



Universidade de Brasília – UnB
Faculdade UnB Gama – FGA
Engenharia Eletrônica

Desenvolvimento de Sistema de Captura de Movimento Utilizando IMU

Autor: Eduardo Sousa Sales Rodrigues
Orientador: Prof. Dra. Lourdes Mattos Brasil

Brasília, DF
2018



Eduardo Sousa Sales Rodrigues

Desenvolvimento de Sistema de Captura de Movimento Utilizando IMU

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Universidade de Brasília – UnB

Faculdade UnB Gama – FGA

Orientador: Prof. Dra. Lourdes Mattos Brasil

Coorientador: MSc. Roberto Aguiar Lima

Brasília, DF

2018

Eduardo Sousa Sales Rodrigues

Desenvolvimento de Sistema de Captura de Movimento Utilizando IMU/ Eduardo Sousa Sales Rodrigues. – Brasília, DF, 2018-

48 p. : il.

Orientador: Prof. Dra. Lourdes Mattos Brasil

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília – UnB
Faculdade UnB Gama – FGA , 2018.

1. IMU.2. Prevenção de lesão.I. Prof. Dra. Lourdes Mattos Brasil.II. Universidade de Brasília.III. Faculdade UnB Gama.IV. Desenvolvimento de Sistema de Captura de Movimento Utilizando IMU

CDU 02:141:005.6

Eduardo Sousa Sales Rodrigues

Desenvolvimento de Sistema de Captura de Movimento Utilizando IMU

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 06 de agosto de 2018:

Prof. Dra. Lourdes Mattos Brasil
Orientador

MSc. Roberto Aguiar Lima
Coorientador

**Prof. Dra. Vera Regina da Silva
Marães**
Convidada

Brasília, DF
2018

*"Não vos conformeis com este mundo,
mas transformai-vos pela renovação do vosso espírito,
para que possais discernir qual é a vontade de Deus:
o que é bom, o que Lhe agrada e o que é perfeito."
(Bíblia Sagrada, Romanos 12, 2)*

Resumo

Palavras-chaves:IMU, MPU6050, prevenção de lesão

Abstract

This is the english abstract.

Key-words: latex. abntex. text editoration.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Ilustração esquemática de componentes MEMS	25
Figura 2 – Um motor MEMS ao lado de uma fio de cabelo humano.	25
Figura 3 – Eixos de orientação.	26
Figura 4 – Sensor inercial baseado em 2 sensores	26
Figura 5 – Princípio de funcionamento do acelerômetro.	28
Figura 6 – Imagem de microscopia eletrônica por varredura de um giroscópio di- pasão.	28
Figura 7 – Arduino Nano	32
Figura 8 – Esquemático de conexão do MPU6050 com Arduino Nano	36
Figura 9 – Transmissão de dados do MPU6050 para Arduino	37
Figura 10 – Transferência de dados com o protocolo I2C.	37
Figura 11 – Fluxograma do software de leitura dos dados.	38
Figura 12 – Fluxograma do software que salva os dados lidos.	40
Figura 13 – Gráficos com os 3 Eixos alinhados com a Normal.	43

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela de comparação dos modelos de Arduino	31
Tabela 2 – Conexões entre Arduino e MPU6050	36
Tabela 3 – História de Usuário	39

Lista de abreviaturas e siglas

IMU	Inertial Measurement Unit - Unidade de Medição Inercial
MEMS	Micro Electro Mechanical System - Sistema Micro-eletromecânico
HARM	High-Aspect-Ratio Micromachining - Micromaquinação de Alta Proporção
EMG	Eletromiografia
LIS	Laboratório de Informática e Saúde
ADC	Analog Digital Converter - Conversor Analógico-Digital
PDIP	Plastic Dual-In-line Package - Pacote de dupla linha de plástico
PQFP	Plastic Quad Flat Pack - Pacote de Encapsulamento Quadrado de Plástico
IDE	Integrated Development Environment - Ambiente de Desenvolvimento Integrado

Lista de símbolos

ω	Velocidade angular em rad/s
\varnothing	Diâmetro

Sumário

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Objetivos	22
1.1.1	Objetivo Geral	22
1.1.2	Objetivos Específicos	22
1.2	Justificativa	22
2	REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1	Prevenção de Lesões	23
2.2	MEMS	24
2.3	IMU	25
2.3.1	Acelerômetro	27
2.3.2	Giroscópio	27
2.3.3	MPU6050	29
2.3.4	Arduino	31
2.4	Python	33
3	METODOLOGIA	35
3.1	Projeto de Hardware	35
3.1.1	Materiais Utilizados	35
3.1.2	Métodos	36
3.2	Projeto de Software	37
3.2.1	Software para o Arduino	37
3.2.2	Software para Salvar os Dados	39
3.3	Validação	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1	Resultados	43
4.2	Discussão	43
5	CONCLUSÃO	45
	REFERÊNCIAS	47

1 Introdução

O interesse em analisar através de conceitos físicos o movimento corporal humano é bastante antigo. Estudos clássicos de pensadores como Aristóteles deixam claro que a relevância de analisar o movimento por meio de análise física data do século III a.C. Porém, mesmo com o estudo do movimento sendo antigo, a Biomecânica se consolidou como uma ciência e disciplina acadêmica no Brasil muito recentemente, historicamente falando, apenas na década de 60 com influencia do governo da Republica Federal da Alemanha que apoiou algumas universidades brasileiras a introduzir a Biomecânica nos cursos de Educação Física ([ACQUESTA et al., 2008](#)).

É essencial, para associar medidas físicas ao movimento, estudos relacionados à cinética e cinemática do movimento precisos. Com os dados adquiridos é possível realizar estudos de desempenho em atletas, pesquisas para prevenção de lesão e adquirir melhor entendimento da movimentação corporal humana como um todo([MCGINNIS, 2013](#)).

Dessa forma, a estudo da biomecânica do movimento se tornou muito importante para desenvolver atletas em diversos esportes. No caso de um velocista, a coleta e análise de dados sobre a velocidade, aceleração, postura e qualidade de movimento é útil para possibilitar a evolução de seu desempenho([OKAZAKI et al., 2012](#))

Para a coleta dos dados ser realizada, são necessários equipamentos, que estão sendo desenvolvidos, que possibilitam aos profissionais da área de esportes procurar por diferentes estratégias e métodos de treinamento, para obter melhores resultados de desempenho dos atletas([OKAZAKI et al., 2012](#)).

As unidade de sensores inercias ¹, são um exemplo desses equipamentos, e tornaram-se ferramentas muito úteis para aquisição de informações relacionadas a movimento corporal. Esses sensores são baratos, pequenos e permitem mobilidade quando integrados com módulos de comunicação sem fio. Porém, sua utilização necessita um conhecimento técnico e matemático específico e complexo ([OBERLANDER, 2015](#)).

A evolução desses sensores permitiu que a movimentação corporal fosse estudada em diversos ambientes e situações, sendo necessário apenas algumas unidades de sensores colocados nos pontos adequados. E assim os dados adquiridos são capazes de proporcionar algumas variáveis importantes como aceleração, velocidade angular, velocidade linear, altura, direção e ângulos, todos de forma não invasiva e sem a necessidades de ambientes fechados([CHANG; GEORGY; EL-SHEIMY, 2016](#)).

E a partir desses dados é possível fazer análises preditivas, diagnósticos de lesões,

¹ Inertial Measurement Units – IMU

movimentos assíncronos de membros corporais, má postura entre outros.

1.1 Objetivos

Os principais objetivos desse trabalho de conclusão de curso são os seguintes:

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolvimento de um IMU², integrado com um microcontrolador, para aquisição de movimentos e posições corporais em humanos a fim de auxiliar em pesquisas na área de prevenção de lesão.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar quais serão parâmetros que o IMU deve ser capaz de calcular.
- Desenvolver e realizar testes para validação dos resultados obtidos no IMU
- Desenvolver um *case* para que o IMU possa ser colocado em diversas parte do corpo humano
- Desenvolver Kit's para utilização dos pesquisadores do Laboratório de Informática e Saúde da Universidade de Brasília.

