

CINTHIA MIRANDA CANTU

# **Protótipo de Aparelho Medidor de Força de Golpe**

**São Paulo**

**2014**

CINTHIA MIRANDA CANTU

## **Protótipo de Aparelho Medidor de Força de Golpe**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
à Escola Politécnica da Universidade de São  
Paulo

Universidade de São Paulo – USP

Escola Politécnica

Engenharia Mecatrônica

Orientador: Prof. Dr. Flávio Buiochi

São Paulo

2014

### **Catálogo-na-publicação**

**Cantu, Cinthia Miranda**

**Protótipo de aparelho medidor de força de golpe /  
C.M.Cantu.**

**-- São Paulo, 2014.  
55 p.**

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade  
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de  
Sistemas Mecânicos.**

**1.Força muscular (Medição; Equipamentos) 2.Sensores ele-  
tromecânicos 3.Interação homem-máquina I.Universidade de  
São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia  
Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II.t.**

CINTHIA MIRANDA CANTU

## **Protótipo de Aparelho Medidor de Força de Golpe**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
à Escola Politécnica da Universidade de São  
Paulo

Trabalho aprovado. São Paulo, 06 de Dezembro de 2014:

---

**Prof. Dr. Flávio Buiochi**  
Orientador

São Paulo  
2014

# Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos que participaram desse projeto, com ideias ou com ajudas manuais, pois não conseguiria realizá-lo sem a ajuda dos meus amigos e familiares.

Quero agradecer meu professor orientador Flávio Buiochi por ter aceitado fazer este trabalho comigo.

Quero agradecer aos meus pais, Luiz e Ivani, que me apoiaram nessa jornada universitária me ajudando sempre que precisei, e à minha irmã, Priscila, que mesmo longe, sempre esteve ao meu lado. Ao meu namorado, Leonardo, que me aguentou todo esse tempo em que passei por momentos bem estressantes, normalmente descontando nele.

Um agradecimento especial aos meus professores de TaeKwonDo, Paula e Diego, que me ajudaram na escolha do tema e me deixaram usar sua academia e eles mesmos para a realização dos testes.

E para finalizar, queria agradecer à todos meus amigos que fizeram parte da minha vida e que, de uma forma ou outra, me ajudaram para que esses anos fossem mais agradáveis.

# Resumo

Cada vez mais as pesquisas e o desenvolvimento tecnológico estão ajudando a aprimorar as técnicas utilizadas nas práticas esportivas, melhorando o desempenho dos atletas e reduzindo os danos causados à sua saúde. Apesar de serem menos abertos às novas técnicas, os esportes de combate e artes marciais também estão aderindo aos novos métodos de treinamento. O grande problema dessas pesquisas é que alguns parâmetros importantes para uma boa análise de desempenho só conseguem ser adquiridos em laboratórios ou necessitam de equipamentos muito caros. O objetivo deste projeto é desenvolver um aparelho capaz de mensurar um golpe e que seja de fácil utilização, baixo custo, preciso e intercambiável, para que possa ser utilizado por treinadores de atletas de artes marciais para avaliar a evolução de seus atletas. As grandezas físicas estudadas foram impulso, para o cálculo da força, e energia. Esse aparelho é constituído por um acelerômetro e giroscópio MPU6050, um micro controlador Arduino e um *software* escrito em Java instalado no computador. O MPU6050 é acoplado no saco de pancadas e, ao receber o golpe, envia os dados da aceleração e velocidade angular para o microcontrolador, que por sua vez, envia para o computador um vetor contendo os dados adquiridos. A grandeza física usada para mensurar o golpe é energia, pois a dinâmica do saco de pancadas envolve movimentos lineares e angulares, de modo que o cálculo de uma grandeza escalar facilita a relação entre eles. O valor da energia é mostrada na interface homem-máquina.

**Palavras-chaves:** artes marciais. acelerômetro. força de golpe. saco de pancadas.

# Abstract

Increasingly, technological research and development are helping to improve the techniques used in sports, improving athletic performance and reducing health concerns. Although less open to new techniques, combat sports and martial arts are also adhering to new training methods. The issue with these researches is that they need very specific data in order to produce a good performance analysis, and the data can only be acquired in specific conditions and with cutting edge equipment. The goal of this project is to develop an easy to use, low cost, accurate and interchangeable device capable of measuring the strength of an athlete's strike, so it can be used by trainers and athletes to assess their own growth. To measuring the strike, it was studied the possibility of use the value of strength or kinetics energy, because of the punching bag rotation's effects. How these effects are significant, the program will measure the energy. This device consists of a MPU6050 accelerometer, an Arduino microcontroller. The accelerometer is attached to the punching bag and sends the acceleration and angular velocity to the microcontroller, which in turn sends a relevant data to a computer, which performs calculations via a Java applet. The program calculates the momentum through the acceleration curve over time. By calculating the duration of the strike and the average angular and linear velocity, the kinetic energy can be obtained, which is then shown in to the user.

**Key-words:** martial arts. accelerometer. strike strength. punching bag.

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>9</b>
<b>1.1</b>	<b>Artes Marciais x Ciência</b>	<b>9</b>
<b>1.2</b>	<b>Revisão Bibliografica</b>	<b>10</b>
<b>1.3</b>	<b>Motivação</b>	<b>11</b>
<b>1.4</b>	<b>Produtos Existentes</b>	<b>12</b>
1.4.1	<i>Patente Americana - Methods and Apparatus for Accurately Measuring Strike Impact on a Martial Arts Training Bag</i>	12
1.4.2	<i>Strike Research</i>	13
1.4.3	<i>Mega Strike Punch Pad</i>	14
<b>1.5</b>	<b>Projeto</b>	<b>14</b>
<b>1.6</b>	<b>Requisitos do Projeto</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>Modelagem</b>	<b>16</b>
2.1.1	Estudo dos movimentos lineares	16
2.1.1.1	Estática	16
2.1.1.2	Dinâmica	17
2.1.2	Estudo dos movimentos angulares	18
2.1.3	Estudo da Energia do Sistema	19
2.1.4	Aplicação no Projeto	20
2.1.4.1	Impulso Linear	20
2.1.4.2	Impulso Angular	21
2.1.4.3	Energia Cinética	21
<b>2.2</b>	<b>Dimensionamento</b>	<b>22</b>
<b>2.3</b>	<b>Aquisição de Dados</b>	<b>23</b>
2.3.1	Componentes Eletrônicos	23
2.3.1.1	Arduino Duemilanove	23
2.3.1.2	Acelerômetro MPU6050	25
2.3.2	Projeto	26
2.3.3	Programação	27
2.3.3.1	Aquisição dos Dados pelo Arduino	27
2.3.3.2	Descrição dos Programas	28
<b>3</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>32</b>
<b>3.1</b>	<b>Testes de Calibração com Pêndulo</b>	<b>32</b>
3.1.1	Equações para calibração	32



3.1.2	Execução dos testes . . . . .	33
<b>3.2</b>	<b>Avaliação do Tempo de Golpe . . . . .</b>	<b>35</b>
3.2.1	Análises Gráficas . . . . .	36
3.2.2	Discussão . . . . .	38
<b>3.3</b>	<b>Avaliação dos movimentos de rotação . . . . .</b>	<b>38</b>
3.3.1	Análise Gráfica . . . . .	39
3.3.2	Discussão . . . . .	39
<b>3.4</b>	<b>Teste com pêndulo e massa concentrada . . . . .</b>	<b>40</b>
3.4.1	Dados do Teste . . . . .	41
3.4.2	Discussão . . . . .	41
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>43</b>
	<b>Referências . . . . .</b>	<b>45</b>

## **APÊNDICES . . . . . 47**

	<b>APÊNDICE A – ANÁLISE DAS DIFERENTES SOLUÇÕES . . . . .</b>	<b>48</b>
<b>A.1</b>	<b>Modelo Barra Engastada e <i>Strain gage</i> . . . . .</b>	<b>49</b>
A.1.1	Viabilidade Técnica . . . . .	50
A.1.2	Viabilidade Operacional . . . . .	50
A.1.3	Viabilidade Econômica . . . . .	50
A.1.4	Viabilidade Cronograma . . . . .	50
<b>A.2</b>	<b>Modelo Massa-Mola e <i>Encoder-Acelerômetro</i> . . . . .</b>	<b>51</b>
A.2.1	Viabilidade Técnica . . . . .	51
A.2.2	Viabilidade Operacional . . . . .	52
A.2.3	Viabilidade Econômica . . . . .	52
A.2.4	Viabilidade Cronograma . . . . .	52
<b>A.3</b>	<b>Modelo Saco de Pancadas e Acelerômetro . . . . .</b>	<b>52</b>
A.3.1	Viabilidade Técnica . . . . .	53
A.3.2	Viabilidade Operacional . . . . .	53
A.3.3	Viabilidade Econômica . . . . .	54
A.3.4	Viabilidade Cronograma . . . . .	54
<b>A.4</b>	<b>Escolha Entre os Modelos Apresentados . . . . .</b>	<b>54</b>

# 1 Introdução

## 1.1 Artes Marciais x Ciência

Uma das coisas mais forte nas artes marciais é a tradição. Devido ao fato de serem artes milenares, passadas de geração em geração, manter a tradição foi de extrema importância para garantir que toda sua filosofia e ensinamentos fossem transferidos aos mais novos da maneira mais correta possível e sem perder sua identidade. Com o avanço da tecnologia e dos estudos científicos, essas artes estão sendo cada vez mais alvos de pesquisas com o objetivo de melhorar o aprendizado e o desempenho de seus praticantes visando um menor impacto para sua saúde.

O aumento dessas pesquisas ocorre principalmente em modalidades de lutas olímpicas ou no MMA (Artes marciais mistas, da sigla em inglês), pois o investimento nesses estudos é maior devido ao rendimento que podem gerar. O maior objetivo desses estudos é aumentar ao máximo o rendimento do atleta sem prejudicar sua saúde e condição física obtendo um rápido crescimento no esporte e alto desempenho em campeonatos e competições importantes. Devido à essa mudança de objetivos entre a arte ensinada para a guerra e a praticada nos esportes, muitas das conclusões que essas pesquisas chegam vão de encontro com aquilo que sempre foi ensinado, criando um divisor de águas entre os praticantes mais tradicionais e os atletas. Essa divisão pode ser muito bem observada em esportes como o *Karatê* e o *Taekwondo* que possuem estilos de luta diferentes dentro de uma mesma arte marcial.

Alguns treinamentos, que para o uso no campo de batalha eram úteis, se mostram ineficientes e até prejudiciais à saúde quando analisados pelo ponto de vista de um esporte e esses acabam sendo substituídos por outros mais efetivos, porém completamente diferente daquilo que era tradicional. Em alguns esportes olímpicos de contato, por exemplo, treinos de calejamento necessários para que o corpo pudesse bloquear golpes fortes se tornaram obsoletos devido à exigência de aparelhos de proteção durante competições.

Alguns atletas mais antigos, que aprenderam suas técnicas através dessa arte mais pura, são um pouco mais resistentes a essa nova tendência de treinamento, pois sentem como se a tradição estivesse sendo perdida. Mesmo assim cada vez mais técnicos vão aderindo à essas novas estratégias de treino, principalmente por serem mais atrativas ao público em geral e tornar esportes de combate mais saudáveis e menos seletivo, atraindo aqueles que querem apenas melhorar a qualidade de vida e não se tornarem lutadores profissionais.

Mesmo com essa clara mudança que a ciência está proporcionando aos esportes

de combate, as tradições ligadas a filosofia das artes marciais, como o respeito aos seus companheiros e superiores e o autocontrole, devem ser sempre mantidas independentemente do tipo de treino que se use, pois é a base de qualquer bom praticante de arte marcial.

