ay}{\sqrt{Ax^2 + Az^2}}\right)$$

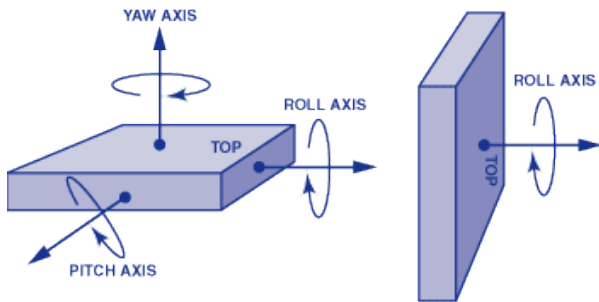


Fig. 1. ângulos de inclinação e Rotação MPU6050.

Assim se torna possível que sejam encontrados os ângulos de inclinação e rotação utilizando o MPU6050. Em nosso projeto nós utilizamos com maior foco o ângulo de inclinação, que se enquadrava melhor em nosso protótipo de medidas de ângulo, que varia sua angulação verticalmente.

III. FERRAMENTA DESENVOLVIDA PARA MEDIÇÃO DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO

Após a etapa de calibração e de padronização dos cálculos de ângulo terem sido concluídas com sucesso, desenvolvemos então a ferramenta que seria responsável por aferir os ângulos de inclinação utilizando o MPU6050.

utilizando uma base de madeira de 3mm, juntamente com um compasso fixado em uma posição onde possibilita que o mesmo possa ter um movimento vertical livre de 0 a 180 graus, um Arduino Uno e o sensor MPU6050, além da utilização de um transferidor como referência de escala, desenvolvemos o seguinte protótipo para o experimento:

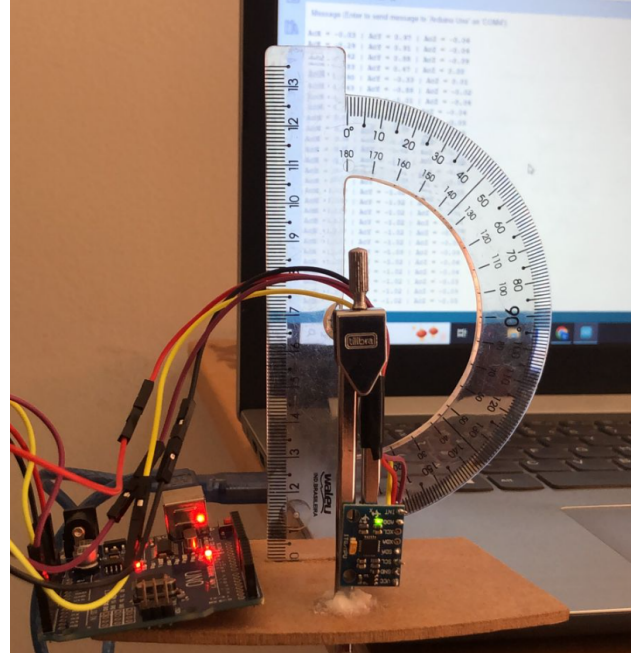


Fig. 2. Ferramenta para aferição de ângulo de inclinação.

Este protótipo funciona da seguinte forma: O compasso está alinhado com o transferidor, onde permite realizar o curso de 0 a 180 graus. Quando o compasso está na posição de 90 graus, está exatamente alinhado com o ponteiro de 90 graus do transferidor, garantindo assim um uso satisfatório da ferramenta para a proposta do experimento.

Como referência, utilizamos o sensor para cima como 0 graus, e o sensor para baixo como 180 graus. Após a montagem do protótipo, foram aferidos vários valores de ângulos de inclinação, para termos um espaço amostral confiável de dados. Fizemos um padrão de 10 em 10 graus de 0 até 180.

Vale ressaltar que a precisão relacionada ao instrumento usado como referência de aferição angular, que no nosso caso é o transferidor, e de 1mm.

Para ilustrar o funcionamento do protótipo desenvolvido, seguem alguns exemplos de aferição de inclinação angular de alguns casos.

Abaixo posicionamos a ferramenta na posição indicada por 90 graus no transferidor:

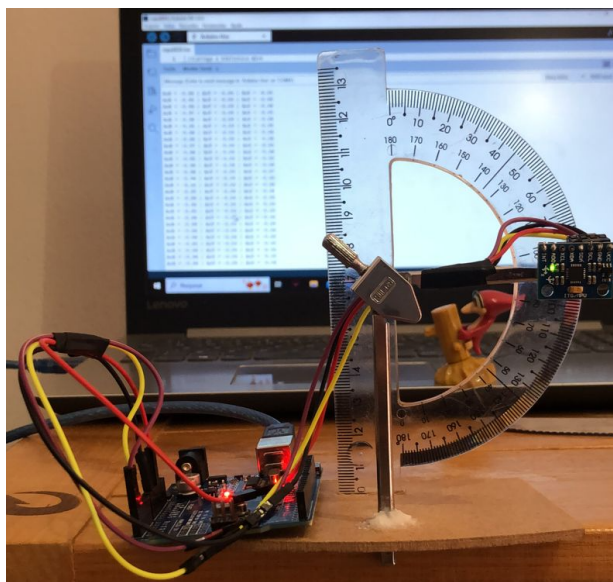


Fig. 3. Aferição da inclinação de 90 graus.