1.2 Justificativa

O sensor IMU tem inúmeras aplicações a área da saúde e dos esportes como avaliação de postura, assimetria de movimentos, análise de marcha, movimentos específicos de esportes entre outras. É um sensor essencial para pesquisas nessas áreas. E são poucos os trabalhos que tentam tornar esse sensor mais amigável para utilização por pesquisadores de diversas áreas que não tem o conhecimento matemático e de linguagens de programação necessários para trabalhar com ele.

Além disso, este sensor, exige um custo financeiro menor do que outros equipamentos utilizados nessa área de estudo, como o MOCAP³, por exemplo, é um equipamento que exige um ambiente interno com espaço específico, muitas câmeras para melhor precisão e sistemas que normalmente tem um custo financeiro alto.

Esse sensor deverá futuramente ser utilizado para pesquisas no laboratório LIS⁴ da Universidade de Brasília e auxiliar estudantes de graduação e mestrado em seus trabalhos.

² Inertial Measurement Unit - Unidade de Medição Inercial

³ Motion Capture

⁴ Laboratório de Informática e Saúde

2 Referencial Teórico

Nesta seção do artigo serão explicados conceitos importantes para realização do projeto, especificação de alguns materiais e a motivação para a escolha dos mesmos.

2.1 Prevenção de Lesões

O desempenho máximo de atletas pode ser muito afetado por lesões, causando inclusive perdas de medalhas olímpicas, por milímetros e frações de segundos. O estudo do corpo humano permite obter uma análise operacional dos atletas, ou seja, demonstrar diferentes parâmetros, tais como o sistema proprioceptivo, a estabilidade articular e a força muscular durante movimentos específicos, a mecânica dos tecidos biológicos utilizados no esporte, bem como o estudo morfofuncional dos atletas. Podendo assim promover a prevenção de lesões.([MIZIARA, 2014](#)).

O esforço feito pelo atleta durante práticas esportivas lhes proporcionam diversos efeitos fisiológicos. O ramo do conhecimento dedicado ao estudo efeitos fisiológicos agudos e crônicos dos exercícios físicos sobre os diversos sistemas corporais é a Fisiologia do Exercício. Contudo, os métodos de medição ou determinação destes estados do corpo humano em pleno emprego do seu esforço são muito importantes para diagnosticar e prevenir lesões, fortalecimento de musculatura e tendões, ou seja, todo o desempenho do atleta. ([ROCHA, 2005](#)).

Estes métodos utilizados analisam algumas características importantes, tais como velocidade, aceleração, posicionamento no espaço e necessitam de certa maneira, mais de que um olho treinado para uma análise real do movimento do corpo humano, dado que a prevenção de lesões e o desempenho dos atletas estão ligados à biomecânica esportiva deles([AMADIO, 2000](#)).

Dessa forma, as avaliações biomecânicas devem ir além do olhar clínico ao analisarem os parâmetros associados a lesões de atletas e estruturarem seus argumentos em sistemas que possam ser capazes de traduzir estes parâmetros ([MIZIARA, 2014](#)). Os métodos utilizados pela biomecânica para abordar as diversas formas de movimento são: eletromiografia, antropometria, dinamometria, cinemetria ([AMADIO; SERRÃO, 2007](#)).

A eletromiografia é a medição da atividade elétrica dos músculos relacionados a prática esportiva, a antropometria estabelece as propriedades físicas do corpo humano estudado como as medidas geométricas, a dinamometria parâmetros como força e distribuição de pressão em equipamentos específicos para cada atividade física e a cinemetria utiliza parâmetros como posição e orientação de partes do corpo humano que é o tipo de

medição tratado neste trabalho (AMADIO; SERRÃO, 2007)(MEDEIROS, 2012).

2.2 MEMS

MEMS¹ é uma tecnologia de processamento usada para criar dispositivos integrados ou sistemas que combinam componentes mecânicos e elétricos. Eles são fabricado usando técnicas de processamento em lote de circuitos integrados e pode variar em tamanho entre alguns micrômetros para milímetros. Esses dispositivos (ou sistemas) têm a capacidade de detectar, controlar e atuar na escala micro e gerar efeitos em escala macro(PRIME, 2002).

O termo MEMS, é um acrônimo originado nos Estados Unidos, também é conhecido como Microsystems Technology (MST) na Europa e Micromachines no Japão. Independentemente da terminologia, o fator de define um dispositivo MEMS está na maneira como é feito. Enquanto os aparelhos eletrônicos são fabricados usando tecnologia IC de 'chip de computador', os componentes micromecânicos são fabricados por sofisticadas manipulações com silício e outros substratos usando processos de micro-usinagem. Processos como micro-usinagem a granel e de superfície, bem como micromaquinação de alta proporção (HARM²) remove seletivamente partes do silício ou adiciona camadas estruturais adicionais para formar os componentes mecânicos e eletromecânicos. Enquanto circuitos integrados são projetados para explorar as propriedades elétricas do silício, o MEMS aproveita as propriedades mecânicas do silício ou suas propriedades elétricas e mecânicas(PRIME, 2002).

Na forma mais geral, os MEMS consistem em microestruturas mecânicas, micros sensores, microatuadores e microeletrônica, todos integrados no mesmo chip de silício (Fig. 1). Microsensores detectam mudanças no ambiente do sistema medindo informações ou fenômenos mecânicos, térmicos, magnéticos, químicos ou eletromagnéticos. Microeletrônica processa essa informação e sinaliza aos microatuadores para reagirem e criarem alguma forma de mudanças no meio ambiente(PRIME, 2002).

Os dispositivos MEMS são muito pequenos, seus componentes são geralmente microscópicos(Fig. 2). Alavancas, engrenagens, pistões, motores e até motores a vapor foram todos fabricados por MEMS. No entanto, MEMS não se refere apenas à miniaturização de componentes mecânicos ou à fabricação de coisas a partir do silício (na verdade, o termo MEMS é na verdade enganoso, já que muitos dispositivos micromachinados não são mecânicos em nenhum sentido). MEMS é uma tecnologia de fabricação; um paradigma para projetar e criar dispositivos e sistemas mecânicos complexos, bem como sua eletrônica integrada, utilizando técnicas de fabricação em lote(PRIME, 2002).

¹ Micro Electro Mechanical Systems - Sistema Micro-eletromecânicos

² high-aspect-ratio micromachining

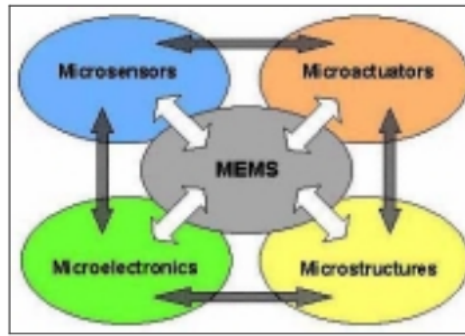


Figura 1 – Ilustração esquemática de componentes MEMS

Fonte: (PRIME, 2002)



Figura 2 – Um motor MEMS ao lado de uma fio de cabelo humano.

Fonte: (PRIME, 2002)

2.3 IMU

A história do sensor IMU começou em 1930, quando foi usado para auxiliar a navegação de aeronaves e outros dispositivos de grande porte. Por causa de suas restrições principalmente em tamanho, custo e consumo de energia, o uso da IMU naquele momento era restrito a aplicações em dispositivos grandes e, portanto, impopular para equipamentos de tamanho menor e em grande escala de consumo. Porém, recentemente, o sensor IMU feito por MEMS, foi introduzido com uma característica muito atraente de baixo custo, com poder de processamento e baixo custo. A demanda aumentou muito e as áreas de aplicação também. Atualmente, muitos fabricantes estão competindo nos melhores projetos de IMU, como Invensense, Honeywell, STMicroelectronics, Microstrain e X-Sens(AHMAD; GHAZILLA; KHAIRI, 2013).

