

# METODOLOGIA PARA ESTUDO E ANÁLISE DE DADOS DE ACELERAÇÃO EM UM PLANO INCLINADO OBTIDOS ATRAVÉS DA PLATAFORMA ARDUINO 101

Enrico Ceroblo Nadeo<sup>1</sup>, Marcos Norio Watanabe<sup>2</sup>, Milton Silva da Rocha<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Alunos de mestrado do curso engenharia elétrica da Universidade de São Paulo - USP

<sup>3</sup>Prof. Dr. do Departamento de Tecnologia da Informação - FATEC-SP

enriconadeo@hotmail.com, mrocha@fatecsp.br

## Resumo

Apresentação de metodologia para análise de dados de aceleração obtidos na plataforma Arduino 101 realizados no laboratório de Física da Fatec-SP e descrição da estrutura de hardware e software usada no experimento.

## 1. Introdução

O objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia experimental para obtenção e análise de dados de aceleração obtidos via plataforma Arduino 101 [1]. Para isto, foi aplicado modelo físico baseado em equilíbrio estático de um corpo em um plano inclinado em ângulos variando de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  em relação ao plano horizontal. Os valores das acelerações nas direções dos eixos  $x$ ,  $y$ , e  $z$  foram comparados aos valores previstos pelas equações de equilíbrio de um corpo em um plano inclinado. O trabalho apresenta as medidas realizadas, limitações experimentais e possíveis aplicações.

## 2. Métodos e materiais

O trabalho está baseado na plataforma *Open Source* Arduino [2], com hardware e software integrados com um dialeto de programação da linguagem C, programas exemplo e bibliotecas de apoio. Tem como unidade básica o Arduino Uno integrado com recursos de comunicação com outras plataformas e operação com dados analógicos e digitais. Estes recursos são ampliados por outros modelos Arduino e por placas encaixáveis denominadas *shields*.

O Arduino 101 expande os recursos do Arduino Uno integrando medidas de aceleração nos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Na placa Arduino 101, os eixos  $x$  e  $y$  são posicionados no plano horizontal e o eixo  $z$  tem a direção vertical à placa. O Arduino 101 também fornece medidas de rotação em três eixos (giroscópio), ilustrado na Figura 1.

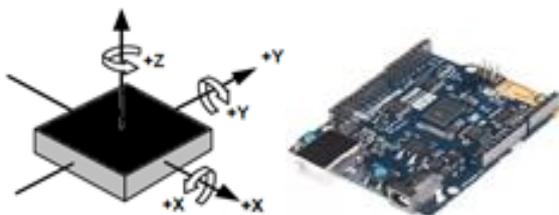


Figura 1. Arduino 101 e orientação dos eixos.

Os programas para o Arduino são desenvolvidos em um computador pessoal (ambiente Windows ou Linux) e transferidos para a placa Arduino via cabo USB (*Universal Serial Bus*). Resultados de processamento são transferidos do Arduino e recebidos pelo Programa Monitor Serial da plataforma Arduino.

O início do trabalho foi o estudo e compreensão dos mecanismos de obtenção, transmissão, recebimento e tratamento de dados. As medidas foram realizadas no Laboratório de Física da Fatec-SP e para a rotação do plano fixou-se o eixo  $x$ . Assim, a componente da aceleração na direção  $x$  independe da inclinação, conforme Figura 2.

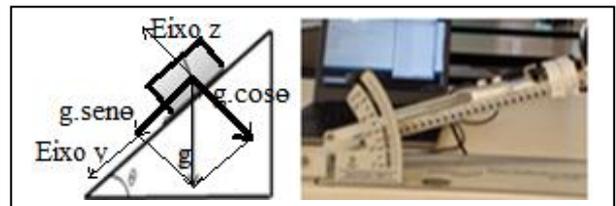


Figura 2. Eixos de referência ( $y$  e  $z$ ) no plano inclinado. Laboratório de Física - Fatec-SP.

A Figura 2 mostra a placa Arduino fixada ao plano e se comunicando ao computador pessoal por cabo USB.

### 2.1 O acelerômetro

A tecnologia MEMS (*Micro Electro Mechanical Systems*) [3] é a base tecnológica para a construção dos acelerômetros. O dispositivo MEMS no acelerômetro opera de forma análoga ao sistema massa e mola, conforme o esquema da Figura 3 [3].