## 1.2 Revisão Bibliografica

Existem muitas pesquisas feitas ultimamente tratando de diversos aspectos físicos e biológicos envolvendo artes marciais e outras modalidades de combate. Algumas delas tratam da biomecânica do corpo atleta em diversos momentos da prática, seja executando um golpe, se movimentando durante a luta e até recebendo um golpe. Tudo isso, ao ser analisados por especialistas, geram melhorias não só ao desempenho dos atletas, mas também a forma como os treinos são aplicados, tornando-os mais eficientes e mais saudáveis, valorizando a qualidade de cada um e trabalhando nos defeitos de forma mais pontual.

Das pesquisas que existem sobre o assunto, será tratado aqui algumas que estudam efeitos de velocidade e força dos golpes que é o assunto principal do projeto em questão.

Jake N. Pearson ([PEARSON, 1997](#)) comenta, em sua dissertação escrita nos anos 90, que existia uma dificuldade em encontrar uma consistência nas pesquisas em relação ao valor de força do impacto de um chute, já que os autores não deixavam bem claro o método usado para obter os resultados e que o termo “força” não era muito encontrado em artigos da época. Hoje em dia, graças ao aumento da tecnologia, é mais fácil encontrar pesquisas nesse ramo.

Um estudo sobre impactos de golpes na cabeça no Boxe Olímpico ([WALILKO; VIANO; BIR, 2005](#)) mostra o valor da força de alguns golpes. Os socos estudados atingiram uma média de 3427 N e com uma velocidade de 9,14 m/s. O resultado da pesquisa mostra que esses impactos são severos para os atletas, gerando uma aceleração do golpe de, em média, de 58 G (sendo G, a aceleração da gravidade). Quanto maior o peso do atleta, maior é a massa efetiva do soco, ou seja, ele projeta uma quantidade de massa maior durante a aplicação do golpe, o que causa mais danos em atletas de peso pesado do que de peso leve. A massa efetiva média dos testes foi de 2,9 kg.

Nessa mesma linha de raciocínio, os chutes costumam ser mais fortes que socos, pois a massa efetiva aplicada é bem maior, além disso, a distância entre o tronco e o ponto de impacto (mão para soco e pé para chute) influencia muito na força aplicada, devido ao momento. O programa *Sport Science* da ESPN mediu um chute e um soco de um lutador profissional de MMA. Utilizando acelerômetros foi possível medir um valor de 5.200 N para o soco e 12.228 N para um chute ([SCIENCE, 2011](#)). No boxe tailandês, o chute *roundhouse* conseguiu atingir uma força de 14.000 N ([SIDTHILAW, 1997](#)).

O *Taekwondo* é um esporte que se utiliza mais de chutes do que socos em competições

olímpicas. O livro “Ensino de lutas: Reflexões e Propostas de Programa”, no capítulo 8 (FRANCHINI; VECCHIO, ) escrito por P. Avakian e D. S. Morine, traz um comparativo das forças e velocidades obtidas em diversos estudos sobre os golpes existentes nesse esporte. No chute mais utilizado, o *bandal tchagui* (chute meia lua) as velocidades medidas foram de 13,4 a 15,9 m/s. No artigo (VECCHIO et al., 2011) o mesmo chute obteve uma medida de 1994,03 N com uma duração de impacto de 0,254 s. Outro chute chamado *Tchitchagui* (chute com giro atacando com a planta do pé) atingiu uma força de 8569 N com a perna direita e 7751 N com a perna esquerda. O mesmo chute obteve, em outro estudo, uma velocidade linear de aproximadamente 10 m/s.

Analizando essas pesquisas pode-se perceber que existe uma grande variação entre as forças de um golpe, mesmo avaliando o mesmo tipo. Essas diferenças estão muitas vezes relacionadas à técnica utilizada, ao peso do atleta ou ao seu nível de treinamento. Um lutador faixa preta não necessariamente pode atingir uma medida maior de força e velocidade do que um de nível mais baixo, tudo depende do objetivo de treino de cada um. Mesmo assim, essas pesquisas servem para tentar traçar um parâmetro existente entre tipos diferentes de atletas.

### 1.3 Motivação

Os valores medidos de força e velocidade analisados anteriormente foram obtidos em laboratórios de pesquisas. Para um atleta que tem o objetivo de chegar a um alto nível no esporte, é importante que se possa fazer um acompanhamento de sua evolução. Como se pode observar no artigo (VECCHIO et al., 2011) existe uma diferença entre a força e velocidade dos golpes de um atleta iniciante para um atleta de nível de competição, mostrando uma evolução mensurável. Assim, uma análise dessa evolução feita diariamente é bom não só para o atleta como também para o seu técnico, que poderá avaliar se o método de treinamento aplicado está surtindo efeito.

Há vários parâmetros que podem ser analisados para avaliar o desempenho e evolução de um atleta. Pode se medir a força ou potência do golpe, tempo de reação, resistência aeróbica, velocidade do golpe, entre outros. Uma boa técnica não é composta apenas por um desses parâmetros e sendo um conjunto deles, o que significa que estão todos ligados de alguma forma. Um golpe que obtenha uma boa medida de força precisa ser aplicado utilizando a técnica correta para que a massa efetiva seja a maior possível e com uma alta velocidade. Como a medida de força é algo mais comum no dia a dia, pois pode facilmente se relacionar com peso e massa, este projeto visa construir um aparelho que seja capaz de medir a força de um golpe aplicado em um saco de pancadas.

Esse aparelho deve ser de fácil acesso aos atletas para que realmente possa ser utilizado no seu dia a dia. Da mesma forma, deve ser um aparelho com uma interface com

o usuário bem amigável, pois será utilizado por pessoas que podem não possuir um nível técnico alto. Quanto mais fácil for sua utilização e interpretação dos resultados obtidos, melhor. O custo de produção é um fator importante, pois o ideal é que seja um aparelho que possa ser adquirido por qualquer academia.

A escolha por um saco de pancadas como alvo do golpe foi feita por se tratar de um objeto que faz parte do cotidiano de um atleta de arte marcial. Isso facilita em sua utilização pois o ideal é se aplicar toda força possível no alvo. Se ele for algo que o usuário não estiver habituado a usar, o fator psicológico irá influenciar na força aplicada.

## 1.4 Produtos Existentes

Existem outros produtos no mercado que possuem o mesmo objetivo de mensurar um golpe. As unidades medidas nem sempre são grandezas físicas sendo que a análise é muitas vezes feita de modo qualitativo e não quantitativo. Abaixo será descrito brevemente três aparelhos, sendo dois produtos de mercado e uma patente.

### 1.4.1 *Patente Americana - Methods and Apparatus for Accurately Measuring Strike Impact on a Martial Arts Training Bag*

O modelo patenteado ([DILWORTH; HURLAHE, 2012](#)) utiliza um aparelho intercambiável entre saco de pancadas que mede a aceleração do golpe dado. A interface do aparelho permite que o usuário visualize a aceleração gerada pelo golpe dado. Ela pode ser mostrada por eixo ou absoluta, sempre se baseando no maior valor obtido pelo acelerômetro. A aquisição dos dados utiliza o valor do eixo Z para indicar o início e o fim do golpe, desconsiderando os valores causados pela inércia do movimento do saco após receber o golpe.

Abaixo segue um desenho do modelo proposto.

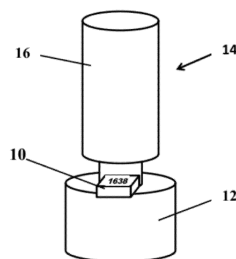


Figura 1 – Modelo retirado da patente

Fonte: ([DILWORTH; HURLAHE, 2012](#))

### 1.4.2 Strike Research



Figura 2 – Aparelho da *Strike Research*

Fonte: (RESEARCH, 2010a)

O modelo da *Strike Research* (RESEARCH, 2010a) é o mais complexo. Os pesquisadores utilizam uma unidade criada por eles chamada “Compound Units”, pois, segundo eles, um golpe não pode ser determinado por apenas uma grandeza física, já que é na verdade, a composição de várias (força, velocidade, aceleração) (RESEARCH, 2010d) (RESEARCH, 2010c). Quanto mais forte o golpe aplicado, maior o valor mostrado na interface homem máquina. Essa interface também mostra outros valores obtidos através do equipamento.

Esse aparelho fica em uma base fixa o que o torna mais preciso do que outros, pois é desconsidera interferências causadas pelo ambiente como a inércia ou parceiro de treino, como é o caso do próximo modelo. A ideia da criação de uma nova unidade de medida é bem interessante, pois como vimos anteriormente, a medida da força de um golpe varia muito de caso para caso de forma que, para uma comparação pessoal, essa medição se torna altamente válida. O problema apenas é a difícil comparação com algo mais habitual já que só será possível saber se o golpe foi bom comparando com outra pessoa que já sabe que é melhor. O próprio site da *Strike Research* trás um estudo de caso com vários atletas faixa preta e suas pontuações (RESEARCH, 2010b).



Figura 3 – Interface Homem-Máquina

Fonte: (RESEARCH, 2010a)

### 1.4.3 *Mega Strike Punch Pad*

O aparelho *Mega Strike Punch Pad* (BLOCK, 2014) consiste em um aparador de chute que mostra impacto do golpe recebido através de uma sequência de dez LED's, que se acendem de acordo com intensidade medida. Esse aparelho serve para ser utilizado em treinos em dupla, onde uma pessoa segura o aparador para a outra golpeá-lo.



Figura 4 – Aparador *Mega Strike*

Fonte: (BLOCK, 2014)

Um dos problemas nesse tipo de aparelho é o fato de que o impacto medido não depende apenas da pessoa que está realizando o golpe, mas também de quem está segurando o aparelho. É comum durante os treinos que, ao segurar o aparador para que outra pessoa ataque, quem está segurando amorteca o golpe, para que não sinta o impacto no próprio braço. Esse fator pode influenciar na intensidade medida.

A vantagem é que esse aparelho é um objeto prático e que está presente no dia a dia dos treinos, tornando-se um objeto próximo da realidade e que atende as expectativas, mesmo que de forma imprecisa.

## 1.5 Projeto

O projeto irá desenvolver um aparelho que possa ser acoplado em um saco de pancadas de modo que, ao ser aplicado um golpe, uma interface no computador mostre a força medida em kgf (quilograma-força) facilitando a comparação e análise dos atletas e treinadores. Será avaliada também a possibilidade da grandeza física analisada ser a energia, devido à dinâmica do movimento do saco de pancadas dificultar o cálculo da força.

A associação com o dia-a-dia da grandeza “energia” não é tão comum quanto a “força”, facilmente associada ao peso, mas ainda assim garante a análise da evolução do atleta, já que um golpe que quanto melhor e mais forte o golpe for aplicado, maior será a velocidade do saco no início de seu movimento.

Além do modelo utilizando um saco de pancadas e um acelerômetro, outras possibilidades foram estudadas. Essas análises se encontram no apêndice.

O aparelho deve ser intercambiável, sendo possível comprá-lo separadamente do saco de pancadas. Para isso a interface com o usuário, que estará instalada em um computador, deve possuir um campo no qual seja possível inserir os dados do saco que está sendo usado como alvo, sendo eles: massa, altura e diâmetro. O aparelho, contendo as partes eletrônicas, deve ser posicionado no centro de massa vertical do saco de pancadas.

A aquisição dos dados da aceleração não será contínua, devido a isso será necessário que o usuário aperte um botão “Iniciar” para que ela comece. Assim que o golpe for dado no alvo, o valor da força será calculado e mostrado na IHM. Apenas um golpe pode ser dado por vez, de modo que fará apenas a aquisição de dados referente no intervalo de referente à um golpe e depois passará para a execução dos cálculos necessários. Para iniciar uma nova aquisição, o usuário deve pressionar novamente o botão “Iniciar”. O intervalo de tempo necessário para obtenção dos dados será determinado através de testes.