Os sensores IMU podem ser capazes de medir diversas variáveis. Os mais comuns são feitos para medir 6 graus de liberdade. São 3 medidas de aceleração linear a partir de um acelerômetro e 3 medidas de aceleração angular feitas por um giroscópio (Fig.3)(SANTOS; VIEIRA; JUNIOR, 2016).

A vantagem de usar este tipo de IMU é que não será interferido pelo campo

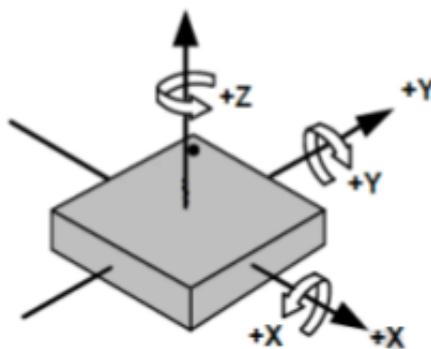


Figura 3 – Eixos de orientação.

Fonte adaptada de (INVENSENSE, 2013)

magnético externo em torno do sensor quando é usado muito próximo de material ferromagnético. Por outro lado, dependendo do acelerômetro e do giroscópio, pode não ser suficiente para aumentar a precisão da medição devido ao ruído dos sensores e à questão do desvio do giroscópio. Os dados adquiridos pelo IMU são integrados como a mostrado na Figura 4 (AHMAD; GHAZILLA; KHAIRI, 2013).

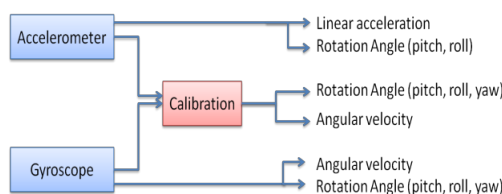


Figura 4 – Sensor inercial baseado em 2 sensores

Fonte adaptada de (AHMAD; GHAZILLA; KHAIRI, 2013)

E com essas variáveis adquiridas um padrão de movimento pode ser traçado, e assim podem ser feitas análises sobre a movimentação humana. Assim, junto com a EMG³, o uso de sensores inerciais tem sido mais solicitado na área de monitoramento de práticas esportivas(HOWARD, 2016).

Porém, a utilização de IMU's com equipamentos de comunicação sem fio, têm mostrado uma certa vantagem sobre o uso de sensores com EMG. Isso ocorre por conta de a integração entre acelerômetros, giroscópios e dispositivos de transmissão sem fio ser mais simplificada do que a aquisição de dados por eletromiógrafos sem fio(HOWARD, 2016).

Os testes que foram feitos com uso de sensores inerciais, segundo Howard,2016 , foram capazes de produzir dados relacionados com fadiga muscular, performance, postura e velocidade. O que possibilita melhores técnicas de treinamento e até mesmo prevenção de lesão pode ser realizada.

³ Eletromiografia

2.3.1 Acelerômetro

O que sensores de movimento são feitos para aferir uma taxa de variação de posição, ou seja o deslocamento que estiver ocorrendo. Assim, se a posição, $x(t)$, de um corpo varia ao longo tempo, então será obtida sua velocidade, $v(t)$, derivando essa mudança de posição ao longo do tempo. E ao derivar a variação de velocidade ao longo do tempo será calculada a aceleração, $a(t)$, do corpo (NUSSENZVEIG, 2013).

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} \quad (2.1)$$

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = \frac{d^2v(t)}{dt^2} \quad (2.2)$$

Um acelerômetro é capaz de medir a aceleração, e a partir desse dado é possível obter também a velocidade e posição. Basta fazer a operação inversa a derivada (NUSSENZVEIG, 2013).

$$v(t) = v(0) + \int_0^1 (a(t)dt) \quad (2.3)$$

$$x(t) = x(0) + \int_0^1 (v(t)dt) \quad (2.4)$$

Acelerômetros podem ser utilizados em muitas áreas, como na automotiva com air bags, na navegação, no monitoramento de máquinas, na saúde, jogos e outras. São diversos os processos físicos utilizados para desenvolver um sensor para medir aceleração. Em aplicações que envolvem voo, aviões e satélites, acelerômetros são baseados em propriedades de massas rotativas. Na indústria, porém, o projeto mais comuns são feitos a partir da combinação da lei de Newton de aceleração de massa e a lei de Hooke de ação de mola (CARNEIRO, 2003).

O acelerômetro escolhido para esse trabalho funciona a partir do efeito de cristais piezoelétricos, que é o princípio no qual alguns cristais geram uma corrente elétrica como resposta a uma pressão mecânica. Então o sensor acelerômetro funciona como na Figura 5 demonstra, como uma pequena caixa com uma esfera dentro, e as paredes são os cristais piezoelétricos. Sempre que a caixa é alterada de posição a esfera é forçada a se mover em direção de uma das paredes devido a força da gravidade ou de qualquer outra força de aceleração em outro sentido que não a normal. Cada par de paredes paralelos correspondem a um eixo no espaço. Assim, a partir da corrente gerada em cada parede é possível determinar a direção do movimento acelerado e sua magnitude (SANJEEV, 2018).

2.3.2 Giroscópio

Os giroscópios também são sensores de movimento, porém eles não medem aceleração linear como os acelerômetros, eles disponibilizam ao usuário a velocidade angular

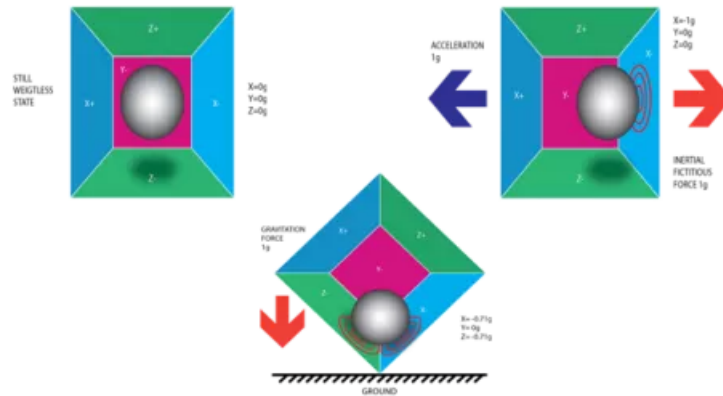


Figura 5 – Princípio de funcionamento do acelerômetro.

Fonte adaptada de (SANJEEV, 2018)

de um objeto em torno de um eixo. Em geral, os giroscópios feitos com tecnologia MEMS utilizam do efeito Coriolis, no qual um objeto que se encontra em um movimento de rotação, imprime na massa um movimento ortogonal a direção de rotação. Os giroscópios têm um princípio muito mais complexo que os acelerômetros, este e um dos motivos fizeram eles demorarem mais a parecer como dispositivos MEMS (ALMEIDA, 2014).

O giroscópio do tipo diapásão, modelo utilizado no trabalho, é constituído por duas massas paralelas que oscilam com a mesma amplitude, direção igual e sentidos opostos mostrado na Figura .

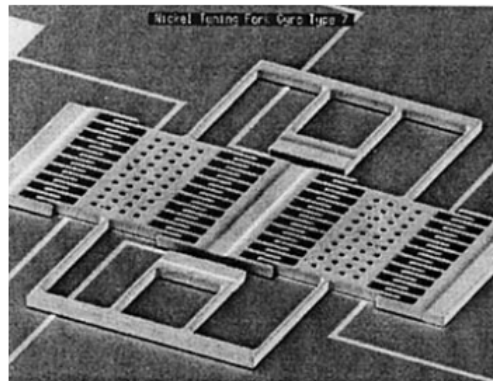


Figura 6 – Imagem de microscopia eletrônica por varredura de um giroscópio diapásão.