Em seguida posicionamos a ferramenta na posição indicada por 0 graus no transferidor:

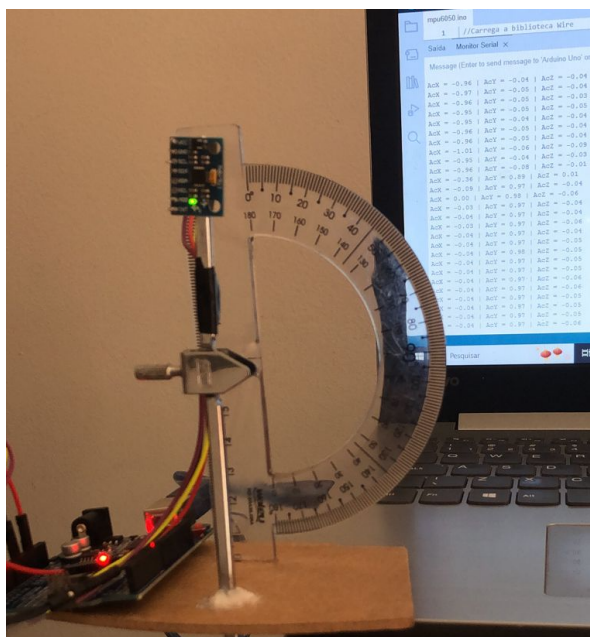


Fig. 4. Aferição da inclinação de 0 graus.

Outro detalhe importante é que para o sistema de conversão que utilizamos, a inclinação vai de 90 a -90 para representação que totaliza os 180 graus, onde 90 representa 0 graus e -90 representa 180 graus. Vale ressaltar novamente que utilizamos para os teste o ângulo de inclinação, que é representado pelo eixo Y, que varia de 1 a -1, proporcionalmente a 90 a -90 (0 a 180 no transferidor).

RESULTADOS

Como pode-se observar na figura a seguir, quando posicionamos a ferramenta apontando para 90 graus no transferidor, obtemos aproximadamente +89,95 de ângulo de inclinação como resultado, que representa exatamente os 0 graus no transferidor, apresentando um erro de cerca de 0,005 graus na medição para esse ângulo específico, porém podendo variar em alguns momentos:

Saída Monitor Serial x				
Message (Enter to send message to 'Arduino Uno' on 'COM3')				
AcX = -0.97	AcY = -0.02	AcZ = 0.01	theta = 89.03	
AcX = -0.96	AcY = 0.07	AcZ = 0.03	theta = 85.97	
AcX = -0.97	AcY = -0.00	AcZ = 0.01	theta = 89.75	
AcX = -0.96	AcY = -0.01	AcZ = 0.02	theta = 89.59	
AcX = -0.95	AcY = -0.00	AcZ = 0.02	theta = 89.70	
AcX = -0.96	AcY = 0.00	AcZ = 0.02	theta = 89.95	
AcX = -0.96	AcY = -0.00	AcZ = 0.01	theta = 89.75	
AcX = -0.96	AcY = 0.00	AcZ = 0.03	theta = 89.73	
AcX = -0.95	AcY = 0.00	AcZ = 0.03	theta = 89.92	
AcX = -0.96	AcY = -0.00	AcZ = 0.01	theta = 89.87	
AcX = -0.96	AcY = -0.00	AcZ = 0.02	theta = 89.89	
AcX = -0.95	AcY = -0.01	AcZ = 0.03	theta = 89.39	
AcX = -0.96	AcY = 0.01	AcZ = 0.00	theta = 89.69	
AcX = -0.96	AcY = 0.00	AcZ = 0.01	theta = 89.83	
AcX = -0.95	AcY = 0.00	AcZ = 0.01	theta = 89.92	
AcX = -0.96	AcY = 0.01	AcZ = 0.01	theta = 89.47	
AcX = -0.95	AcY = -0.00	AcZ = 0.01	theta = 89.70	

Fig. 5. Conversão referente a 90 graus.

Dessa forma, podemos observar que quando Y se aproxima de 1, nos aproximamos de 0 graus no transferidor, e quanto Y se aproxima de -1, nos aproximamos de 180 graus no transferidor.