## 1.6 Requisitos do Projeto

Os requisitos que precisam ser atendidos para esse projeto são:

- a) O projeto prevê apenas a aplicação de um golpe por vez;
- b) Os componentes envolvidos devem ter baixo custo, de modo que seu valor comercial possa ser menor que R\$1000,00 (valor que o tornaria acessível para a maioria das academias);
- c) Para analisar todos os movimentos envolvidos, além do acelerômetro, é importante um giroscópio para obter os dados dos movimentos angulares;
- d) Para uma boa precisão do valor obtido, tanto o acelerômetro quanto o giroscópio deve possuir uma taxa de aquisição de dados bem alta, maior que  $100\text{Hz}$ , já que o tempo de um golpe completo é da ordem de centésimos de segundo;
- e) As acelerações envolvidas em um golpe são bem altas, na ordem de 50 G para o corpo do atleta. O peso do saco de pancadas influencia na aceleração medida, mas ainda assim a escala máxima do acelerômetro deve se aproximar desse valor;
- f) A interface com o usuário deve ser simples e mostrar apenas os valores de importância, evitando que o atleta ou o treinador precisem realizar cálculos posteriores para analisar o golpe aplicado.



## 2 Metodologia

### 2.1 Modelagem

Para estudar o comportamento dinâmico do saco de pancadas atingido por um golpe, foi feita uma análise de modelos em 3D das forças envolvidas no sistema a partir do movimento linear, movimento angular e da energia.

Algumas hipóteses são feitas para facilitar o estudo da dinâmica do movimento.

- a) O saco é considerado um cilindro sólido e rígido, sem deformações;
- b) O impacto é considerado perfeitamente elástico;
- c) As forças aplicadas no saco são paralelas ao plano XY, que é paralelo ao chão;
- d) O ponto em que o saco de pancadas é preso na corrente é aproximado por uma junta esférica e localizado em sua extremidade superior.

#### 2.1.1 Estudo dos movimentos lineares

O estudo dos movimentos lineares é feito considerando o valor absoluto das forças envolvidas nos três eixos. São realizados os estudos das forças no equilíbrio e na análise estática e dinâmica.

##### 2.1.1.1 Estática

Na análise estática, existem apenas duas forças atuando no saco de pancadas: a força peso ( $P$ ) e a de tração ( $T$ ) da corrente que mantém o saco pendurado.

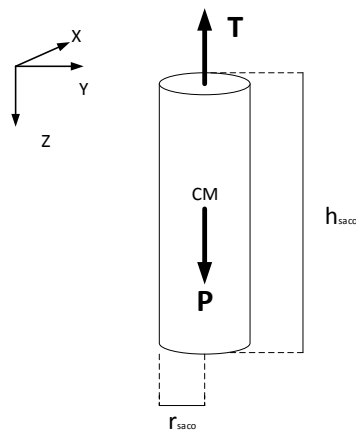


Figura 5 – Análise estática

A altura do saco é dada por  $h_{saco}$  e o raio por  $r_{saco}$ .

A força peso  $P$  está sempre na direção positiva do eixo Z e a força do golpe  $F_G$ , no plano XY. Com o deslocamento do saco, a força de tração  $T$  vai mudando o valor de suas componentes de acordo com o movimento, medido pelo ângulo  $\theta$ .

Dado o golpe aplicado em uma posição qualquer do saco de pancadas, tem-se a seguinte resultante, calculada em relação à posição da junta esférica.

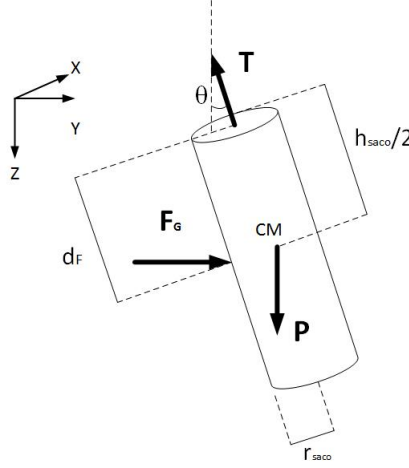


Figura 6 – Análise estática após a aplicação do golpe

A resultante é:

$$R = F_G \cdot d_F - T + P \cdot \frac{h}{2}$$

Onde a variável  $d_F$  se refere à distância entre a posição de aplicação do golpe e a junta. Essa distância é responsável pelo movimento angular do saco de pancadas. Como a variação maior dessa distância ocorre no eixo Z, a velocidade angular medidas em X ou Y (dependendo da posição do acelerômetro em relação ao golpe), será maior do que a do eixo Z.

#### 2.1.1.2 Dinâmica

Na análise dinâmica do momento em que o golpe é dado, dada a resultante  $R$  das forças aplicadas no saco, tem-se a seguinte equação do sistema:

$$R = m_{saco} \cdot a_{saco} + c \cdot v_{saco} + k \cdot x_{saco}$$

Onde  $m_{saco}$  é a massa do saco de pancadas,  $a_{saco}$  é a aceleração,  $c$  é o coeficiente de viscosidade,  $v_{saco}$  é a velocidade,  $k$ , o coeficiente de elasticidade e  $x_{saco}$  o deslocamento.

O sistema não tem nenhum mecanismo de amortecimento, além do próprio atrito da corrente no gancho e do ar. Esses fatores são baixos e não interferem no movimento no momento do golpe. O deslocamento linear do saco assim como o atrito são pequenos se comparados com a aceleração no momento do golpe. Devido isso, as componentes  $c.v$  e  $k.x_{saco}$  serão desconsiderados.

A equação fica:

$$R = m_{saco} \cdot a_{saco} \quad (2.1)$$

Para calcular o valor da força do golpe, será utilizada a curva de aceleração obtida pelo acelerômetro. Será aplicado o Teorema do Impulso no sistema que rege o saco de pancadas para se obter o valor da força média. Esse teorema foi escolhido devido ao fato de que um golpe pode ser caracterizado como um impulso, já que é uma força aplicada em um curto período de tempo.

O Impulso pode ser calculado da seguinte forma:

$$I = \int_{t_i}^{t_f} F(t) dt \quad (2.2)$$

Onde  $t_i$  é o tempo inicial do golpe, dado pelo contato do corpo do atleta no saco de pancadas;  $t_f$  é o tempo que indica o final do golpe e  $F(t)$  é a função que representa a força do golpe durante esse período.

Substituindo a função  $F(t)$  pela equação 2.1 chega-se na seguinte equação:

$$\begin{aligned} I &= \int_{t_i}^{t_f} m_{saco} \cdot a(t)_{saco} dt \\ I &= m_{saco} \cdot \int_{t_i}^{t_f} a(t)_{saco} dt \end{aligned} \quad (2.3)$$

### 2.1.2 Estudo dos movimentos angulares

Os eixos de rotação do cilindro, passando pelo centro de massa são apresentados na figura 7.

O valor dos momentos de inércia  $J$  são:

$$J_z = \frac{m_{saco} \cdot r_{saco}^2}{2} \quad (2.4)$$

$$J_x = J_y = \frac{m_{saco} \cdot (3 \cdot r_{saco}^2 + h_{saco}^2)}{12} \quad (2.5)$$

Onde  $m_{saco}$  é a massa do saco,  $r_{saco}$  é o raio e  $h_{saco}$  é a altura.

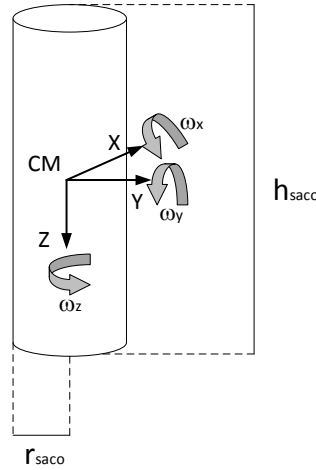


Figura 7 – Eixos de rotação no centro de massa

O equivalente do impulso linear para movimento angular é o impulso angular que é dado por:

$$I_a = \int_{t_i}^{t_f} M(t) dt = J\omega_f - J\omega_i \quad (2.6)$$

Onde  $M(t)$  é o momento das forças externas,  $\omega$  é a velocidade angular. As iniciais  $i$  e  $f$  se referem ao início e fim do golpe respectivamente. O momento de inércia  $J$  se refere ao eixo no qual a velocidade angular está sendo medida.

O momento das forças externas é calculado pela equação 2.9.

$$\frac{d J\omega}{dt} = M$$

$$M = J \cdot \frac{d\omega}{dt} = J\alpha \quad (2.7)$$

Onde  $\alpha$  é a aceleração angular.

A força média pode ser obtida dividindo o momento médio pela distância entre o centro de massa e a posição em que o golpe é aplicado. Considerando um golpe aplicado no centro de massa, tem-se:

$$F_{media} = \frac{M_{medio}}{\frac{h}{2}} \quad (2.8)$$

### 2.1.3 Estudo da Energia do Sistema

Para o cálculo da energia será considerado um sistema envolvendo o saco de pancadas que sai de uma posição de repouso e desloca seu centro de gravidade até atingir

uma altura máxima. A quantidade de movimento do golpe é transferida totalmente para o saco de pancadas de modo que a velocidade inicial do saco é dada por:

$$\begin{aligned}
 Q_{golpe} &= Q_{saco} \\
 m_{golpe} \cdot v_{golpe} &= m_{saco} \cdot v_{saco} \\
 v_{saco} &= \frac{m_{golpe} \cdot v_{golpe}}{m_{saco}}
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

Sendo  $m_{golpe}$  a massa efetiva do corpo que o atleta projeta durante o golpe,  $v_{golpe}$  a velocidade do golpe no instante em que ele atinge o saco e  $v_{saco}$  a velocidade do saco de pancadas logo após o golpe. Com isso temos que a componente linear da energia cinética é dada por:

$$E_{Clinear} = \frac{m_{saco} \cdot v_{saco}^2}{2} \tag{2.10}$$

Além da componente linear, dada pela velocidade linear  $v_{saco}$ , existe uma componente angular da energia cinética, gerada pelo momento da força aplicada. Essa componente, por eixo, é:

$$E_{Cangular} = \frac{J_{eixo} \cdot \omega_{eixo}^2}{2} \tag{2.11}$$

Somando as equações 2.10 e 2.11 nos três eixos, tem-se o valor total da energia cinética do sistema:

$$E_C = \frac{m_{saco} \cdot v_{saco}^2}{2} + \frac{J_x \cdot \omega_x^2}{2} + \frac{J_y \cdot \omega_y^2}{2} + \frac{J_z \cdot \omega_z^2}{2} \tag{2.12}$$

#### 2.1.4 Aplicação no Projeto

No projeto podem ser aplicadas as equações de impulso linear e angular ou da energia cinética.

##### 2.1.4.1 Impulso Linear

Os dados que serão adquiridos pelo acelerômetro irão representar exatamente a curva de aceleração pelo tempo ( $a(t)_{saco}$ ), e o usuário irá inserir o valor da massa do saco de pancadas que está sendo utilizado. Com esses dados é possível calcular o impulso aproximando a integral da equação 2.3 por uma somatória.

$$I = m_{saco} \cdot \sum_{t_i}^{t_f} a(t)_{saco} \cdot \Delta t \tag{2.13}$$

O valor de  $\Delta t$  será calculado de acordo com a frequência de aquisição de dados do acelerômetro pelo microcontrolador, que deve obedecer os requisitos do projeto.

