

Circuito eletrônico que calcula o ângulo de inclinação usando a unidade de medição Inercial MPU-6050

1st Fernanda Faria Diniz
Universidade de Brasília - UnB
190087099@aluno.unb.br

2nd Gabriel de Souza Lima
Universidade de Brasília - UnB
190057351@aluno.unb.br

I. REPOSITÓRIO PARA ANEXO DE CÓDIGO E ARQUIVOS

- Os programas, códigos e arquivos de todo o projeto podem ser encontrados no repositório: https://github.com/Fefdiniz11/Inst_Eletronica
- O código utilizado para a Entrega 1 pode ser encontrado diretamente em: T1_MPU6050.ino

II. INTRODUÇÃO

O giroscópio e o acelerômetro são sensores inerciais que medem a orientação e a aceleração de um objeto em três dimensões. O giroscópio mede a taxa de rotação angular em torno de cada um dos eixos, enquanto o acelerômetro mede a força resultante em cada eixo, que inclui tanto a aceleração gravitacional quanto a aceleração linear.

Ao integrar as leituras do giroscópio e do acelerômetro, é possível obter informações precisas sobre a posição e orientação do objeto em tempo real. Esses sensores também podem ser combinados, por exemplo, com magnetômetros para fornecer informações de orientação mais precisas em relação ao campo magnético da Terra.

A utilização do giroscópio e do acelerômetro são fundamentais em diversas aplicações, como em jogos, navegação, ambiente virtual, drones e em veículos autônomos. Esses sensores permitem que os dispositivos eletrônicos detectem e compreendam o movimento, fornecendo informações importantes para o controle e a orientação desses dispositivos.

Em jogos, por exemplo, os sensores são utilizados para permitir que o jogador controle personagens ou veículos por meio de movimentos físicos, como inclinação e rotação. Já na navegação, os sensores são utilizados para obter informações precisas sobre a posição e orientação de um dispositivo, o que é especialmente útil em aplicações como GPS.

Na realidade virtual, os sensores são utilizados para detectar a posição e a orientação da cabeça do usuário, permitindo que o ambiente virtual seja exibido de acordo com a perspectiva do usuário. Em drones e veículos autônomos, os sensores são utilizados para fornecer informações sobre a orientação e aceleração do veículo, permitindo que o veículo seja controlado com maior precisão.

Em resumo, o giroscópio e o acelerômetro são sensores essenciais em dispositivos eletrônicos modernos, permitindo que os mesmos detectem e compreendam o movimento em três

dimensões. Combinados com outros sensores, como o magnetômetro, esses sensores são capazes de fornecer informações precisas sobre a posição e orientação de um objeto em tempo real, permitindo que os dispositivos eletrônicos sejam controlados com maior precisão e eficiência.

III. REVISÃO DA LITERATURA

A. Funcionamento do Acelerômetro

Um acelerômetro é um dispositivo que mede a aceleração de um objeto. Ele pode ser usado para medir a aceleração linear (mudança na velocidade ao longo de uma linha reta) ou a aceleração angular (mudança na velocidade rotacional) de um objeto.

O acelerômetro é composto por um conjunto de massas e molas. Quando o objeto sofre uma aceleração, a massa se move em relação às molas, gerando uma força que é medida pelo dispositivo. Essa força é proporcional à aceleração sofrida pelo objeto.

Existem dois tipos principais de acelerômetros: os acelerômetros piezoelétricos e os acelerômetros capacitivos.

Os acelerômetros piezoelétricos geram uma carga elétrica quando sofrem uma deformação mecânica, como a que ocorre quando a massa se move em relação às molas. Essa carga elétrica é medida e convertida em um sinal elétrico que pode ser processado para determinar a aceleração.

Já os acelerômetros capacitivos utilizam um conjunto de placas paralelas que formam um capacitor. Quando a massa se move em relação às placas, a distância entre elas muda, alterando a capacitância do capacitor. Essa mudança na capacitância é medida e convertida em um sinal elétrico que pode ser processado para determinar a aceleração.