Fonte adaptada de (FORHAN, 2010)

Ao acontecer uma rotação, a força de Coriolis gera uma vibração ortogonal ao sentido do movimento de cada massa. A amplitude desse movimento pode ser medido de forma capacitiva. A utilização de dois giroscópios na mesma direção e em sentidos opostos aumenta a precisão da medição. Com a medida da força de Coriolis F_c , a medida das massas paralelas m , se movendo a uma determinada velocidade v , com relação a um

referencial fixo que possua uma velocidade angular ω é possível obter a aceleração de Coriolis a_c . (FORHAN, 2010).

$$F_c = 2mv\omega \quad (2.5)$$

$$a_c = 2v\omega \quad (2.6)$$

Com aceleração de Coriolis que é obtido pelo sensor a unidade de processamento do sensor é capaz de calcular a velocidade angular em $^\circ/s$. Com a velocidade angular em relação a cada eixo do espaço tridimensional sendo obtida, é possível encontrar posição angular do sensor e do objeto, ou corpo, em que ele estiver acoplado (FORHAN, 2010)(NUSSENZVEIG, 2013).

A unidade de medida padrão de velocidade angular é rad/s. Então, com o intuito de converter o valor obtido para o padrão internacional:

$$1\pi rad = 180^\circ \quad (2.7)$$

$$1\pi rad/s = 180^\circ/s \quad (2.8)$$

$$\frac{\pi}{180} rad/s = (\frac{180}{180})^\circ/s \quad (2.9)$$

$$\frac{\pi}{180} rad/s = 1^\circ/s \quad (2.10)$$

2.3.3 MPU6050

O MPU6050, é da série MPU60X0, foi a primeira interface de movimento a integrar 6 eixos de leitura em um dispositivo único. Esse sensor de movimento, integra 3 eixos de um acelerômetro e 3 eixos de um giroscópio e um DMP ⁴ tudo em um pequeno componente medindo 4x4x0.9mm. As suas principais qualidades são seu tamanho reduzido, o baixo consumo de energia, alta precisão e confiabilidade, alta tolerância a choques mecânicos, tem seu desempenho programável para aplicações específicas e ainda um baixo custo financeiro. (INVENSENSE, 2013).

O protocolo de comunicação utilizado pelo MPU6050 é o I2C⁵. Que é um protocolo de barramento, e com os mesmos dois fios podem ser conectados vários dispositivos,

⁴ *Digital Motion Processor* - Processador Digital de Movimento

⁵ *Inter-Integrated Circuit* - Circuito Inter-Integrado

um sendo o *master* e os outros como *slave*. Esta é uma característica boa para reduzir a quantidade de pinos necessários para conexão de mais dispositivos no microcontrolador.(INVENSENSE, 2013)

As aplicações, sugeridas pelo fabricante, para o MPU6050 são diversas, abaixo estão listadas algumas delas:

- Tecnologia *BlurFree*^{TM6}
- Controles para jogos baseados em movimento
- Sensores em roupas TouchAnywhere para aplicação na saúde e esportes
- Tecnologia *MotionCommand*^{TM7}
- Em brinquedos

Características do MPU6050

- O giroscópio, MEMS de 3 eixos do MPU6050, possui as seguintes características segundo (INVENSENSE, 2013):
 - Saídas digitais com os valores de velocidade angular para os eixos X,Y e Z com escalas programáveis entre $\pm 250, \pm 500, \pm 1000$ e ± 2000 °/seg
 - Conversores ADCs⁸ de 16 bits integrados permitem amostragem simultânea do giroscópio
 - Corrente de operação: 3.6mA
 - Bom desempenho com ruído de baixa frequência
 - Filtro passa-baixa programável.
 - Fator de escala de sensibilidade calibrado de fábrica.
- O acelerômetro, MEMS de 3 eixos do MPU6050, possui as seguintes características segundo (INVENSENSE, 2013):
 - Saídas digitais dos 3 eixos do acelerômetro com escalas programáveis entre $\pm 2g, \pm 4g, \pm 8g$ e $\pm 16g$. Sendo ‘g’ uma constante que equivale a aceleração da gravidade⁹
 - Conversores ADCs de 16 bits integrados permitem amostragem simultânea do acelerômetro sem a necessidade de um multiplexador
 - Orientação, detecção e sinalização

⁶ Para estabilização de imagens e videos.

⁷ Para comandos de movimento curtos

⁸ Analog Digital Converter - Conversor Analógico Digital

⁹ aproximadamente $9,81m/s^2$

2.3.4 Arduino

O Arduino é uma plataforma de desenvolvimento de código aberto que contém elementos de hardware e software especificamente adaptados à simplicidade de uso, permitindo uma rápida prototipagem de projetos. Placas Arduino têm grande potencial de desenvolvimento e uma ampla gama de recursos para uso em conjunto com sensores, transceptores de dados e atuadores, os quais são de grande interesse para este projeto (SMITH, 2016).

Uma das maiores vantagens do Arduino sobre outras plataformas de prototipagem com microcontroladores é a facilidade para utilizá-la, que permite que pessoas que não necessariamente são da área de tecnologia, possam aprender rapidamente o básico e criar seus próprios projetos. E existe um grande compartilhamento de projetos de forma livre utilizando essa plataforma. Isso é relevante para esse projeto em específico, pois ele está sendo desenvolvido para utilização de pesquisadores de diversas áreas do conhecimento. Os quais poderão aprender a adaptar o projeto para suas necessidades e demandas futuras (ROBERTS, 2011).

Existem diversos modelos de placas Arduino no mercado, as mais utilizadas são Lilypad, Uno, Mini Pro, Mega e Nano. Cada uma dessas placas possuem suas particularidades em relação ao número de recursos, formato físico, memória e capacidade de processamento. Na Tabela 1 estão listados alguns modelos e suas características (SMITH, 2016).

Tabela 1 – Tabela de comparação dos modelos de Arduino

Modelos	Lilypad	Uno	Pro	Mega	Nano
Microcontrolador	ATmega32u4	ATmega328P	ATmega238	ATmega2560	ATmega328P
Tensão de Operação	3.3V	5V	3.3/5V	5V	5V
Tensão de Entrada	3.8-5V	7-12V	5-12V	7-12V	5-12V
Pinos Digitais	9	14	14	54	14
Entradas Analógicas	4	6	6	16	8
Memória Flash	32kB	32kB	32kB	256kB	32kB
Velocidade do Clock	8MHz	16MHz	8/16MHz	16MHz	16MHz
Dimensões Físicas	50mm \varnothing	68.6 x 53.4mm	52 x 53mm	101.5x53.5mm	18,5 x 43,2mm
Custo Aproximado	R\$ 22,00	R\$ 54,00	R\$ 50,00	R\$ 80,00	R\$ 24,00

Fonte adaptada: (SMITH, 2016)

O modelo escolhido para este projeto foi o Arduino Nano, mostrado na Figura 7, pois mesmo sendo apenas um protótipo, haverá a necessidade de que o tamanho do IMU seja reduzido para facilitar a fixação em diversas partes do corpo e o custo financeiro¹⁰ para desenvolvimento do protótipo foi levado em consideração.

O Arduino Nano tem funcionalidades muito semelhantes às do Arduino Duemilanove, mas com um formato diferente. O Nano possui o microcontrolador ATmega328P

¹⁰ Preços pesquisados em lojas de Brasília.