TABLE III
VALORES ESPERADOS X VALORES OBTIDOS

Transferidor	Valor aferido	Erro percentual
0	8,54	Indefinido
20	23,42	17,10%
30	37,11	23,69%
40	48,83	22,06%
50	57,19	14,38%
60	65,37	8,94%
70	76,70	9,58%
80	81,22	1,52%
90	94,81	5,35%
100	105,04	5,04%
110	113,11	2,83%
120	122,56	2,13%
130	124,70	4,08%
140	140,97	0,70%
150	150,89	0,59%
160	159,72	0,18%
170	171,18	0,69%
180	176,37	2,02%
Erro Médio Total	-	6,01%

Na tabela acima, podemos conferir os ângulos aferidos e comparar com os ângulos de referencia presentes no transferidor. Com isso é possível encontrarmos a taxa de erro percentual em relação à cada medida. Nota-se que a porcentagem

de erro foi reduzindo quando o sensor foi se distanciando de 0 e se aproximando de 180 graus no transferidor.

Além disso, pode-se observar no gráfico abaixo a progressão das medidas e a diferença para os valores de referência:

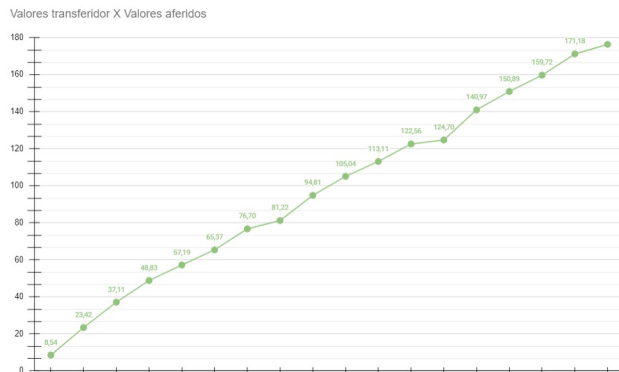


Fig. 6. Gráfico de comparação entre Valores de referência e valores aferidos.

ALGORITMO UTILIZADO

Para executar a correta configuração do sensor MPU-6050 juntamente com o sistema embarcado utilizado, fora utilizado um código que pode ser simplificado compreendido de acordo com o pseudo algoritmo abaixo:

- 1) É adicionada a biblioteca Wire.h, necessária para a implementação de algumas funções necessárias;
- 2) São criadas variáveis para armazenar os dados digitalizados;
- 3) Comunicação serial é configurada e inicializada, permitindo o funcionamento e a obtenção de dados do sensor;
- 4) O MPU-6050 é inicializado;
- 5) Sistema executa a leitura dos dados coletados no sensor e os armazena nos registradores relativos às variáveis estabelecidas. Os dados são relativos às medições do acelerômetro nas dimensões x, y e z;
- 6) Dados lidos são processados, atendendo à calibração apresentada no item II-A do desenvolvimento;
- 7) Cálculo do ângulo de inclinação, através do processamento apresentado no item II-B do desenvolvimento.
- 8) Apresenta os valores retornados e calibrados, assim como o valor calculado relativo ao ângulo de inclinação através do monitor serial;
- 9) É realizada uma pausa de 2000ms na execução do código;
- 10) Encerrada a pausa, o algoritmo retorna para o item 5, o qual permanecerá em ciclo de repetição até que o sistema seja interrompido;

O código completo pode ser conferido acessando o repositório por meio do link abaixo:

- <https://github.com/Gabriiul/projetoiee/tree/main/projetoiee> [4]

CONCLUSÕES

Nesta segunda etapa do projeto, pudemos efetuar a coleta de dados utilizando o sensor, efetuar a calibração do mesmo além de entender como é feita a conversão dos valores obtidos para ângulo de inclinação. Além disso, foi possível por meio do protótipo construído, fazer uma relação dos dados obtidos com uma ferramenta de referência, que no caso em questão foi um transferidor.

Por outro lado, pudemos entender na prática o funcionamento do acelerômetro presente no MPU6050, além de contextualizar e compreender aplicações práticas para o mesmo, elucidando assim vários conceitos relacionados ao funcionamento do sensor, bem como suas aplicações no cotidiano.

REFERENCES

- [1] IvenSense Inc, "MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification: Revision 3.4". Disponível em: <https://d229kd5ey79jzj.cloudfront.net/974/MPU-6000-Datasheet1.pdf>. Acesso em: 11 de dezembro de 2022.
- [2] Arduino, "Learn Arduino". Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Guide>. Acesso em: 12 de dezembro de 2022.
- [3] TDK Electronics, "MPU-6000and MPU-6050 Register Map and Descriptions". Disponível em: <https://d229kd5ey79jzj.cloudfront.net/974/MPU-6000-Datasheet1.pdf>. Acesso em: 12 de dezembro de 2022.
- [4] "projetoiee/projetoiee at main · Gabriiul/projetoiee". GitHub. <https://github.com/Gabriiul/projetoiee/tree/main/projetoiee> (consult. 2023-02-11).
- [5] "Nomads". USP. <http://www.nomads.usp.br/pesquisas/design/dos/Capacitacao/arquivos/> (consult. 2023-02-01).