Os acelerômetros são amplamente utilizados em aplicações como smartphones, controle de estabilidade de veículos, navegação inercial, detecção de terremotos, entre outros. Eles são capazes de medir acelerações com grande precisão e rapidez, permitindo o monitoramento de movimentos e vibrações em tempo real.

O acelerômetro presente na MPU-6050 é do tipo MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) capacitivo, que mede a aceleração através da variação na capacitância entre duas camadas de material isolante quando ocorre uma força sobre o sensor. Esse acelerômetro é capaz de medir acelerações em

três eixos: X, Y e Z e as faixas que esse acelerômetro pode operar são $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$, $\pm 16g$, o que permite que ele seja usado em diversas aplicações.

B. Funcionamento do Giroscópio

Um giroscópio é um dispositivo mecânico que utiliza o princípio da conservação do momento angular para medir a rotação ou a orientação de um objeto. Ele consiste em um rotor que gira em alta velocidade em torno de um eixo, mantido em suspensão por um conjunto de anéis e suportes.

Quando o giroscópio é colocado em movimento, o rotor começa a girar e, devido à sua inércia, ele tende a manter sua posição original no espaço. Isso significa que, mesmo que o objeto em que o giroscópio está montado se mova ou mude de direção, o rotor continuará girando na mesma direção e com a mesma velocidade relativa ao espaço, mantendo assim a sua orientação.

O movimento do rotor cria um efeito de precessão, onde o eixo do rotor muda de direção em resposta a forças aplicadas ao giroscópio. Esse efeito é usado para medir a rotação do objeto em que o giroscópio está montado. Por exemplo, em um giroscópio de aeronaves, a rotação do avião faz com que o eixo do giroscópio gire, e esse movimento pode ser medido para determinar a orientação da aeronave em relação ao espaço.

Os giroscópios são utilizados em diversas aplicações, como navegação inercial, estabilização de câmeras, controle de movimento em videogames, entre outras. Eles são muito precisos e confiáveis em ambientes onde as condições de navegação são desafiadoras, como em aviões, submarinos e foguetes.

O giroscópio presente na MPU-6050 utiliza o efeito Coriolis para medir a velocidade angular. Ele possui uma massa de prova suspensa em um suporte flexível que pode se mover em várias direções. Quando o dispositivo gira, a massa de prova também se desloca devido ao efeito Coriolis. Esse deslocamento é detectado por sensores internos que convertem o movimento em um sinal elétrico proporcional à velocidade angular. Esse giroscópio também permite determinar a orientação e movimento do dispositivo em três eixos: X, Y e Z e as faixas que esse giroscópio pode operar são $\pm 250^\circ/s$, $\pm 500^\circ/s$, $\pm 1000^\circ/s$, $\pm 2000^\circ/s$, o que permite que ele seja usado em diversas aplicações.

TABLE I
TABELA COM INFORMAÇÕES DO ACELERÔMETRO DA MPU-6050

| Parâmetros | Condições | Valores |
|--|---|--|
| Faixa de operação | AFS_SEL=0; AFS_SEL=1; AFS_SEL=2; AFS_SEL=3 | $\pm 2g$; $\pm 4g$; $\pm 8g$; $\pm 16g$ |
| Temperatura de operação | | -40°C a 85°C |
| Comprimento de palavra ADC | Saída em formato de complemento de dois | 16 bits |
| Escala de sensibilidade | AFS_SEL=0; AFS_SEL=1; AFS_SEL=2; AFS_SEL=3 | 16384LSB/g; 8192LSB/g; 4096LSB/g; 2048LSB/g; |
| Tolerância de calibração inicial | | +/-3% |
| Não-linearidade | | 0,5% |
| Mudança de Sensibilidade vs. Temperatura | AFS_SEL=0, -40°C a 85°C | +/-0,02%/°C |
| Sensibilidade de eixo cruzado | | +/-2% |
| Mudança de Nível Zero-G vs. Temperatura | Eixos X e Y, 0° C a 70° C; Eixo Z, 0° C a 70° C | $\pm 35mg$; $\pm 60mg$ |
| Tolerância de calibração inicial | Eixos X e Y; Eixo Z | $\pm 50mg$; $\pm 80mg$ |
| Resposta de auto teste - relativo | Variação em relação ao ajuste de fábrica | -14 a 14% |
| Ruído - Densidade espectral de potência | @10Hz, AFS_SEL = 0&ODR = 1kHz | 400 μ g/ \sqrt{Hz} |
| Resposta do filtro passa-baixa | Faixa programável | 5Hz a 260Hz |
| Taxa de saída de dados | Faixa programável | 4Hz a 1000Hz |
| Incremento da função de inteligência | | 32mg/LSB |