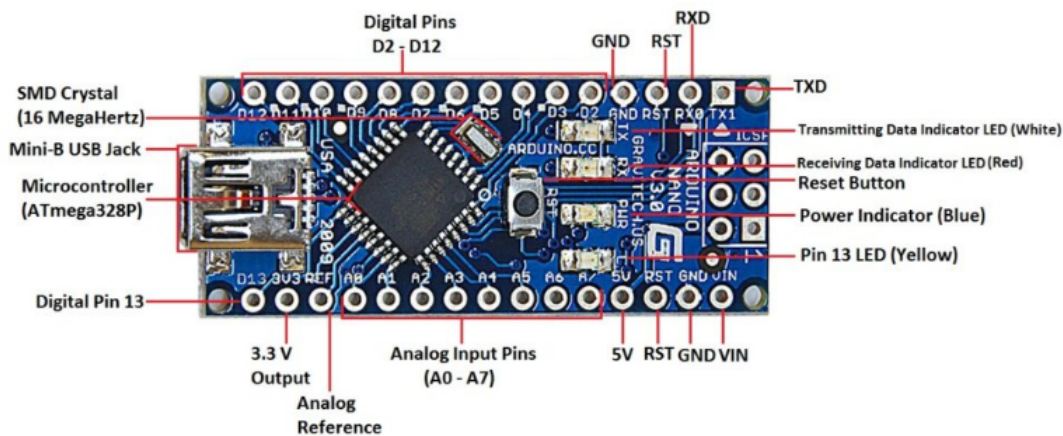


Figura 7 – Arduino Nano

Fonte adaptada de (JOHN, 2018)

embutido nele, o mesmo que o Arduino UNO. A principal diferença entre eles é que a placa UNO é apresentada em formato PDIP¹¹ com 30 pinos e Nano está disponível em PQFP¹² com 32 pinos. Os 2 pinos extras do Arduino Nano servem para as funcionalidades do ADC, enquanto o UNO possui 6 portas ADC, o Nano possui 8. A placa Nano não vem com um conector para fonte DC¹³ como outras placas Arduino, mas possui uma porta mini-USB. Esta porta é usada para programação, monitoramento serial e alimentação de energia, se necessário. A característica fascinante do Nano é que ele escolherá a fonte de energia mais forte com sua diferença de potencial, e o *jumper* de seleção de fonte de energia é inválido (JOHN, 2018).

Para se comunicar com qualquer microcontrolador ou computador, é necessário usar uma linguagem de programação, no caso do Arduino, é necessário usar a linguagem C++¹⁴, que é uma linguagem tradicional e já bastante conhecida. Porém essa linguagem ainda não é a que a máquina compreende, é uma linguagem de alto nível, e para a máquina compreendê-la é necessário o uso de um compilador, que converte a linguagem de alto nível para a linguagem de máquina. Em geral, para compilar um programa é necessário a utilização de um IDE¹⁵, um aplicativo de computador que possui um compilador integrado. A plataforma do Arduino utiliza o Arduino IDE (CHAVIER, 2016).

¹¹ Plastic Dual-In-line Package

¹² Plastic Quad Flat Pack

¹³ Direct Current - Corrente Contínua

¹⁴ Com alguma modificações

¹⁵ Integrated Development Environment

2.4 Python

Python é uma linguagem de programação poderosa, mas fácil de usar, desenvolvida por Guido van Rossum, em 1991. Com o Python, você pode escrever rapidamente um pequeno projeto e também, por se adaptar bem, pode ser usado para aplicativos comerciais. Uma prova de como é uma linguagem comercial é ela ser utilizada por empresas como Google, IBM, NASA, Xerox, Yahoo e outras grandes empresas (DAWSON, 2010).

O principal objetivo de qualquer linguagem de programação é fazer uma ponte entre o programador e a máquina. E as maioria das linguagens de programação tornam essa comunicação mais próxima da humana, mas o Python é tão direto que, segundo (DAWSON, 2010), é chamada de "programação na velocidade do pensamento", essa facilidade se traduz na alta produtividade de programadores profissionais. Os quais com ele conseguem fazer programas mais curtos e mais rápidos de escrever do que com outras linguagens de programação.

Python é uma boa linguagem para aplicações científicas porque é fácil traduzir raciocínio em algoritmos através dela, é simples ler um código em Python e conseguir entender o raciocínio por trás dele, por ser uma linguagem com poucos caracteres especiais, poucas palavras chaves utilizadas apenas para compilar e ter uma sintaxe muito próxima da linguagem falada (REITZ, 2018).

Além disso, é uma linguagem de propósito geral. Muitas vezes, é necessário lidar com tarefas laterais: buscar dados em um banco de dados remoto, ler uma página na internet, exibir graficamente os resultados, criar uma planilha, etc. Linguagens de cunho especificamente científico têm um sério problema aí, mas, uma vez que Python é utilizada em praticamente todos os tipos de tarefa, encontram-se módulos prontos para realizar essas tarefas que podem se tornar complicadas. Ou seja, é uma preocupação a menos para quem está desenvolvendo aplicações científicas (DOWNEY, 2012).

3 Metodologia

Nesta seção será apresentado quais foram os materiais e métodos utilizados para implementação do projeto, tanto da parte de hardware (parte de física) quanto a parte de software. A principal metodologia utilizada foi baseada em scrum, que é um método ágil iterativo incremental, onde o projeto foi dividido em ciclos de 15 dias chamados de "*sprints*". A cada *sprint*, algumas atividades são retiradas do *backlog*¹, colocadas no campo "*do*"² e tem de ser resolvidas até o início da próxima *sprint*, onde as atividades realizadas serão avaliadas, validadas ou não, se estiverem atendendo ao requisito são enviadas para o "*done*"³, se não estiverem atendendo as necessidades, elas voltam ao *backlog* ou para o *do*.

Os requisitos do projeto, que compuseram o backlog e definiram os objetivos desse projeto foram relacionados com o auxílio dos pesquisadores do Laboratório de Informática e Saúde e alunos de mestrado da UnB.

3.1 Projeto de Hardware

3.1.1 Materiais Utilizados

- sensor MPU6050;
- Arduino Nano V.3;
- Fios(*jumpers*);
- Cabo USB;
- Computador com Arduino IDE e Python instalados;
- Jupyter Notebook;
- Tiras de velcro;
- Cabo flat (8 fios);
- Protoboard.

¹ Conjunto de requisitos que ainda não foram solucionados.

² Campo onde estão as atividades a serem realizadas durante a *sprint*.

³ Conjunto de atividades que já foram feitas e validadas

3.1.2 Métodos

Para realizar a comunicação do sensor MPU6050 com o Arduino foi feita a conexão conforme o esquemático mostrado na Figura 8 e a Tabela 2, logo abaixo, onde os pinos Vcc e Gnd do MPU6050, responsáveis por ligar do sensor, foram conectados aos pinos 5V e Gnd do Arduino, o pino SDA⁴ foi conectado ao pino SDA do Arduino, que também é o pino de entrada analógica A4 e o pino SCL⁵ ao pino SCL do Arduino, que também é o pino de entrada analógica A5.

Para os primeiros testes foi utilizada um *protoboard* para facilitar as conexões, pois ela permite que os componentes sejam conectado sem a necessidade de solda entre eles. Mas em um segundo momento para os teste de movimento serem realizados com maior acurácia, houve a necessidade de retirar os componentes da *protoboard* e soldá-los em um placa furada de cobre, e isso faria o ruído devido a conexões instáveis fosse menor.

Tabela 2 – Conexões entre Arduino e MPU6050

Arduino	MPU6050
5V	VCC
GND	GND
A4	SDA
A5	SCL
Fonte:	autoria própria

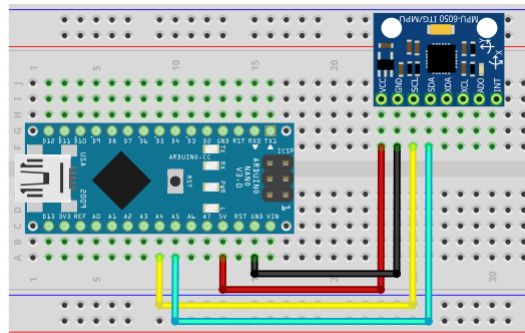


Figura 8 – Esquemático de conexão do MPU6050 com Arduino Nano

Fonte: autoria própria.

A comunicação entre o sensor MPU6050 e o Arduino foi realizada através do protocolo I2C, onde os dados eram enviados de forma serial através de apenas um fio e os dados organizados como mostrado na Figura 9, onde é evidenciado quais são os dados transmitidos do MPU6050 para o Arduino e a velocidade do *clock*, e Figura 10, que mostra com mais detalhe a relação dos dados com o *clock*.