Tendo calculado o valor do impulso, pode-se obter o valor da força resultante média utilizando a equação abaixo:

$$R_{media} = \frac{I}{t_f - t_i} \quad (2.14)$$

O valor dessa resultante é uma soma vetorial da força do golpe aplicado, tração da corrente e peso do saco. A variável do peso já será desconsiderada retirando o valor referente à aceleração da gravidade do vetor medido. A tração continuará no cálculo. É possível desconsiderar esse valor com uma calibração, pois sendo uma força de reação, é proporcional à força aplicada.

#### 2.1.4.2 Impulso Angular

Para o cálculo do impulso angular serão adquiridos os dados de velocidade angular pelo giroscópio nos três eixos. Assim como no impulso linear, o valor da massa e das dimensões do saco serão incluídos pelo usuário para o cálculo do momento de inércia. Como o giroscópio mostra o valor da velocidade angular  $\omega$ , a equação mais fácil para ser utilizada para o cálculo do impulso angular é a diferença entre os momentos angulares.

$$I_a = J.\omega_f - J.\omega_i \quad (2.15)$$

Ao dividir o impulso angular pelo tempo de execução do golpe, tem-se o momento das forças externas médio.

$$M_{medio} = \frac{I_a}{t_f - t_i} \quad (2.16)$$

O momento será calculado por eixo devido a diferença entre os momentos de inércia. Depois será feita a soma quadrática para se obter o valor absoluto.

#### 2.1.4.3 Energia Cinética

Para o cálculo da energia cinética no projeto serão utilizados tanto os valores adquiridos pelo giroscópio quanto pelo acelerômetro. A curva de aceleração ( $m/s^2$ ) pelo tempo será integrada para obter o valor da velocidade linear do saco depois da aplicação do golpe.

$$v_{saco} = \sum_{t_i}^{t_f} a(t)_{saco} \cdot \Delta t \quad (2.17)$$

Os valores da velocidade angular em radianos por segundo ( $rad/s$ ) obtidos pelo giroscópio nos três eixos serão integrados durante o mesmo período entre  $t_i$  e  $t_f$  e depois divididos por esse tempo, para se obter o valor da velocidade angular média, como mostra a equação ???. Essa conta será feita para cada um dos eixos.

$$\omega_{medio} = \frac{\sum_{t_i}^{t_f} \omega(t) \cdot \Delta t}{t_f - t_i} \quad (2.18)$$

Assim como nos casos acima, os dados para o cálculo do momento de inércia serão inseridos pelo usuário.

O valor da energia cinética total do sistema é dado pela equação substituição dos valores obtidos pelas equações 2.17 e 2.18 na equação 2.12.

## 2.2 Dimensionamento

No capítulo de introdução, foram citadas várias pesquisas que mediram a força de diversos golpes e, como já fora dito, existe uma variação bem grande de grandeza, indo de centenas até milhares de Newtons. Para dimensionar os componentes eletrônicos que serão utilizados é preciso saber qual a faixa de aceleração que será medida e se o tempo de aquisição de dados será o suficiente para captar a variação de aceleração causada pelo golpe.

Como o objetivo deste projeto é mensurar o golpe tanto de um atleta mediano quanto de um atleta de nível profissional, já que será necessário acompanhar a evolução deles, é importante que a escala do acelerômetro seja capaz de medir desde acelerações mais baixas até as mais altas.

A aceleração medida pelo acelerômetro não dependerá apenas do golpe dado. A massa do saco de pancadas também é um fator importante para isso e, como um dos objetivos do aparelho é que ele seja intercambiável, é preciso determinar uma massa mínima para o saco que será utilizado.

Para realizar o cálculo do dimensionamento da escala de medição do acelerômetro iremos considerar um saco de 80 kg, que é uma massa comum de ser encontrada no mercado, e uma força de golpe de 10.000 N. Esse valor foi estimado com base nos valores observados nas pesquisas estudadas, de forma que apenas dois dados ultrapassem essa medida e, para esses casos, o ideal seria um saco de maior massa. Utilizando a segunda lei de Newton ??, tem-se:

$$F = m_{saco} \cdot a_{saco}$$

$$10.000 = 80 \cdot a_{saco}$$

$$a_{saco} = 125m/s^2$$

Esse valor de aceleração equivale a aproximadamente  $12,75G$  (sendo  $G = 9,8m/s^2$ ). O acelerômetro a ser adquirido deve alcançar essa escala de medição ou um pouco mais, pois uma escala muito maior pode acabar prejudicando as medidas que obtenham menor valor de aceleração.

A frequência de aquisição de dados do acelerômetro tem que ser alta o suficiente para garantir uma curva de aceleração mais próxima do real. Pela bibliografia, o tempo de execução de um golpe é da ordem de centésimos de segundos. Esse valor considera todo o tempo de movimentação, o que significa que o tempo de contato entre o atleta e o saco, que é o considerado nos cálculos do projeto, é menor. Dessa forma o acelerômetro deve possuir uma frequência da ordem de  $1kHz$  para garantir uma curva precisa.

## 2.3 Aquisição de Dados

A parte eletrônica utilizada na aquisição de dados consiste em um acelerômetro MPU6050, com escala máxima de  $16G$ , um microcontrolador Arduino Duemilanove, baseado no circuito ATmega328. O microcontrolador irá se comunicar com o computador e passa as informações recebidas pelo acelerômetro. O computador possui um programa escrito em linguagem Java que será responsável por todo o tratamento dos dados e pela IHM.

O esquemático da figura, mostra como irá funcionar a transferência de informações entre os componentes que serão descritos abaixo.

### 2.3.1 Componentes Eletrônicos

Abaixo tem-se uma breve descrição sobre os componentes eletrônicos que utilizados no projeto.

#### 2.3.1.1 Arduino Duemilanove

O Arduino foi desenvolvido por estudantes universitários italianos que tinham o objetivo de criar um software livre e de fácil utilização para estudantes, profissionais e outras pessoas que gostavam de desenvolver coisas apenas por *hobby*.

Seu baixo custo e plataforma aberta proporcionaram o desenvolvimento contínuo do hardware e sua popularização. É possível encontrar diversos projetos dos simples aos mais complexos que utilizam um dos microcontroladores Arduino, e também inúmeros fóruns discutindo problemas, ideias e dicas, tornando-o acessível para qualquer pessoa que tenha interesse no assunto, mesmo sem um conhecimento técnico avançado.



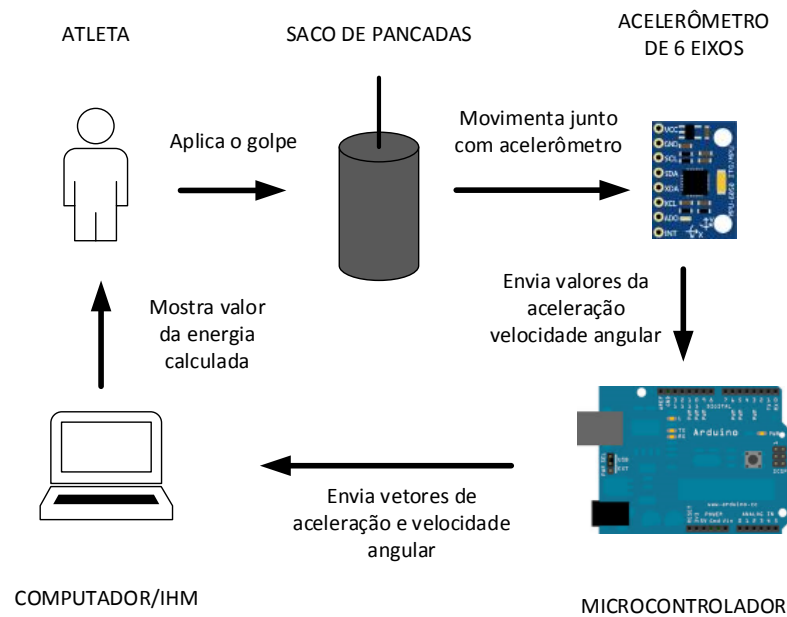


Figura 8 – Esquemático do funcionamento do sistema

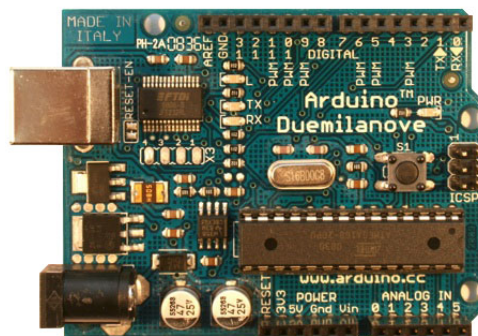


Figura 9 – Arduino Duemilanove

Fonte: ([ARDUINO, 2014](#))

A programação é feita em linguagem C ou C++ e o próprio site oficial do Arduino fornece grátis o software utilizado para programar e compilar o programa, assim como exemplos e bibliotecas prontas para diversos casos de uso. Essas bibliotecas podem ser desenvolvidas por outra pessoa e facilmente anexadas ao projeto.

No projeto será utilizado o Arduino Duemilanove. Suas características técnicas estão listadas na tabela 1:

A alimentação do Arduino Duemilanove pode ser feita de três formas: pelo próprio cabo USB, com a alimentação vinda do computador; pelas entradas GND e Vin, com uma tensão de 5 V; por um *plug* de 2,1 mm de centro positivo. No projeto a alimentação será

Microcontrolador	ATmega328
Tensão de Operação	5 V
Tensão <i>Input</i> (recomendada)	7 - 12 V
Tensão <i>Input</i> (limite)	6 - 20 V
Pinos Digitais <i>I/O</i>	14 (sendo 6 com saída PWM)
Pinos Entrada Analógicos	6
Corrente CC por pino <i>I/O</i>	40 mA
Corrente CC por pino 3,3 V	50 mA
Memória <i>Flash</i>	32 KB sendo 2 KB usado pelo <i>bootloader</i>
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Velocidade do <i>Clock</i>	16 MHz

Tabela 1 – Especificações do Arduino Duemilanove

Fonte: ([ARDUINO, 2014](#))

feita pelo cabo USB.

### 2.3.1.2 Acelerômetro MPU6050

O MPU-6050 é um dispositivo que possui seis graus de liberdade e é capaz de medir tanto a aceleração linear quanto a velocidade angular, combinando três eixos de aceleração com três eixos de giroscópio em uma única placa. Ele foi desenvolvido pela *InvenSense* com o objetivo de ser um dispositivo de baixo custo e de baixo consumo de energia, ideal para equipamentos móveis como *smartphones*, *tablets* por exemplo. Ele possui quatro escalas de medida de velocidade angular e de aceleração linear. A família MPU-6000 também possui um sensor de temperatura, indicando como saída o valor em graus Celsius (°C) ([INVENSENSE, 2014](#)).

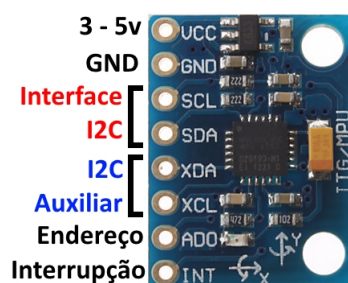


Figura 10 – Circuito MPU6050 e sua pinagem

Fonte: ([FILIPEFLOP, 2014](#))

As características técnicas do MPU6050 estão listadas na tabela 2:

Alimentação	3 V - 5 V
Faixa Giroscópio	+ 250, 500, 1000, 2000 °/s
Faixa Acelerômetro	$\pm 2$ , $\pm 4$ , $\pm 8$ , $\pm 16$ G
Comunicação	Protocolo I <sup>2</sup> C
Conversor AD	16 bits

Tabela 2 – Especificações do MPU6050 e GY-512

Fonte: ([TATO, 2014](#))

### 2.3.2 Projeto

Para utilizar o cálculo do impulso para obter o valor da força, considerando tanto o impulso linear quanto o angular é preciso conhecer a posição em que o golpe é aplicado no saco de pancadas para poder transformar o valor do momento das forças externas para força. Outro problema é que o valor calculado se refere à resultante das forças e não apenas à força do golpe. Devido a esses fatores a melhor escolha de grandeza física é a energia. Por ser uma grandeza escalar é possível somar o valor das componentes linear e angular diretamente, sem a necessidade de uma mudança de base.