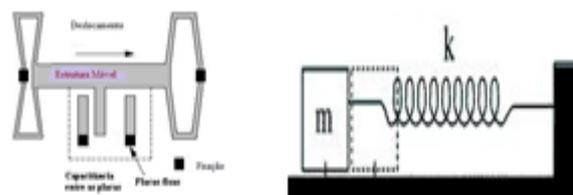


Figura 3. Superfície flexível e modelo massa mola para o dispositivo. A distância relativa entre as placas podem ser obtidas por medidas de efeitos capacitivos

O deslocamento relativo da estrutura móvel devido à aceleração da gravidade produz variação na distância relativa às placas. Em uma dimensão, o dispositivo pode ser modelado como um sistema massa mola onde o deslocamento de um corpo de massa  $m$  é relacionado à força  $f=k.z$ , sendo  $k$  a constante da mola e  $z$  o deslocamento entre as placas. Na direção do eixo  $z$ , normal à superfície da placa, o termo  $k.z$  é equilibrado pela componente  $m.g.\cos(\theta)$ . Assim  $kz - m.g.\cos(\theta) = 0$ . A expressão de equilíbrio pode ser reescrita como:

$$(k/m).z = g.\cos(\theta) \quad (1)$$

O termo  $(k/m).z$  tem a dimensão de aceleração e é informado pelo dispositivo através de medida indireta do deslocamento. Em outras palavras, a aceleração em um eixo é proporcional ao deslocamento entre as placas que pode ser obtida por medida de capacitância. Para cada um dos eixos ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), há um sistema similar e independente para medida de aceleração ( $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$ ).

A unidade MPU6050, Figura 4, é um dispositivo para medição de aceleração em três eixos e recursos de comunicação com plataformas Arduino.



Figura 4. Acelerômetro e giroscópio de três eixos. Unidade MPU6050 [4] e circuitos de apoio.

A unidade MPU6050 é um Circuito Integrado (IC), que tem o apoio de programas exemplo e bibliotecas. O dispositivo fornece valores de aceleração em formatos analógico e digital e recursos para conexão, alimentação e troca de dados com o Arduino.

A plataforma Arduino 101, mostrado na Figura 1, incorpora numa placa, um acelerômetro de três eixos e recursos para comunicação e transmissão de dados.

### 2.2 Equações de equilíbrio no plano.

Para a inclinação inicial nula, o modelo massa mola requer algumas considerações para o equilíbrio estático. Sendo  $\theta=0$ , e sendo o deslocamento no eixo vertical, a aceleração  $a_z$  medida pelo acelerômetro será igual a  $g$  (aceleração da gravidade), conforme a Figura 5.

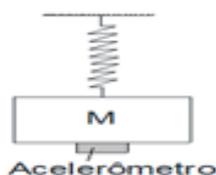


Figura 5. Acelerômetro com inclinação  $\theta=0$ . O deslocamento da massa ocorre no eixo vertical.

Para outros valores de inclinação, a dependência da aceleração na direção  $z$  é [5,6]:

$$a_z = g \cos(\theta) \quad (2)$$

A componente  $a_y$  é nula para  $\theta=0$  ( $a_y=0$ ). Com o aumento de  $\theta$  e sendo a rotação do plano com o eixo  $x$  fixo, a componente  $a_y$  é dada por:

$$a_y = g \sin(\theta) \quad (3)$$

### 2.3 Equações de equilíbrio no plano.

O software de aquisição de dados fornece valores de aceleração normalizados em relação à aceleração da gravidade, o que equivale a considerar  $g=1$ . Estando o plano do acelerômetro situado horizontalmente à superfície terrestre, os valores normalizados em  $g$ , para  $\theta=0$  são:  $a_z = \cos(0)=1$  e  $a_y = a_x = \sin(0)=0$ .

Para outros valores de inclinação, os valores de  $a_z$  e  $a_y$  pelo acelerômetro são dados por:

$$a_z = \cos(\theta) \quad (4)$$

$$a_y = \sin(\theta) \quad (5)$$

As equações (4) e (5) são aplicadas ao acelerômetro em equilíbrio estático, fixo ao plano inclinado de um ângulo ( $\theta$ ) em relação à horizontal.

## 3. Medições

Foram obtidas experimentalmente as acelerações  $a_x$ ,  $a_y$  e  $a_z$  para ângulos variando de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  em intervalos de  $5^\circ$ . Foi desenvolvido um programa para receber e transmitir dados de aceleração. O software Excel foi utilizado para organizar os dados e produzir os gráficos.