TABLE II
TABELA COM INFORMAÇÕES DO GIROSCÓPIO DA MPU-6050

| Parâmetros | Condição | Valores |
|---|--|--|
| Faixa de operação | FS_SEL=0;FS_SEL=1; FS_SEL=2;FS_SEL=3 | $\pm 250^\circ/s$; $\pm 500^\circ/s$; $\pm 1000^\circ/s$; $\pm 2000^\circ/s$ |
| Temperatura de operação | | -40°C a 85°C |
| Comprimento de palavra ADC | | 16 bits |
| Escala de sensibilidade | FS_SEL=0;FS_SEL=1; FS_SEL=2;FS_SEL=3 | 131LSB/(°/s); 65,5LSB/(°/s); 32,8LSB/(°/s); 16,4LSB/(°/s) |
| Tolerância da escala de sensibilidade | 25°C | -3 a +3% |
| Variação da escala de sensibilidade | | $\pm 2\%$ |
| Não-linearidade | Linha reta de melhor ajuste; 25°C | 0,2% |
| Sensibilidade Cruzada de Eixos | | $\pm 2\%$ |
| Tolerância Inicial de ZRO | 25°C | $\pm 20^\circ/s$ |
| Variação de ZRO em função da temperatura | -40°C a 85°C | $\pm 20^\circ/s$ |
| Sensibilidade à alimentação de energia (1 - 250Hz); (250 - 100kHz) | Onda senoidal, 100mpVpp; VDD=2,5V | 0,2°/s; 4°/s |
| Sensibilidade à aceleração linear | Estática | 01°/s/g |
| Resposta de auto teste relativa | Variação em relação ao ajuste de fábrica | -14 a 14% |
| Ruído total RMS | DLPFCFG=2 (100Hz) | 0,05 °/s-rms |
| Ruído RMS de baixa frequência | Largura de banda 1Hz a 10Hz | 0,033 °/s-rms |
| Densidade espectral de ruído de taxa | A 10 Hz | °/s/ \sqrt{Hz} |
| Frequências mecânicas do giroscópio: eixo X; eixo Y; eixo Z | | 30 a 36kHz; 27 a 33kHz; 24 a 30kHz |
| Resposta do filtro passa-baixa | Faixa programável | 5 a 256Hz |
| Taxa de saída de dados | Faixa programável | 4 a 8000Hz |
| Estabilização de ZRO (a partir do ligamento) | Até $\pm 1^\circ/s$ do final | 30ms |

IV. EXTRAÇÃO DE DADOS E VISUALIZAÇÃO

Para realizar essa parte do projeto, utilizou-se como micro-controlador uma ESP32 e a conectou ao MPU-6050, como mostrado a seguir:

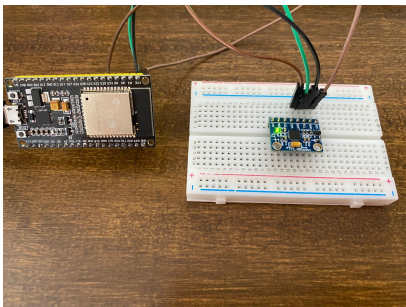


Fig. 1. Conexão MPU-6050 a ESP32

Utilizando a IDE do arduino versão 1.8.19, fez-se um código em que foi possível fazer a comunicação com o MPU-6050, extrair os dados aceleração e velocidade angular do sensor e visualizar os resultados na tela do computador. Para extrair os dados da aceleração, foi preciso fazer a conversão para valores de fração de gravidade (g), portanto dividiu-se o valor bruto lido pelo acelerômetro por 16384, pois no datasheet é especificado que o acelerômetro tem uma sensibilidade de 16384 LSB por unidade de gravidade (g).