Ambos os componentes eletrônicos foram escolhidos baseados nos requisitos do projeto descritos no primeiro capítulo. O acelerômetro possui uma escala máxima maior do que a que foi estimada, o que garante que ele possa ser utilizado em sacos de pancadas com uma massa menor do que a prevista. Para uma força máxima aplicada de 10.000 N, a massa do saco utilizado pode ser de, no mínimo, 63,5 kg (arredondando para baixo).

A taxa de aquisição de dados do MPU6050 para o acelerômetro e giroscópio é de 1 kHz, o que implica em uma variação de tempo de 1 *ms* entre os dados recebidos.

A ligação elétrica entre o Arduino Duemilanove e o acelerômetro é direta, sem a necessidade de nenhum componente elétrico entre eles. Mesmo a tensão de operação do MPU6050 sendo de 3,3 V, a placa já possui um circuito inversor de tensão que permite que seus pinos sejam conectados aos pinos do Arduino (saída 5V) sem que seja necessário um circuito externo.

A comunicação entre o Arduino e o computador é pelo circuito integrado FTDI FT232RL que permite que a comunicação serial seja enviada pelo cabo USB de comunicação paralela (utilizado normalmente em impressoras) conectado à placa ([ARDUINO, 2014](#)).

A comunicação entre o acelerômetro e o Arduino é feita através do protocolo I<sup>2</sup>C. Todos os pinos do Arduino Duemilanove podem utilizar essa comunicação, diferente da serial

em que existem pinos específicos para isso (pinos D0 e D1). Existe uma biblioteca inclusa no software disponibilizado pela Arduino que simplifica essa comunicação (ARDUINO, 2014).

A ligação entre a Arduino e o MPU6050 está demonstrada na tabela 3 e no esquemático elétrico da figura 11.

MPU6050 / GY-521	Pino do Arduino
Vcc	5 V
GND	GND
SDA	Analógico 4 (A4)
SCL	Analógico 5 (A5)
INT	Digital 2 (D2)

Tabela 3 – Conexões entre os pinos do Arduino e o MPU6050

Fonte: (BOTS, 2012)

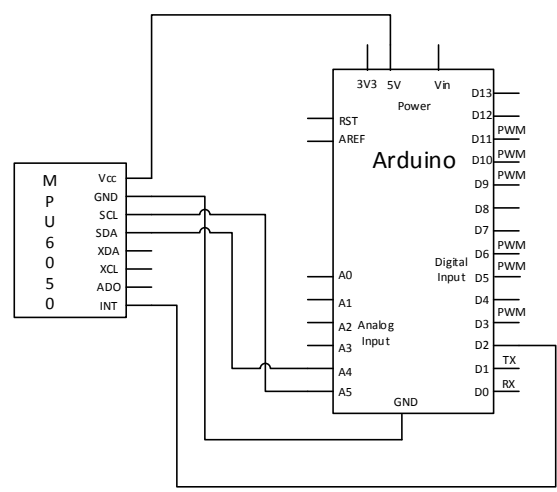


Figura 11 – Esquemático elétrico entre o Arduino e o MPU6050

2.3.3 Programação

2.3.3.1 Aquisição dos Dados pelo Arduino

Para facilitar a programação do circuito MPU6050 junto ao Arduino, Jeff Rowberg (ROWBERG, 2014) desenvolveu uma biblioteca que executa todas as inicializações necessárias para o funcionamento e comunicação do MPU-6050 com o microcontrolador. Ela também possui funções que já fazem a aquisição de todos os dados, incluindo os de tempe-

ratura (DOXYGEN, 2011) e selecionam as escalas a serem utilizadas pelo acelerômetro e pelo giroscópio.

O valor tanto da aceleração quanto da velocidade angular que são recebidos pelo Arduino sempre variam em uma faixa de  $[-32767, 32768]$  (INVENSENSE, 2013) devido ao protocolo de comunicação. A interpretação desses dados vai depender a escala que está selecionada. O padrão para ambos é o valor mais baixo,  $250^\circ/\text{s}$  e 2 G. O valor real das grandezas é calculado fazendo uma regra de proporção direta sendo que o máximo valor da faixa é equivalente ao valor da escala.

### 2.3.3.2 Descrição dos Programas

O programa que roda no computador, escrito em Java, funciona com base em três classes.

- a) *GolpeIHM.java*;
- b) *Golpe.java*;
- c) *Comunicacao.java*.

Dessas classes, a *GolpeIHM.java* é a principal. Abaixo será descrito a função de cada uma delas no programa.

#### a) **GolpeIHM.java**

Essa classe é a principal e responsável pela interface com usuário. Nela estão os botões que realizam as funções de carregar os dados do saco de pancadas que está sendo utilizado, junto a caixas de texto editável para massa, altura e diâmetro do saco e o botão que dá início à aquisição de dados.

Ao pressionar o botão de início, o programa inicia uma sequência de códigos que fazem a aquisição de dados e o cálculo da energia, utilizando um objeto da classe *Golpe.java*. Após todos os cálculos serem feitos, o valor da energia é mostrado em seu respectivo local.

#### b) **Golpe.java**

Essa classe funciona a partir de um objeto criado pela classe principal e também possui um objeto da classe *Comunicacao.java*.

Ao receber o comando de início pela função *Iniciar*, através do objeto da *Comunicacao.java* uma *string* é enviada ao Arduino, que, ao receber esse sinal, começa a aquisição de dados. Quando acaba a aquisição um vetor é enviado ao computador com os dados de aceleração e velocidade angular obtidos. Assim que o recebimento termina, se iniciam os cálculos. Abaixo estão listadas as funções:

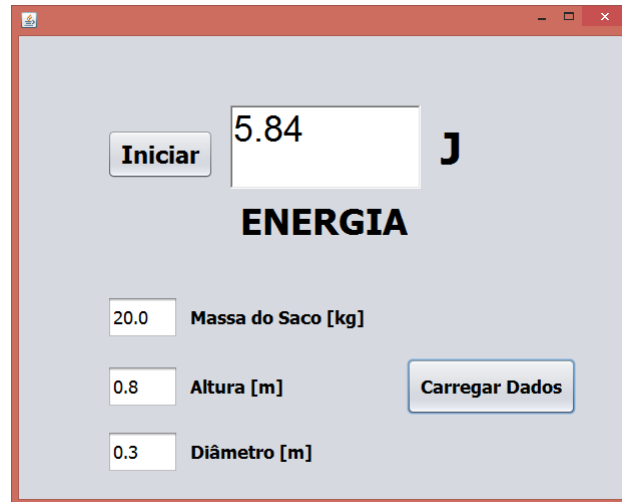


Figura 12 – Interface Homem-Máquina

- *MomentoInercia*: calcula o momento de inércia de cada eixo apartir dos dados inseridos pelo usuário;
- *StringparaInt*: recebe o vetor enviado pelo Arduino e transforma seus valores em inteiros;
- *EscalaMaxima*: é usada para verificar se algum dos eixos atinge a escala máxima. Caso isso ocorra, todos os outros processos são parados e é mostrada uma mensagem de “Erro” na IHM no local do valor da força;
- *SeparaVetor*: separa os vetores dos seis eixos (três de aceleração e três de velocidade angular) do vetor recebido;
- *CalculaAcelReal*: calcula a aceleração absoluta;
- *CalculaVelAng*: calcula a velocidade angular para cada eixo;
- *TempoGolpe*: analisa o vetor aceleração para obter o intervalo referente a apenas o primeiro pico de subida. Esse intervalo é multiplicado pelo período de aquisição de dados ( $1ms$ ), resultando no tempo total do golpe;
- *integrar*: faz o calculo da integral através de somatória entre o vetor recebido (pode ser da aceleração absoluta ou uma das velocidades angulares) e o  $\Delta t$ , calculado utilizando o inverso da frequência de aquisição de dados;
- *CalculaEnergiaLinear*: utiliza o valor da velocidade, obtido da somatória do vetor aceleração, para calcular a energia cinética linear;
- *CalculaEnergiaAngular*: utiliza os valores obtidos das somatórias das velocidades angulares para obter as velocidades médias,. Calcula as energias cinpeticas angulares utilizando os momentos de inércia;
- *EnergiaTotal*: Soma os valores obtidos das componentes angular e linear da energia cinética.

Todas essas funções são realizadas dentro da *Iniciar*.

c) **Comunicacao.java**

A classe de comunicação possui todas as funções necessárias para se obter uma comunicação entre o Java e o Arduino. Esse código foi retirado do site *Arduino Playground* ([ARDUINO...](#), 2013), um fórum que dá dicas e informações sobre a utilização do microcontrolador.

Para adequar o código ao projeto, foi feita uma alteração no evento que recebe os dados enviados via porta serial (nesse caso, a porta USB). Ao iniciar o recebimento dos dados, eles são guardados em um vetor até que o caractere “;”, indicando o fim da mensagem, seja recebido. Quando a mensagem termina, uma variável “terminou” recebe o parâmetro “true”, indicando que todos dados foram recebido e que pode iniciar os cálculos. Essa variável é lida pela classe *Forca.java* na função *Iniciar*.

Como o programa em Java fica responsável por todos os cálculos, o Arduino apenas recebe os valores do acelerômetro e giroscópio e envia para o computador via USB.

O programa funciona em *looping* até receber o caractere que indica o início da aquisição de dados. Então ele monitora a variável referente à aceleração do eixo Z. Quando houver uma variação no valor da variável que indique movimento, o programa começa a guardar em vetores os próximos cinquenta valores dos seis eixos. A quantidade de cinquenta valores foi escolhida através de testes que determinaram que, para essa taxa de aquisição, essa quantidade seria a ideal para se obter curvas próximas do real.

Terminando a aquisição dos dados o programa envia os vetores de aceleração e velocidade angular dos eixos X, Y e Z e logo depois o caractere “;” que indica o fim da mensagem. Depois disso, todas as variáveis são zeradas, aguardando um novo sinal de início.

O diagrama abaixo mostra o funcionamento do sistema.