### 3.1 Softwares para as aquisições de dados

O software para aquisição de dados de aceleração foi desenvolvido a partir de programas exemplo disponíveis na interface Arduino, mostrado na Figura 6.

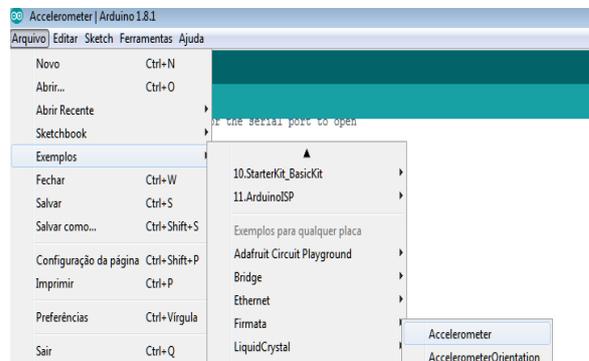


Figura 6. Acesso ao programa exemplo acelerômetro.

A descrição da interface de programação para o Arduino está descrito no site Arduino.cc e em referências como MCROBERTS [7].

O programa ajustado para este trabalho é mostrado na Figura 7 e descrito a seguir.

```
//Inclui a biblioteca para uso do acelerômetro
#include "CurieIMU.h"
void setup() {
// Inicia a comunicação serial
Serial.begin(9600); while (!Serial);
// Inicia o dispositivo
Serial.println("Initializing IMU device...");
CurieIMU.begin();
// Configura o acelerômetro
CurieIMU.setAccelerometerRange(2);
}
void loop() {
float ax, ay, az;
CurieIMU.readAccelerometerScaled(ax, ay, az);
// Envia dados medidos via serial para o computador
Serial.print("a:\t"); Serial.print(ax);
Serial.print("\t"); Serial.print(ay);
Serial.print("\t"); Serial.print(az);
Serial.println(); delay(1000);
}
```

Figura 7. Programa para acelerômetro.

A biblioteca "CurieIMU.h" oferece recursos para inicialização, operação e leitura do acelerômetro que foram realizadas em intervalos de 1 segundo. Funções de comunicação serial enviam dados do Arduino para o computador.

A Figura 8 mostra dados de aceleração transferidos via cabo USB em intervalos de um segundo e mostrados no programa Monitor Serial.

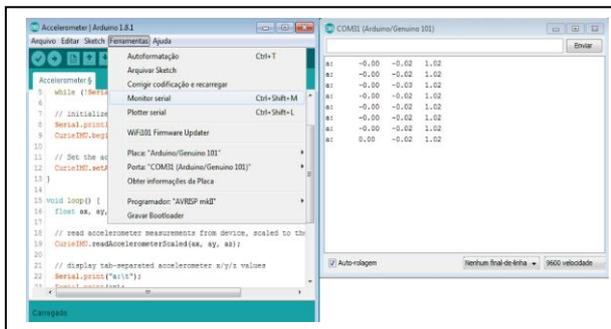


Figura 8. Dados apresentado no Monitor Serial.

Na Figura 8, à esquerda, estão mostrados os recursos para a edição de programas, compilação e transferência de dados para o Arduino.

O programa, gravado de forma permanente no Arduino, pode ser executado se o mesmo for alimentado por uma bateria de nove Volts (9V).

Neste trabalho, o cabo USB que conecta o computador pessoal ao Arduino, tem funções de alimentação da placa, transferência do programa do computador pessoal para o Arduino e transferência de dados produzidos pelo programa no Arduino (dados de aceleração) para o computador pessoal.

Os dados enviados do Arduino pelo cabo USB, ou seja, os valores das acelerações nas direções x, y e z, são recebidos pelo programa Monitor Serial e mostrados na Tabela I.

### 3.2 Medidas extraídas do experimento

As medidas de aceleração no plano inclinado nos eixos x, y e z são mostradas na Tabela I.