O Arduino Nano foi conectado ao computador por meio de um cabo USB 2.0, que além de ser responsável pela comunicação, também era por meio dele que era realizada a

⁴ Pino de transferência de dados

⁵ Pino de sincronização do *clock*

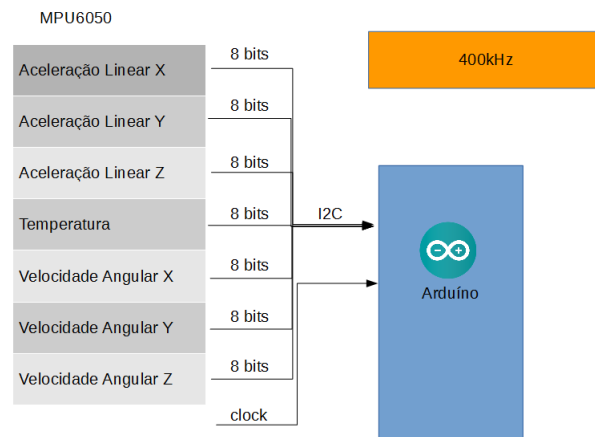


Figura 9 – Transmissão de dados do MPU6050 para Arduino

Fonte: autoria própria.

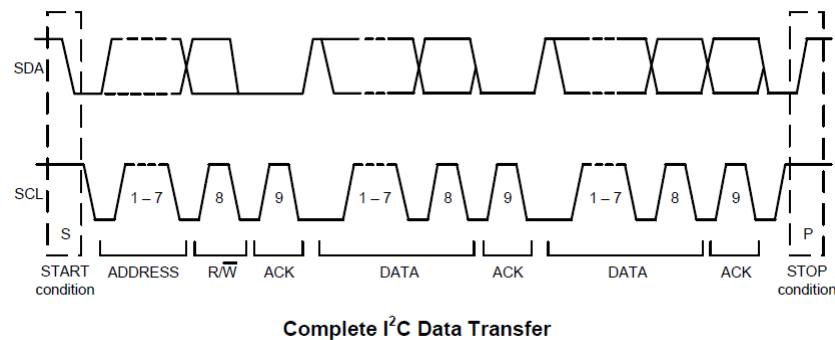


Figura 10 – Transferência de dados com o protocolo I2C.

Fonte: (INVENSENSE, 2013).

alimentação de energia com 5V de tensão. O protocolo de comunicação utilizado com um cabo USB também serial. Então os dados transmitidos do Arduino para o computador são enviados em série.

3.2 Projeto de Software

Para esse projeto foram necessários dois projetos de softwares, um para ficar salvo no Arduino e outro que será o software, em Python, responsável por fazer o tratamento dos dados adquiridos do sensor e salva-los para análises futuras.

3.2.1 Software para o Arduino

Os requisitos do software salvo no microcontrolador são:

- Inicializar o MPU6050;

- Receber os dados do MPU6050;
- Enviar os dados para interface serial.

Para isso foi utilizada as bibliotecas *Wire.h*, *I2Cdev.h* e *MPU6050.h*, que são responsáveis por realizar a comunicação em I2C, enviar o comando de inicialização, a variável escolhida pelo usuário para definir os limites de leitura do acelerômetro e do giroscópio, e são estas bibliotecas que realizam a leitura dos registradores que tem o valor de cada sensor armazenado neles.

O fluxograma do software responsável pela leitura dos dados do MPU6050 e envio para a interface de comunicação serial é o mostrado na Figura 11.

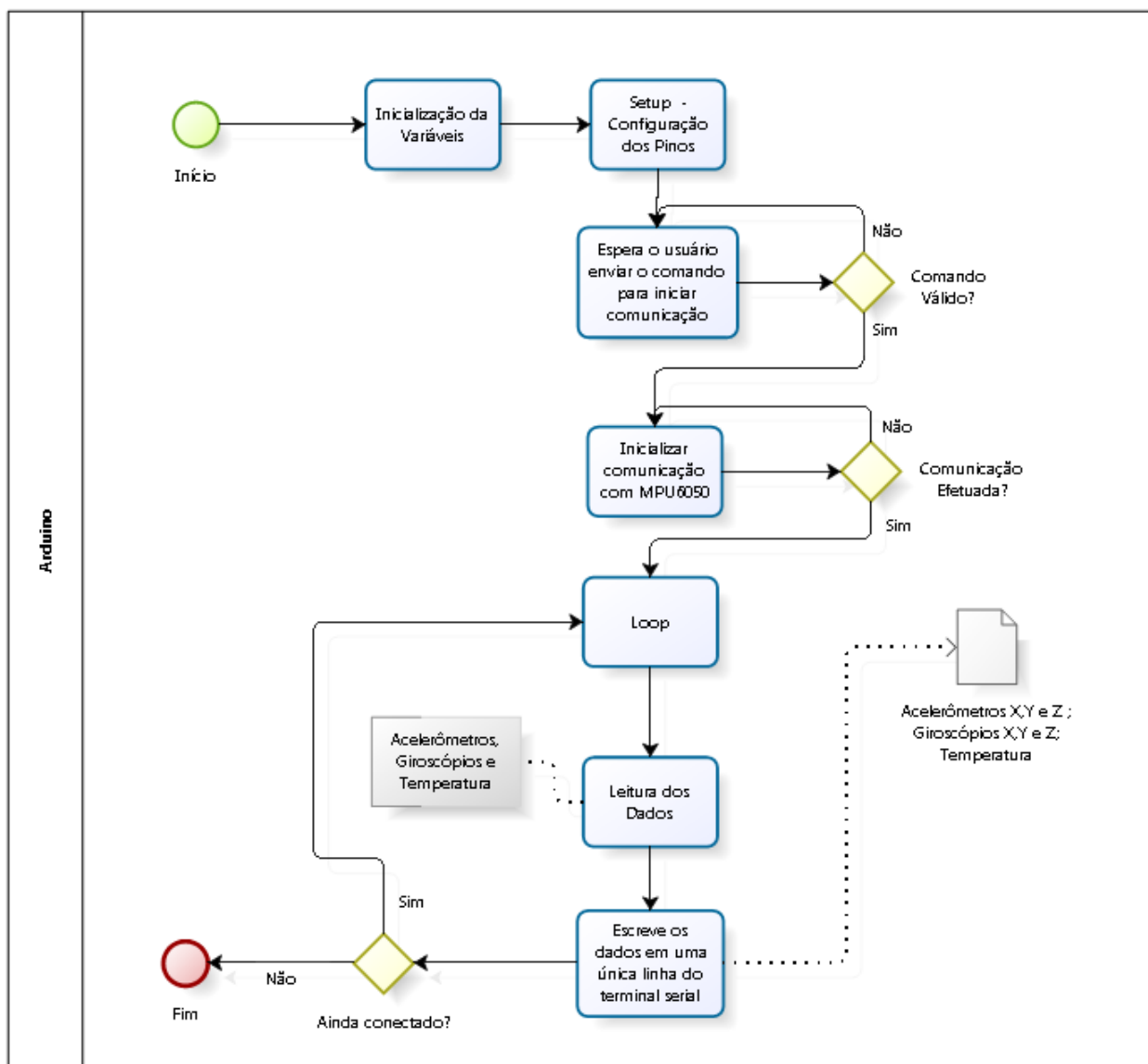


Figura 11 – Fluxograma do software de leitura dos dados.

Fonte: autoria própria.

Para realizar a transmissão dos dados do Arduino para o programa em Python, o programa salvo no Arduino imprime no terminal serial os dados obtidos do sensor. O programa é fechado sempre que uma nova leitura é realizada.

3.2.2 Software para Salvar os Dados

Esse segundo programa, foi feito para realizar a leitura dos dados transmitidos pelo Arduino, e salvar-los em um arquivo de texto, para futuras análises. Esse software ainda dá a possibilidade do usuário salvar os dados sem nenhum tratamento ou os valores com medidas físicas aproximadas das medições realizadas.

O software foi escrito em Python 3 e compilado com o Jupyter Notebook e com a IDE Spyder, os dois compiladores são do pacote Anaconda.

O programa inicia mostrando a lista de dispositivos USB conectados ao computador, se não houver nenhum dispositivo conectado aparece a mensagem "Conecte o Arduino", se houver, a mensagem que aparece pede para digitar o número correspondente ao dispositivo que o usuário pretende verificar os dados.