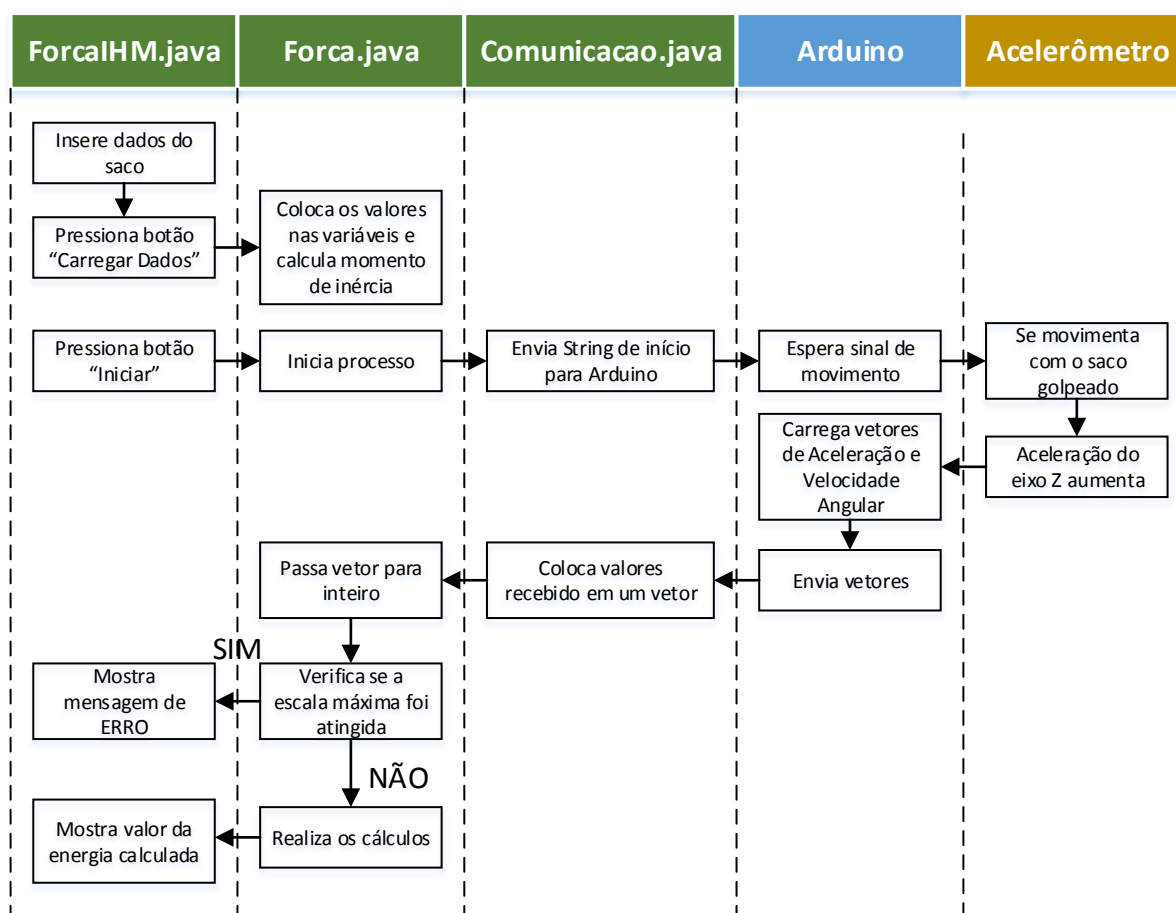


Figura 13 – Diagrama de funcionamento do sistema



## 3 Testes e Resultados

### 3.1 Testes de Calibração com Pêndulo

#### 3.1.1 Equações para calibração

Como a comunicação é feita de maneira digital e não analógica, a calibração dele é feita mantendo-o parado na horizontal (eixo Z do acelerômetro coincidindo com o eixo Z real) e programando o “offset” de cada eixo até que a medida dos eixos X e Y da aceleração e X, Y e Z do giroscópio se aproximem de zero e a do eixo Z da aceleração fique próxima do valor referente à gravidade.

Após realizada a calibração estática, é necessária uma validação dinâmica. Para isso foi utilizado o pêndulo para gerar um movimento oscilatório. O movimento pode ser descrito pela seguinte função:

$$\begin{aligned}x &= A.\text{sen}(\omega t) \\ \frac{dx}{dt} &= A.\omega.\text{cos}(\omega t) \\ \frac{d^2x}{dt^2} &= -A.\omega^2.\text{sen}(\omega t)\end{aligned}\tag{3.1}$$

Sendo  $\omega$  a frequência de oscilação dada por  $2\pi f$ , sendo  $f$  o inverso do período e  $A$  a amplitude do movimento, que, no caso, é a altura máxima que o pêndulo atinge durante o movimento. Essa altura pode ser calculada utilizando o giroscópio do MPU6050 para saber o ângulo do pêndulo nesse momento. A amplitude máxima da aceleração é dada por  $A.\omega^2$ .

A fórmula para o cálculo da amplitude é:

$$A(t) = L.(1 - \cos \theta(t))\tag{3.2}$$

Sendo  $\theta$  de valor igual ao ângulo  $\gamma$  medido pelo giroscópio durante o movimento do pêndulo, como mostra a figura 14.

Antes dos testes para verificar os dados referentes à aceleração, foi realizada uma calibração do giroscópio. Para isso, o acelerômetro foi colocado na posição de  $0^\circ$  e de  $90^\circ$ , obtendo um valor medido de  $11^\circ$  e  $85^\circ$ , respectivamente. A função de calibração do

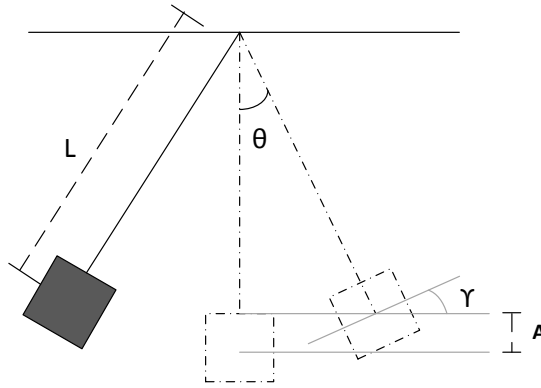


Figura 14 – Esquemático do pêndulo

giroscópio é dada a partir da resolução do sistema abaixo, sendo os valores de  $x$  e  $y$  os parâmetros da função de calibração:

$$\begin{cases} 11x + y = 0 \\ 85x + y = 90 \end{cases}$$

Os valores encontrados são:  $x = 1,22$  e  $y = -13,4$ , de forma que a equação a ser usada para calibração do valor medido pelo giroscópio é de:

$$Angulo_{real} = Angulo_{medido} \cdot 1,22 - 13,4$$

### 3.1.2 Execução dos testes

Para realização dos testes com o pêndulo, a caixa contendo o microcontrolador e o acelerômetro foi presa em um suporte em U por dois fios, assim como mostra a figura 15. A distância  $L$  entre a parte superior do suporte e a caixa é de  $0,26m$ . Para dar início ao movimento pendular a caixa é retirada do repouso e deslocada até a posição de início do movimento. Ela é solta e o movimento de oscilação inicia. Os dados adquiridos pelo gráfico tanto de aceleração quanto de movimento angular serão utilizados para a calibração do acelerômetro.

Os gráficos de aceleração e movimento angular, com os resultados já calibrados, obtidos por dois testes serão mostrados a seguir.

Os trechos entre os pontos  $I$  e  $II$ , nos gráficos apresentados, representam o momento em que a massa é deslocada da sua posição de repouso até à posição inicial do movimento. Os pontos  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $D$  são os instantes que foram analisados para a realização da calibração, sendo os pontos  $A$  e  $B$  referentes à primeira aquisição e  $C$  e  $D$ , à segunda.

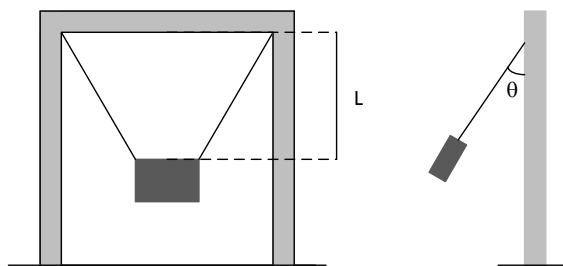


Figura 15 – Demonstração do teste com o pêndulo

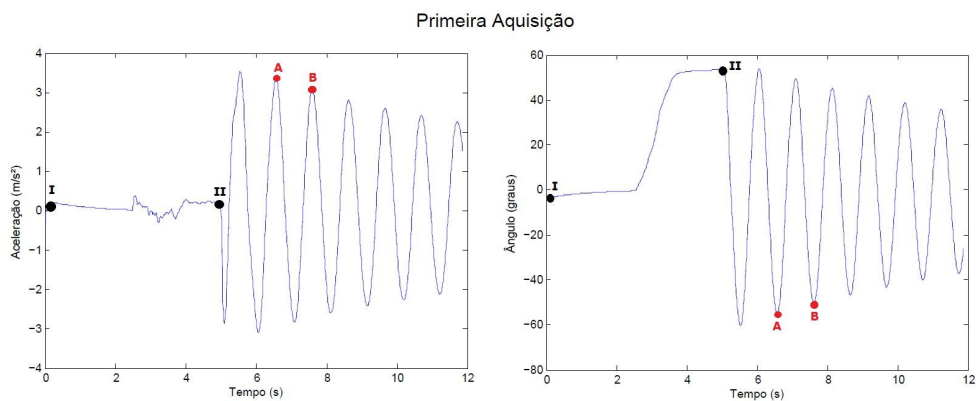


Figura 16 – Gráficos da aceleração e do deslocamento angular da primeira aquisição

Com os dados desses gráficos e pela fórmula 3.2, foi construída a tabela 4. Os valores do ângulo e da aceleração medida foram retirados diretamente dos gráficos.

Teste	Ângulo	Aceleração medida	Aceleração calculada
A	55,2 °	3,3m/s <sup>2</sup>	4,1m/s <sup>2</sup>
B	50,7 °	3,1m/s <sup>2</sup>	3,5m/s <sup>2</sup>
C	42,4 °	2,6m/s <sup>2</sup>	2,5m/s <sup>2</sup>
D	39,4 °	2,4m/s <sup>2</sup>	2,2m/s <sup>2</sup>

Tabela 4 – Dados retirados do gráfico e por cálculos

Para encontrar a função de calibração da aceleração foram utilizados os valores da primeira aquisição no ponto A com ângulo de 55,2 ° e da segunda aquisição no ponto D com ângulo de 39,4 °. O sistema a ser resolvido é:

$$\begin{cases} 3,3.a + b = 4,1 \\ 2,4.a + b = 2,2 \end{cases}$$

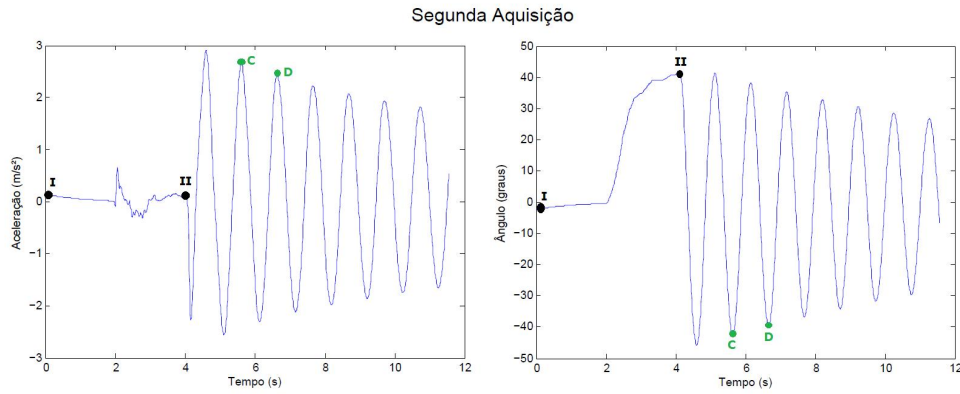


Figura 17 – Gráficos da aceleração e do deslocamento angular da segunda aquisição

A função encontrada foi:

$$Acel_{real} = Acel_{medido} \cdot 2,07 - 2,85 \quad (3.3)$$

Utilizando a equação 3.3 para calibrar os valores da primeira e segunda aquisição que não foram utilizados nos cálculos do sistema, tem-se  $3,5m/s^2$  para o ponto *B* e  $2,6m/s^2$  para o *C*. Os valores batem com os que foram calculados, o que valida a equação de calibração.

## 3.2 Avaliação do Tempo de Golpe

O objetivo deste teste é avaliar se a frequência de aquisição de dados é suficiente para obter curvas de aceleração e velocidade angular que garantam um valor calculado mais próximo do valor real possível.