$$Valor\ no\ Monitor\ Serial = \frac{Valor\ Bruto\ Lido}{16384} = \frac{LSB}{\frac{LSB}{g}} = (g) \quad (1)$$

Já para o giroscópio, foi preciso fazer a conversão para os valores em graus/s, portanto dividiu-se o valor bruto lido pelo giroscópio por 131, pois no datasheet é especificado que

o sensor possui uma taxa de sensibilidade de 131LSB por grau por segundo (grau/s). Esses valores de sensibilidade são para a configuração de escala selecionada em AFS_SEL=0 e FS_SEL=0, que são respectivamente $\pm 2g$ e ± 250 graus/s, como visto nas tabelas I e II.

$$\text{Valor no Monitor Serial} = \frac{\text{Valor Bruto Lido}}{131} = \frac{\text{gaus}}{s} \quad (2)$$

Foi possível visualizar os dados tanto no Serial Monitor no formato de valores numéricos, quanto no Serial Plotter em que foi gerado no formato de gráfico. Os resultados foram divididos por parte para uma melhor visualização.

Os dados foram obtidos inicialmente com o sensor MPU-6050 em repouso e depois movimentando o mesmo e obteve-se os seguintes resultados:

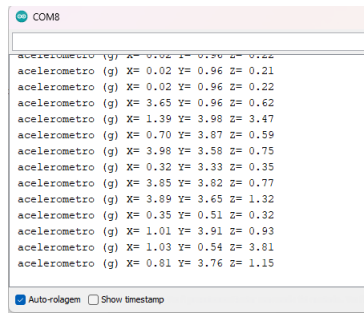


Fig. 2. Valores de medição do acelerômetro

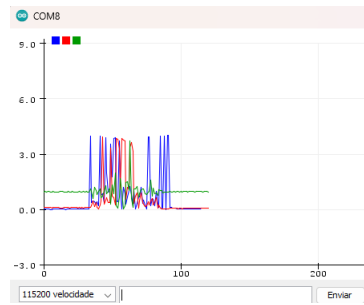


Fig. 3. Gráfico do acelerômetro

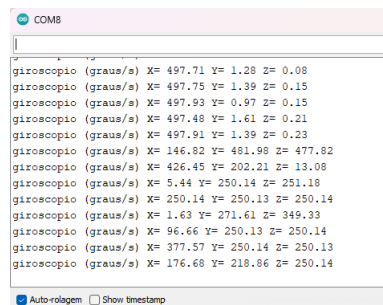


Fig. 4. Valores de medição do giroscópio

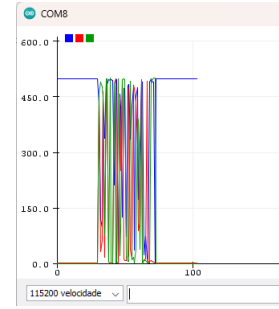


Fig. 5. Gráfico do giroscópio

V. CALIBRAÇÃO

A calibração é um processo crucial utilizado para garantir a precisão e confiabilidade de instrumentos de medição ou sistemas. Envolve comparar as leituras ou medições de um instrumento com um padrão de referência conhecido e estabelecido. O objetivo principal é identificar quaisquer desvios ou erros no instrumento e garantir que ele forneça resultados precisos e exatos.

A calibração é especialmente importante em áreas como ciência, engenharia, manufatura e instrumentação, onde medições confiáveis são essenciais. É especialmente crítica em setores que envolvem segurança e saúde, como medicina, aviação, farmacêutica e energia nuclear. A calibração regular é necessária para cumprir regulamentações e padrões e manter a integridade das medições.