Tabela I. Aceleração no plano inclinado

Inclinação (θ)	az	ay	ax	cos(θ)	sin(θ)
0	1,02	-0,10	-0,03	1,000	0,000
5	1,02	-0,07	-0,03	0,996	0,087
10	1,01	0,17	-0,03	0,985	0,174
15	0,99	0,24	-0,03	0,966	0,259
20	0,97	0,33	-0,03	0,940	0,342
25	0,94	0,41	-0,03	0,906	0,423
30	0,90	0,49	-0,04	0,866	0,500
35	0,85	0,57	-0,04	0,819	0,574
40	0,80	0,64	-0,03	0,766	0,643
45	0,74	0,72	-0,03	0,707	0,707
50	0,67	0,76	-0,03	0,643	0,766
55	0,61	0,81	-0,03	0,574	0,819
60	0,54	0,86	-0,02	0,500	0,866
65	0,46	0,90	-0,02	0,423	0,906
70	0,39	0,94	-0,03	0,342	0,940
75	0,30	0,97	-0,03	0,259	0,966
80	0,22	0,99	-0,03	0,174	0,985
85	0,14	1,00	-0,02	0,087	0,996
90	0,01	1,01	-0,05	0,000	1,000

Com relação à Tabela I e conforme observado na Figura 2, a escala do transferidor no experimento varia de 0° a 45°. Neste experimento, para a obtenção de inclinações para ângulos de 45° até 90° foram superpostos dois planos inclinados, cada um com variações de 0° a 45°, mostrados na Figura 9.

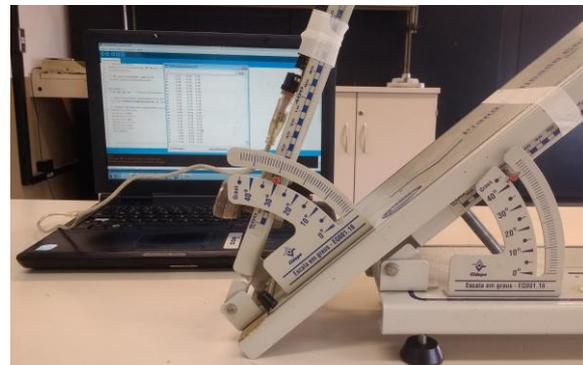


Figura 9. Acoplamento entre módulos.

A figura 9 mostra o acoplamento de dois planos inclinados. Ao fundo um computador pessoal se comunica com o Arduino 101 via cabo USB.

### 4. Análise dos dados

Na análise dos dados foram considerados aspectos quanto ao modelo proposto e aplicação prática do material desenvolvido. As equações (4) e (5) foram consideradas como referências para aferir a qualidade das medidas de aceleração em equilíbrio estático. Para isso, os dados experimentais foram comparados aos valores previstos pelas equações (4) e (5), foram tomadas como referência para aferir a qualidade das medidas.

## 4.1 Análises iniciais

Neste modelo, o acelerômetro é um sistema isolado que fornece a aceleração de três sistemas massa mola. Os valores previstos pelas equações (4) e (5) para  $\theta=0$  são:  $a_x=0$ ,  $a_y=0$  e  $a_z=1$ . Os valores apresentados na Tabela I são:  $a_x=-0,03$ ,  $a_y=-0,10$ , e  $a_z=1,02$ .

Para os demais ângulos, os valores de  $a_z$  e  $a_y$  foram comparados, respectivamente, com as funções  $\cos(\theta)$  e  $\sin(\theta)$ , mostrados na Tabela I e na Figura 10.

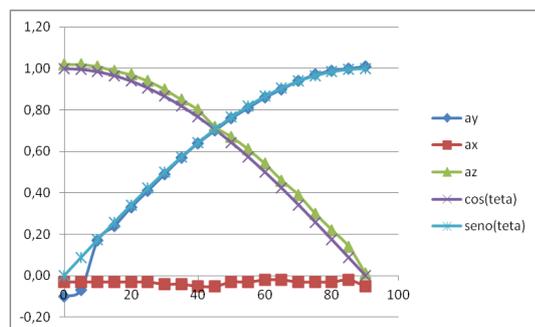


Figura 10. Acelerações  $a_z$ ,  $a_y$  e  $a_x$  no plano inclinado. Comparação com modelo teórico.

Na Figura 10, a componente  $a_z$  mostra diferença ao valor previsto pela função  $\cos(\theta)$  na equação (4) e essas diferenças não são constantes. O maior valor (0,048) ocorreu para a inclinação de  $70^\circ$ .