O parâmetro utilizado para avaliar o teste será a quantidade de pontos que compõem o pico. Devem existir no mínimo dois pontos de subida e dois de descida. A curva a ser analisada é a da aceleração, que é que melhor representa a movimentação do saco no período do golpe.

Para esse teste serão dados golpes na mesma direção do plano XY, na direção do eixo X, de forma que o acelerômetro fique na região contrária à do golpe. O saco de pancadas utilizado têm  $30kg$  e o acelerômetro será colocado na direção do centro de massa, como mostra a figura 19.

O aparelho é fixado no saco de pancadas por um elástico com velcro. A direção dos eixos da aceleração medidos pelo acelerômetro estão representados na figura.

O gráfico da aceleração absoluta foi obtido calculando-se a soma quadrática dos



Figura 18 – Golpe aplicado no saco de pancadas

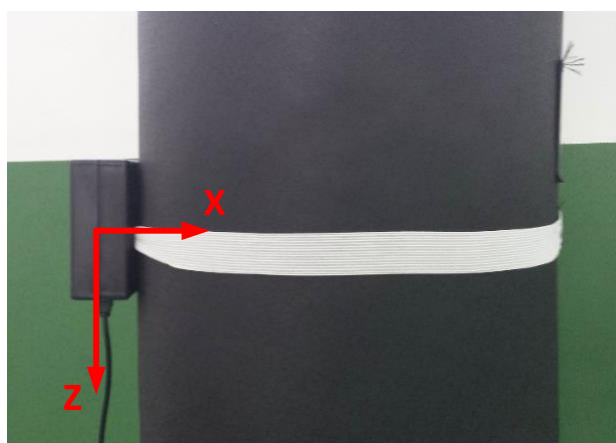


Figura 19 – Direção dos eixos X e Z da aceleração.

três eixos da aceleração e depois subtraindo o valor da gravidade ( $9,8m/s^2$ ). O gráfico do eixo X é usado para analisar o movimento pendular do saco após o golpe e separar o movimento referente ao golpe e o referente a inércia.

### 3.2.1 Análises Gráficas

Os gráficos analisados nos testes são os referentes à aceleração do eixo X e à aceleração absoluta. O eixo X foi escolhido devido ao fato do golpe ser aplicado em sua direção e, por isso, seus valores são mais significativos.

#### a) Primeiro Golpe

A aceleração máxima atingida foi de  $96,35m/s^2$  e o tempo de duração do golpe foi de  $11ms$ .

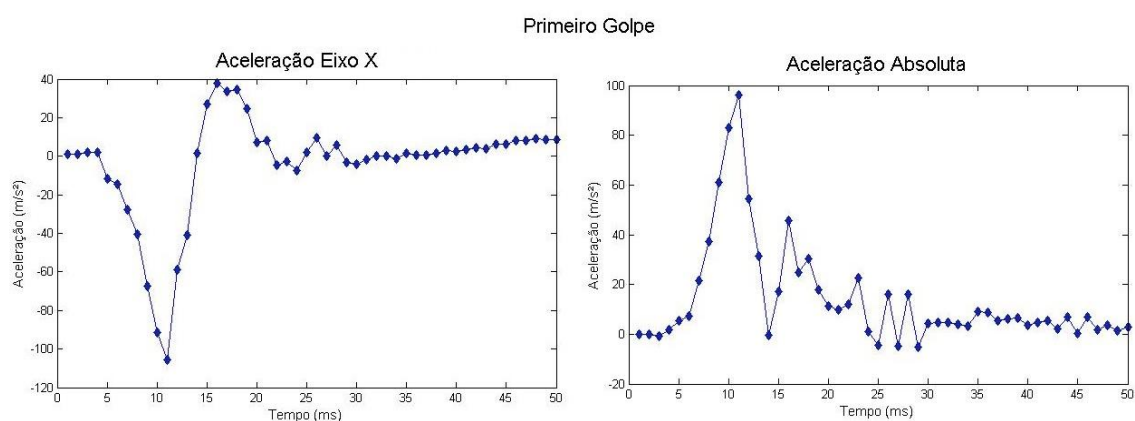


Figura 20 – Gráfico da aceleração do eixo X e absoluta do primeiro golpe

### b) Segundo Golpe

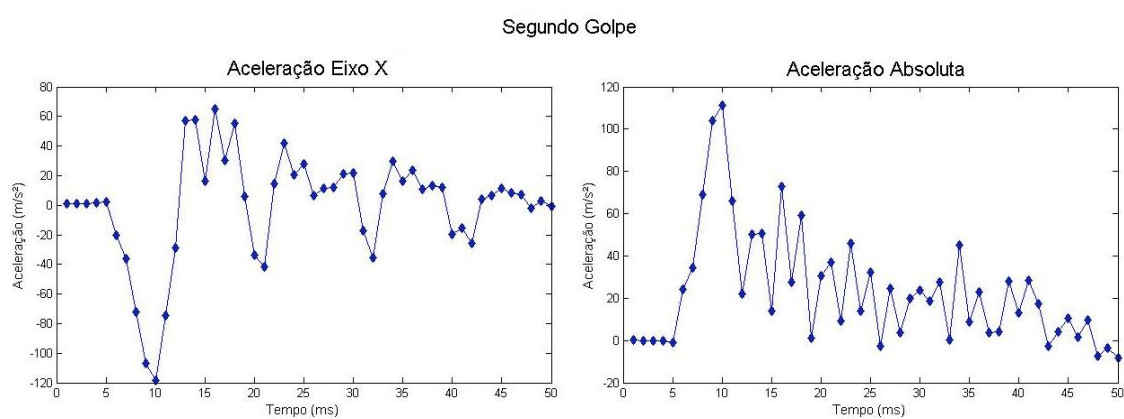


Figura 21 – Gráfico da aceleração do eixo X e absoluta do segundo golpe

A aceleração máxima medida nesse golpe foi de  $111,4m/s^2$  e teve uma duração de  $7ms$ .

### c) Terceiro Golpe

A aceleração máxima medida nesse golpe foi de  $108,6m/s^2$  e teve uma duração de  $8ms$ .

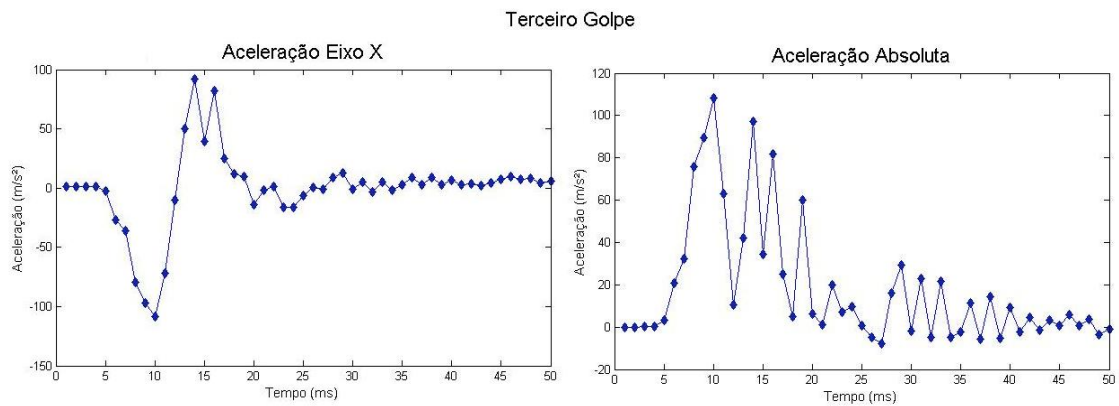


Figura 22 – Gráfico da aceleração do eixo X e absoluta do terceiro golpe

### 3.2.2 Discussão

Pelos gráficos é possível observar que a frequência de aquisição de 1 kHz é o suficiente para obter um gráfico de aceleração por tempo com o qual seja possível um cálculo confiável do impulso.

Nos gráficos referentes ao eixo X percebe-se uma curva semelhante à dos movimentos pendulares observados nos testes de calibração. O primeiro pico (negativo) se refere ao golpe aplicado, enquanto os seguintes se referem aos movimentos de inércia.

Nos gráficos de aceleração absoluta é possível observar oscilações mesmo quando os valores do eixo X já estão baixos. Essas oscilações representam a soma dos movimentos de inércia, principalmente vibrações, medidas nos outros eixos. Quanto mais forte o golpe, maiores são os valores dos movimentos de inércia, tanto no eixo X quanto no Y e Z, mas os valores mais significativos estão sempre no eixo de mesma direção do golpe. Esses valores podem ser diminuídos aumentando a massa do saco.

## 3.3 Avaliação dos movimentos de rotação

Nesse teste será avaliado os efeitos do movimento angular do saco de pancadas durante um golpe.

Será avaliado a energia em cada um dos eixos para determinar em qual ela é mais significativa. Esses valores serão comparados ao da componente linear da energia cinética para avaliar o quanto a rotação tem influência nos valores medidos.

O golpe será aplicado na direção da posição do centro de massa vertical e paralelo ao plano XY. A massa do saco de pancadas utilizado nesse teste é de  $20\text{kg}$  e suas dimensões são  $0,3\text{m}$  de diâmetro e  $0,8\text{m}$  de altura.

Os valores dos momentos de inércia dos eixos X, Y e Z são:

$$J_x = J_y = 1,18kg.m^2$$

$$J_z = 0,22kg.m^2$$

### 3.3.1 Análise Gráfica

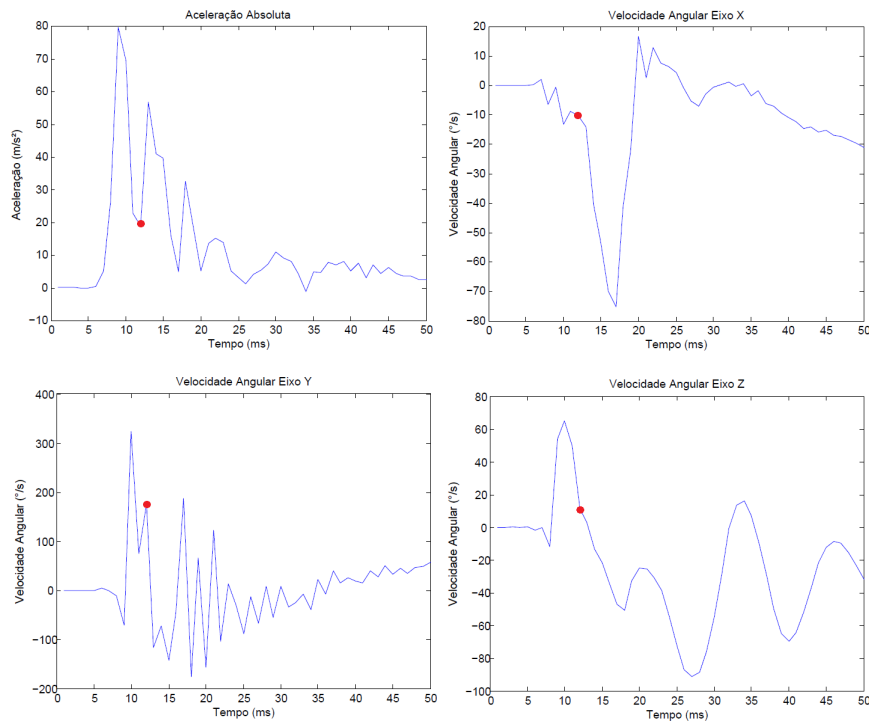


Figura 23 – Gráficos da aceleração absoluta e de velocidade angular dos três eixos de rotação

Dos gráficos, tem-se que o tempo de golpe foi de  $6ms$ .