Laboratórios de calibração certificados realizam procedimentos de calibração e emitem certificados que verificam a conformidade dos instrumentos testados. Esses certificados são frequentemente exigidos por regulamentações, normas de qualidade e clientes. A calibração também desempenha um papel importante na manutenção e monitoramento contínuo da qualidade, permitindo a detecção precoce de problemas e possibilitando a manutenção preventiva.

Em resumo, a calibração garante a precisão, confiabilidade e conformidade de instrumentos de medição. É amplamente praticada em diversas indústrias e é fundamental para a garantia da qualidade e desempenho ótimo de sistemas de medição.

A saída esperada para cada valor adquirido deve satisfazer a seguinte equação:

$$A_{saída} = Ganho \cdot A_{Referência} + A_{offset} \quad (3)$$

onde:

$A_{saída}$:Valor de aceleração na saída do sensor medido em valores de gravidade [g].

$Ganho$:Parâmetro adimensional. No caso em que os movimentos no sensor somente se vejam afetados pela aceleração devida a gravidade, o ganho deve estar muito próximo de 1.

A_{ref} :Valor de aceleração de referência. Para nosso caso, $\pm 1g$.

A_{offset} :Valor de aceleração fixo que afeta as leituras em cada eixo do sensor. Pode ser considerado um erro sistemático

do sistema.

, para calcularmos o A_{offset} e $Ganho$ é necessário manipular a equação acima de A_{Saida} , obtendo assim as seguintes equações:

$$Ganho_i = \frac{\bar{A}_{+g,i} - \bar{A}_{-g,i}}{2g}$$

$$A_{offset} = \frac{\bar{A}_{+g,i} + \bar{A}_{-g,i}}{2}$$

,onde: $\bar{A}_{+g,i}$ = média das medidas obtidas com a MPU, para cada eixo. i = eixo (x,y ou z).

A. Discussão de Resultados

A coleta de dados foi feita em laboratório, em ambiente parcialmente controlado (devido a possíveis desníveis da bancada e do próprio instrumento disponibilizado para as medições), os dados serão dispostos em forma de tabela, abaixo.

TABLE III
TABELA DE RESULTADOS

| Eixos | A_{offset} | Ganho |
|-------|--------------|-------|
| X | 0.05 | 0.99 |
| Y | -0.01 | 0.99 |
| Z | -0.06 | 1.02 |

TABLE IV
TABELA DE RESULTADOS

| Eixo | \bar{A} | $\bar{A} + 1_{g,i}$ | Ângulo(graus) |
|------|-----------|---------------------|---------------|
| X+ | 1.04 | 1,0796g | 90.00 |
| X- | -0.94 | -0,8806g | 270.00 |
| Y+ | 0.99 | 0,9701g | 90.00 |
| Y- | -0.97 | -0,9703g | 270.00 |
| Z+ | 0.96 | 0,9192g | - |
| Z- | -1.08 | -1,1616g | - |

VI. CONCLUSÃO

A partir do programa feito no arduíno, foi possível visualizar, depois da conversão para as unidades desejadas, os dados de aceleração e velocidade angular lidos pelo sensor MPU-6050. Percebe-se que enquanto ele estava em repouso, os valores realmente ficavam constantes, apenas com algumas variações pouco significativas por causa do ambiente. Quando movimentava o sensor, os valores tanto do acelerômetro quanto do giroscópio variavam conforme o movimento acontecia, alterando os valores de cada eixo.

Após o processo da calibração estática do sensor acelerômetro e a compensação dos dados segundo as informações da MPU6050 no datasheet, foi possível observar os valores da aceleração em valores de gravidade (g), o ganho, que foi sempre próximo de 1(unidade), como esperado pois os movimentos no sensor estavam sendo afetados pela aceleração da gravidade e quanto ao offset, observou-se que o erro sistemático do sistema é um valor baixo, o que permite aferir que foi feita uma boa calibração.

REFERENCES

- [1] MPU-6000-Datasheet
- [2] MPU-6000 and MPU-6050 Register Map and Descriptions, Revision 4.2
- [3] Giroscópio e acelerômetro. Embarcasaúde
- [4] Acelerômetros MPU-6050, MMA8452 e MPU-9250