Após a escolha do Arduino, o usuário deve escolher entre as 4 possibilidades de escala dos dados obtidos. E em seguida pressionar "enter" para iniciar a leitura e "Ctrl+C"⁶ para pausar e salvar os valores. O programa então imprime na tela os valores dos sensores que estão sendo lidos e ao fim do código, quando o usuário pressionar "Ctrl+C", os valores são salvos em dois arquivos nomeados com a data de quando foi finalizada a leitura, como mostrado na Figura 12.

Para definir melhor os requisitos do software, foi feita a seguinte história de usuário descrita na Tabela 3

Tabela 3 – História de Usuário

Usuário	O que quer fazer?	Resposta do Sistema
Pesquisador	Inicializar o sistema	Abre o prompt de comando
Pesquisador	Selecionar o sensor	Mostra a lista de dispositivos conectados Estabelecer a conexão com sensor
Pesquisador	Selecionar o intervalo	Mostra a lista de intervalo de leitura Mensagem de qual intervalo foi selecionado
Pesquisador	Iniciar coleta	Aguarda comando para iniciar a coleta Inicia a coleta
Pesquisador	Pausar coleta e salvar Dados	Aguarda comando para pausar coleta Para a coleta
		Fecha a conexão Salva os dados coletados Mensagem com nome dos arquivos

Fonte: autoria própria

⁶ No Jupyter Notebook o "Ctrl+C" não funcionou, precisando assim pressionar o ícone de "stop" disponível na tela.

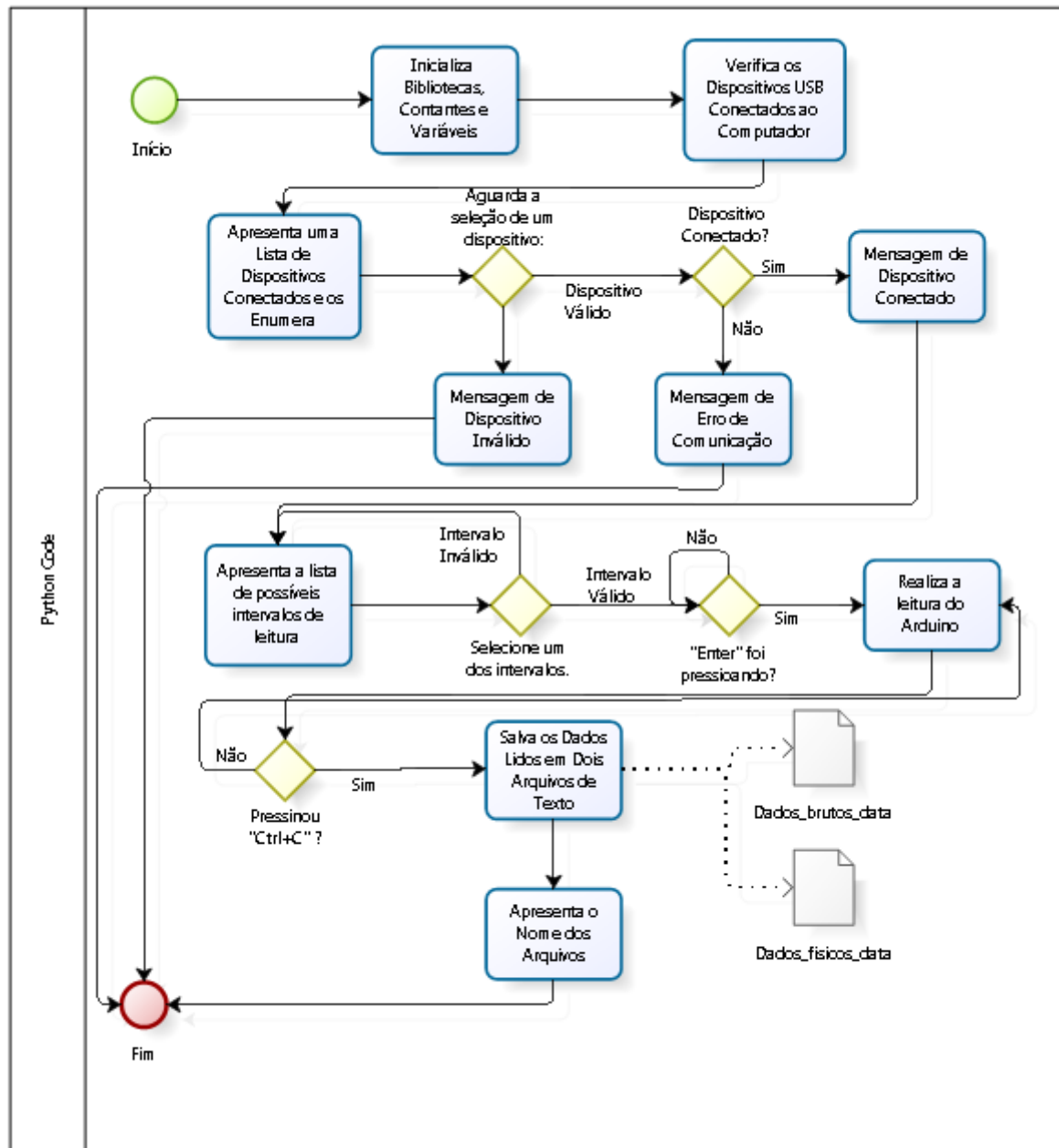


Figura 12 – Fluxograma do software que salva os dados lidos.

Fonte: autoria própria.

3.3 Validação

Para testar o funcionamento dos acelerômetros do IMU, foi feito um teste simples. Pois o sempre que o sensor estiver "parado", ele estará sobre efeito da força peso e consequentemente da aceleração da gravidade de aproximadamente $9,8 \text{ m/s}^2$. Então para verificar, foi necessário testar o sensor com um eixo de cada vez alinhado com a normal, como na seguinte Figura .

Após realizar as leitura, os dados foram plotados em um gráfico simples, onde o eixo horizontal representa o tempo e o vertical a aceleração medida. Foram colocados os

gráficos dos 3 eixos na mesma imagem.

Para verificar se os giroscópios estavam funcionando, sem ainda se atentar a precisão deles e confiabilidade das medidas, foi realizado um movimento de rotação de 90° em relação a cada um dos eixos e ao fim da leitura do sensor o resultado foi plotado em um gráfico para facilitar a análise.

Para verificar o funcionamento do MPU6050 e se as leituras são confiáveis, ou não, serão necessários muitos outros testes além dos realizados até o momento, como comparação dos valores obtidos medindo movimentos corporais ao mesmo tempo que uma gravação de vídeo é realizada, e verificar se os valores obtidos com o IMU são condizentes com as imagens gravadas. E também um possível estudo de caso, ainda a ser formulado, com o auxílio dos pesquisadores do LIS. Realizando as medições em voluntários para estudo de movimentos corporais.

4 Resultados e Discussão

4.1 Resultados

RESULTADOS: Fotos microcontrolador; fotos imu; gráficos; programas; ARQUIVOS SALVOS.

Os gráficos apresentados na Figura 13, mostram o resultado do teste para medir a aceleração da gravidade com cada um dos 3 acelerômetros.