A Figura 10 mostra que  $a_y$ , segue aproximadamente a função  $\sin(\theta)$ , equação (5), para ângulos a partir de  $10^\circ$ . A maior diferença (-0,157) entre a aceleração  $a_y$  e a função  $\sin(\theta)$  ocorre para  $\theta=5^\circ$ .

A aceleração prevista na direção do eixo x é  $a_x=0$ , porém a figura 12 mostra uma pequena oscilação em torno do valor  $a_x=-0,03$ , também observado na Tabela I. Esta diferença pode ser atribuída às características físicas do acelerômetro e à fixação na placa.

As diferenças quanto aos valores de aceleração para inclinações em torno de  $0^\circ$  talvez possam ser atribuída à tecnologia da construção do acelerômetro (MEMS). Considerando (Figura 4) que o dispositivo faz uso de membranas de dimensões micrométricas, nada se pode afirmar quanto à linearidade da equação (1).

## 4.2 Análises para o modelo de aceleração

As equações (4) e (5) mostram a dependência de  $a_z$  e  $a_y$ , normalizados para  $g=1$ . Essa normalização obriga que os valores de  $a_z$  e  $a_y$  estejam restritos à faixa -1 a +1, devido à dependência senoidal. Estes limites não são observados na Tabela 1.

Propõe-se que modelo estático possa ser aplicado desde que os valores da Tabela 1 sejam normalizados para o intervalo -1 e +1. Neste caso, devem ser testadas outras formas de normalização das equações (2) e (3), ou outras escalas para os valores de aceleração na Tabela I. O teste ao modelo poderia ser feito com outros experimentos e recursos teóricos [8].

## 4. Conclusões

Este trabalho apresenta metodologia para análise de dados de aceleração obtidos pelo Arduino 101 como um objeto em equilíbrio estático em um plano inclinado.

O modelo representado pelas equações (4) e (5) parece caracterizar dados de aceleração fornecidos pelo Arduino 101 com as seguintes observações:

Considerando a precisão dos dados fornecidos pelo acelerômetro com duas casas decimais e escalas do transferidor graduadas em  $1^\circ$ , acredita-se que maior precisão na medida de inclinação não trará maiores informações ao método usado.

Não foi analisado o comportamento do acelerômetro para rotações completas em torno de cada eixo e se haveria simetria nessas medidas, equações (4) e (5).

Ampliar recursos do dispositivo para fornecer dados em tempo real e via comunicação sem cabo.

Os testes desenvolvidos podem orientar aplicações em como: medidas de inclinação; caracterizar corpos em movimento limitado; telemetria; agronegócio; etc.

## Agradecimentos

Ao professor João Mongelli Netto e ao auxiliar docente Domênico Paulo Bruno Cainelli (Laboratório de Física - Fatec-SP) e aos auxiliares docentes Julio Francisco Rodrigues de Souza e Milene Rodrigues da Conceição (DTI-Fatec-SP).

## Referências Bibliográficas

- [1] **Arduino Board 101**. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoard101>. Acesso em 30/05/2017.
- [2] **Arduino - Home**. Disponível em: <https://www.arduino.cc>. Acesso em 30/05/2017.
- [3] **Acelerômetro ADXL 150**. Disponível em: <http://www.eletrica.ufpr.br/edu/Sensores/1999/joao/funcionamento.htm>. Acesso em 30/05/2017.
- [4] Getting Started with IMU (6DOF) motion-sensor - Arduino Project Hub. Disponível em: <https://create.arduino.cc/projecthub/Aritro/getting-started-with-imu-6-dof-motion-sensor-96e066>. Acesso em 30/04/2017.
- [5] TELLES, D & MONGELLI, J. **Física com Aplicação Tecnológica. Vol. 1 - Mecânica**. 1ª. Ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2011. 312 pp.
- [6] M. A. SANTOS ET al. **Estudos do Comportamento do Acelerômetro no Plano Inclinado**. In: 15º Simpósio de Iniciação Científica e Tecnológica, 2015, São Paulo. Boletim Técnico da Faculdade de Tecnologia de São Paulo. São Paulo: Fatec-SP, 2015. v. 38. p. 12.
- [7] MCROBERTS, M. **Arduino Básico** São Paulo: NOVATEC. 2011, 453 pp.
- [8] **NOP - physical computing and tangible media**. Disponível em: <https://noperation.wordpress.com/2015/06/16/acelerometro-implementacao-de-um-sensor-de-orientacao-no-arduino-e-no-processing/> Acesso em 20/04/2017.