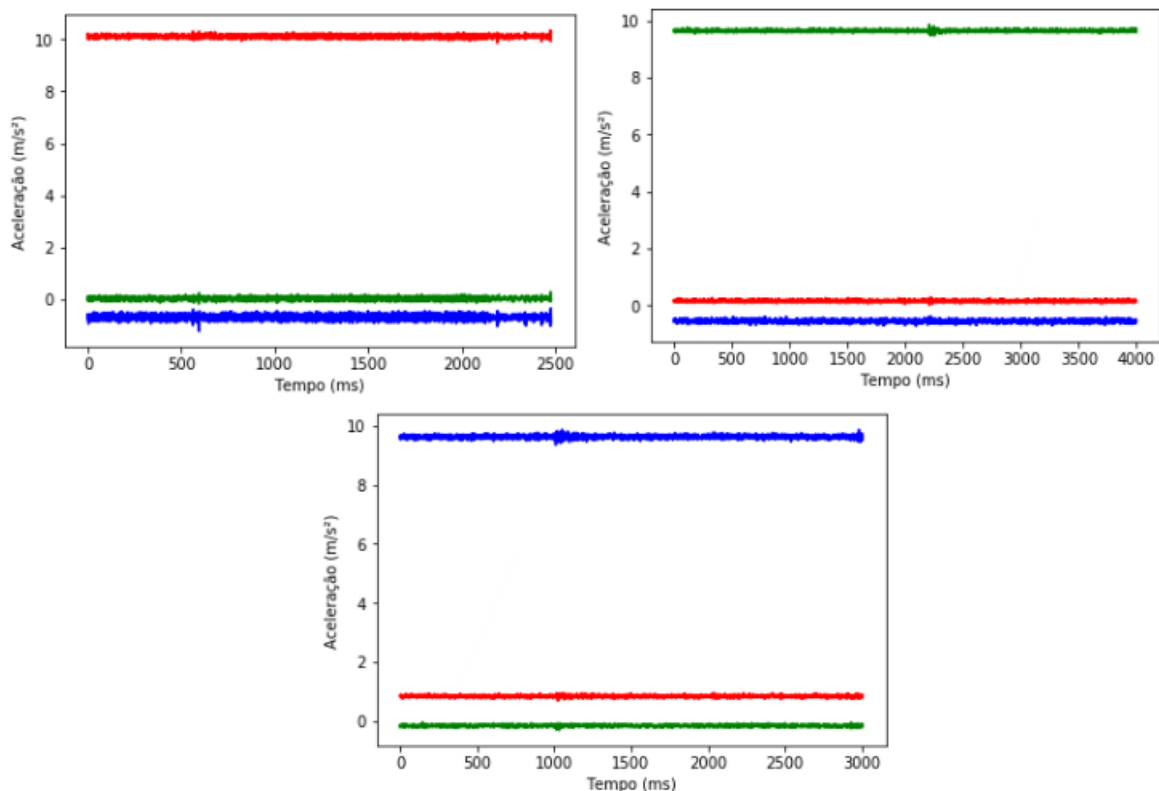


Figura 13 – Gráficos com os 3 Eixos alinhados com a Normal.

Na imagem esquerda o Eixo X está alinhado, a direita o Eixo Y e ao centro o Eixo Z.

Fonte: autoria própria.

4.2 Discussão

DISCUSSÃO: tempo para desenvolver interface gráfica. responder o porque dos erros, e o porque das escolhas. Ruído devido ao movimento do próprio corpo humano.

5 Conclusão

Feito protótipo, software para pesquisador, próximas etapas: case miniaturizado, comunicação sem fio.

Referências

- ACQUESTA, F. M. et al. Estudo da biomecânica do movimento humano no brasil. *Revista Brasileira de Biomecânica*, 2008. Citado na página 21.
- AHMAD, N.; GHAZILLA, R. A. R.; KHAIRI, N. M. Reviews on various inertial measurement unit (imu) sensor applications. *International Journal of Signal Processing Systems*, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- ALMEIDA, V. M. de. Sensores inerciais. 2014. Acesso em: 06/07/2018. Disponível em: <<http://www.decom.ufop.br/imobilis/sensores-inerciais/>>. Citado na página 28.
- AMADIO, A. C. Metodologia biomecânica para o estudo das forças internas ao aparelho locomotor: importância e aplicações no movimento humano. In: *A Biomecânica do Movimento e Suas Relações Interdisciplinares*. São Paulo, Brasil: [s.n.], 2000. p. 45–70. Citado na página 23.
- AMADIO, A. C.; SERRÃO, J. C. Conyextualização da biomecânica para a investigação do movimento: fundamentos, métodos e aplicações para análise da técnica esportiva. In: *Revista Brasileira de Educação Física e Esporte*. São Paulo, Brasil: [s.n.], 2007. v. 21, p. 61–85. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.
- CARNEIRO, F. M. Levantamento bibliográfico das tecnologias dos acelerômetros comerciais. 2003. Acesso em: 05/07/2018. Disponível em: <http://www.fem.unicamp.br/~lotavio/tgs/2003_BibliografiaDeAcelerometros_TG_FelipeCarneiro.pdf>. Citado na página 27.
- CHANG, H.; GEORGY, J.; EL-SHEIMY, N. Improved cycling navigation using inertial sensors measurements from portable devices with arbitrary orientation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2016. Acesso em: 29/06/2018. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7112512/citations?tabFilter=papers>>. Citado na página 21.
- CHAVIER, L. F. Programação para arduino. 2016. Acesso em: 05/07/2018. Disponível em: <<<https://www.circuitar.com.br/tutoriais/programacao-para-arduino-primeiros-passos/>>>. Citado na página 32.
- DAWSON, M. *Python® Programming for the Absolute Beginner, Third Edition*. Massachusetts - USA: Cengage Learning, 2010. 480 p. Citado na página 33.
- DOWNEY, A. *Think Python: How to Think Like a Computer Scientist*. Massachusetts - USA: Green Tea Press, 2012. 240 p. Citado na página 33.
- FORHAN, N. A. E. Giroscópios mems. São José dos Campos - SP, Brazil, 2010. Acesso em: 05/07/2018. Disponível em: <<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/01.25.18.42>>>. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.
- HOWARD, R. Wireless sensor devices in sports performance. *IEEE Potentials*, 2016. Citado na página 26.

- INVENSENSE, I. *MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4*. [S.l.], 2013. Citado 4 vezes nas páginas 26, 29, 30 e 37.
- JOHN, D. Arduino nano tutorial - pinout and schematics. 2018. Acesso em: 09/07/2018. Disponível em: <<<http://www.circuitstoday.com/arduino-nano-tutorial-pinout-schematics>>>. Citado na página 32.
- MCGINNIS, R. S. *Advancing Applications of IMUs in Sports Training and Biomechanics*. Tese (Doutorado) — University of Michigan, 2013. Citado na página 21.
- MEDEIROS, M. F. Identificação de assimetrias bilaterais dos membros inferiores por meio de salto vertical. Minas Gerais, Brasil, 2012. Citado na página 24.
- MIZIARA, I. M. Proposta de um sistema para avaliação biomecânica de atletas de taekwondo. Uberlândia - MG, Brasil, 2014. Citado na página 23.
- NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de Física Básica: Mecânica*. [S.l.]: Blucher, 2013. v. 1. 336 p. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 29.
- OBERLANDER, K. D. *Inertial Measurement Unit (IMU) Technology: Inverse Kinematics: Joint Considerations and the Maths for Deriving Anatomical*. Tese (Doutorado) — University of Koblenz-Ladau, 2015. Citado na página 21.
- OKAZAKI, V. H. A. et al. Ciência e tecnologia aplicada à melhoria do desempenho esportivo. *Revista Mackenzie de Educação Física e Esporte*, 2012. Citado na página 21.
- PRIME. *An Introduction to MEMS (Micro-electromechanical Systems)*. [S.l.]: Prime Faraday Technology Watch, 2002. 56 p. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- REITZ, K. *Python Guide Documentation*. [S.l.: s.n.], 2018. v. 1. 129 p. Citado na página 33.
- ROBERTS, M. M. *Arduino Básico*. São Paulo, Brazil: Novatec, 2011. 456 p. Citado na página 31.
- ROCHA, M. Fisiologia do exercício. In: *Atlas do esporte no Brasil*. Rio de Janeiro, Brasil: [s.n.], 2005. p. 657 – 659. Citado na página 23.
- SANJEEV, A. How to interface arduino and the mpu 6050 sensor. 2018. Acesso em: 08/07/2018. Disponível em: <<https://maker.pro/arduino/tutorial/how-to-interface-arduino-and-the-mpu-6050-sensor>>. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- SANTOS, C. P.; VIEIRA, M. E. M.; JUNIOR, S. L. S. Sensores inercias aplicados à marcha humana no esporte. *SEA-Seminário de Eletrônica e Automação*, 2016. Citado na página 25.
- SMITH, S. *Wearable Technology and Gesture Recognition for Live Performance Augmentation*. Tese (Doutorado) — University of Southern Queensland, 2016. Citado na página 31.