As velocidades angulares média do golpe, calculada até o instante  $12ms$ , mostrado no gráfico pelo ponto vermelho, em  $rad/s$  é de:  $\omega_x = -0,09rad/s$ ;  $\omega_y = 1,17rad/s$ ;  $\omega_z = 0,46rad/s$ .

O valor da energia linear nesse caso é de  $E_{linear} = 0,44J$ . As energias angulares são:  $E_x = 0,005J$ ;  $E_y = 0,80J$ ;  $E_z = 0,02J$ .

### 3.3.2 Discussão

A maior velocidade angular está no eixo Y, isso por que é a direção do momento gerado pela força aplicada. No gráfico do eixo X, percebe-se que o pico de rotação ocorre



logo após a finalização do golpe, já no eixo Z, é possível observar um pico positivo ocorrendo no mesmo instante da aceleração linear, mas, nesse último caso, o maior valor absoluto de aceleração ocorre após o final do golpe. O movimento oscilatório presente no eixo Z é devido a estrutura que segura a corrente do saco de pancadas, se assemelhando a uma mola.

Observando os valores da energia, pôde-se perceber que a rotação do saco no eixo Y é a mais significativa se comparada a todas as outras, inclusive a linear. Isso ocorre devido à própria mecânica envolvida no movimento do saco, se assemelhando a um pêndulo. A junta que prende o saco à corrente é uma junta esférica, o que significa que o movimento de rotação do é muito mais significativo que o linear.

Como já foi dito anteriormente, não é possível calcular a posição em que um golpe será dado com os dados disponíveis, o que dificulta a transposição do impulso angular para linear (transformando momento em força). Porém, o valor da rotação não pode ser desconsiderado, pois influencia de maneira significativa no movimento do saco de pancadas. Se o valor mostrado pela interface fosse “Força” seria necessário inserir um campo na interface que permitisse ao usuário incluir o valor da posição no saco em que o golpe foi aplicado, para, dessa forma, fosse possível calcular a força pelo momento.

### 3.4 Teste com pêndulo e massa concentrada

Esse teste simulará um golpe com massa conhecida para que seja possível comparar a energia calculada com os dados obtidos pelo acelerômetro com a real.

Os dados do saco de pancadas são os mesmos do teste anterior:  $20kg$ ,  $0,8m$  de altura e  $0,3m$  de diâmetro, sendo os momentos de inércia igual a  $J_x = J_y = 1,18kg.m^2$  e  $J_z = 0,22kg.m^2$ .

O pêndulo possui uma massa de  $3kg$  em sua extremidade e está posicionado para causar impacto no centro de massa do saco de pancadas.

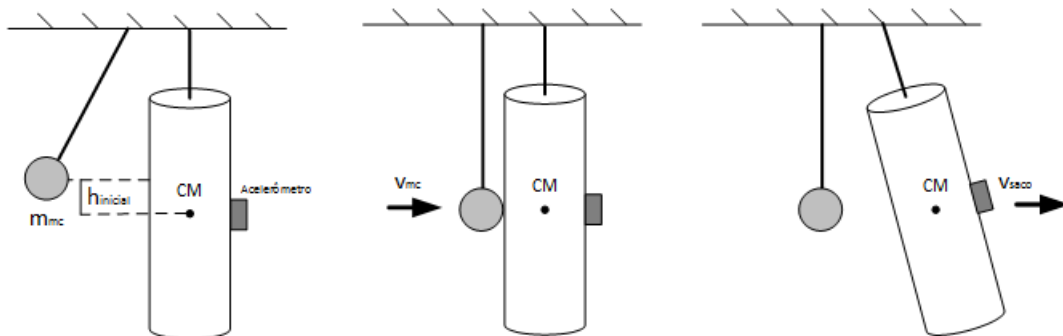


Figura 24 – Fases do movimento testado

Durante os testes, o pêndulo foi retirado do repouso e posicionado em quatro alturas diferentes, sendo a diferença para o centro de massa do saco de pancadas igual a  $0,05m$ ,  $0,10m$ ,  $0,15m$  e  $0,20m$ .

Pela Lei da Conservação da Energia, tem-se:

$$E_{potencial} = E_{cinetica}$$

$$m_{mc} \cdot g \cdot h_{inicial} = \frac{m_{mc} \cdot v_{mc}^2}{2} \quad (3.4)$$

Sendo  $m_{mc}$  o valor da massa concentrada,  $g$  a gravidade,  $h_{inicial}$  a altura em que a massa é solta e  $v_{mc}$  a velocidade com a qual a massa se choca com o saco de pancadas.

Considerando o choque perfeitamente elástico, sendo que após o choque a massa concentrada permaneça no local, e desconsiderando a perda de energia devido ao amortecimento do saco, a energia medida no saco deve ser igual à energia da massa concentrada no momento do impacto.

### 3.4.1 Dados do Teste

Os dados já calculados retirados dos quatro testes realizados, um para cada altura, estão representados na tabela 5.

Altura inicial (m)	$E_{teórica}$	$E_{lin}$ Exp.	$E_{ang}$ Exp.	$E_{total}$ Exp.	% Ec Exp. / $E_{teórica}$
0,05 m	1,50 J	0,48 J	0,02 J	0,57 J	34%
0,10 m	2,94 J	1,22 J	0,02 J	1,30 J	42%
0,15 m	4,33 J	2,12 J	0,01 J	2,16 J	49%
0,20 m	6,00 J	2,50 J	0,01 J	2,53 J	42%

Tabela 5 – Valores de energia calculados a partir dos testes

Todos os valores representados na tabela foram calculados utilizando as fórmulas já descritas no capítulo “Metodologia”.

### 3.4.2 Discussão

Analisando os resultados da tabela percebe-se que, diferente do teste com golpes reais, nesse caso os valores da componente angular da energia foram menores do que da linear. Isso ocorreu pois nesse teste o choque ocorreu muito próximo ao centro de massa do saco, diminuindo o momento das forças externas, responsável pela rotação do saco.

Os valores de energia medidos foram significativamente menores do que o real. Isso ocorre devido à perda de energia ocorrida na deformação do saco. As perdas não foram

constantes e nem lineares, o que dificulta uma calibração correta, porém os valores foram próximos, com uma média de 58% de perda. Esse valor pode ser usado para aproximar a energia medida da real.

## 4 Conclusão

O objetivo principal do projeto era criar um dispositivo que pudesse medir a força de um golpe que fosse de fácil utilização, baixo custo, preciso e intercambiável, para que pudesse proporcionar uma boa avaliação da evolução de atletas e ser acessível à todas as academias. Uma análise das forças envolvidas e da dinâmica do movimento mostraram que o melhor seria mudar a grandeza estudada de “Força” para “Energia”, garantindo uma precisão maior dos dados mostrados na interface.

O aparelho é constituído de equipamentos eletrônicos de baixo custo e fácil acesso, o que permite sua produção em massa. O micro controlador utilizado pode ser reduzido à um circuito constituído apenas das partes utilizadas para alimentação controle e comunicação, de modo que não se torna necessária a utilização de toda placa do Arduino Duemilanove, que é o item mais caro. Com essa alteração, o custo do produto diminui significativamente, garantindo uma boa margem de lucro sem torná-lo caro demais.

A interface homem-máquina desenvolvida é bem simples, mostrando apenas informações diretas referente à energia. Com essa informação já é possível realizar uma boa avaliação dos treinos de forma rápida e fácil, sendo possível ser utilizada até pelo próprio atleta. Uma evolução da interface poderia mostrar não apenas a energia calculada como o gráfico da aceleração e rotação. Um gráfico poderia trazer mais informações, como tempo de contato, e até proporcionar análises envolvendo mais de um golpe sendo possível avaliar o tempo entre eles. Uma análise desse tipo já necessitaria de alguém com um conhecimento um pouco maior para poder analisar corretamente as curvas geradas, mas atenderia ainda mais a necessidade dos treinadores.

Entre as melhorias que podem ser feitas para tornar o aparelho um produto comercial e competitivo, a troca da comunicação via cabo USB para uma comunicação sem-fio (*Bluetooth* por exemplo) é a mais prioritária. Apesar do cabo não intervir na leitura dos dados, considerando que ele seja grande o suficiente para não criar tensão durante o movimento da saco, não é confortável para o atleta aplicar golpes com um cabo por perto, nem para o treinador, que deve estar com o computador perto do saco, onde nem sempre tem lugar para acomodá-lo. Como a alimentação do aparelho no momento vem do próprio cabo, será necessário trocá-la por uma bateria de 9 V.

Apesar das melhorias necessárias o aparelho desenvolvido atende à todos os objetivos propostos e ainda atende à uma demanda importante dos treinadores de atletas de modalidades de combate. A escassez de produtos desse tipo no mercado torna os que existem muito caros e pouco acessíveis para academias menores. Mesmo esses produtos sendo mais desenvolvido tecnologicamente, o seu alto custo impossibilita sua maior utilização.

Um produto simples, de baixo custo, mas que passa as informações mais relevantes pode melhorar significativamente os treinos e a evolução de muitos atletas.

# Referências

- ARDUINO. *Arduino Duemilanove Overview*. 2014. Disponível em: <<http://arduino.cc/en/pmwiki.php?n=Main/arduinoBoardDuemilanove>>. Citado 4 vezes nas páginas 24, 25, 26 e 27.
- ARDUINO Playground - Java. 2013. Disponível em: <<http://playground.arduino.cc/interfacing/java>>. Acesso em: 10 out. 2014. Citado na página 30.
- BLOCK, P. K. *Mega Strike Punch Pad*. 2014. Disponível em: <<http://www.punchkickblock.com/our-products/mega-strike-punch-pad/>>. Acesso em: 10 out. 2014. Citado na página 14.
- BOTS, . *Arduino Uno and the InvenSense MPU6050 6DOF IMU*. 2012. Disponível em: <<http://42bots.com/tutorials/arduino-uno-and-the-invensense-mpu-6050-6dof-imu/>>. Acesso em: 10 out. 2014. Citado na página 27.
- David S. DilWorth e Kevin M. Hurlahe. *Methods and Apparatus for Accurately Measuring Strike Impact on a Martial Arts Training Bag*. 2012. US 2012023 8407A1. Citado na página 12.
- DOXYGEN. *I2Cdevlib - MPU6050 Class Reference*. 2011. Disponível em: <[http://www.i2cdevlib.com/docs/html/class\\_m\\_p\\_u6050.html](http://www.i2cdevlib.com/docs/html/class_m_p_u6050.html)>. Acesso em: 10 out. 2014. Citado na página 28.
- FILIPEFLOP, B. *Tutorial: Acelerômetro MPU6050 com Arduino*. 2014. Disponível em: <<http://blog.filipeflop.com/sensores/tutorial-acelerometro-mpu6050-arduino.html>>. Citado na página 25.
- FRANCHINI, E.; VECCHIO, F. B. D. *Ensino de Lutas: Reflexões e Propostas de Programas*. [S.l.]: Scortecci Editora. Citado na página 11.
- INVENSENSE. *MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4*. [S.l.], 2013. Disponível em: <<http://www.invensense.com/mems/gyro/documents/PS-MPU-6000A-00v3.4.pdf>>. Citado na página 28.
- INVENSENSE. *MPU-6000/6050 Six-Axis (Gyro + Accelerometer) MEMS MotionTracking™ Devices*. 2014. Disponível em: <<http://invensesense.com/mems/gyro/mpu6050.html>>. Acesso em: 10 out. 2014. Citado na página 25.
- PEARSON, J. N. *Kinematics and Kinetics of the Taekwon-do Turning Kick*. Dissertação (Mestrado) — University of Otago, Dunedin, New Zealand, 1997. Citado na página 10.
- RESEARCH, S. 2010. Strike Research - Product Data and Costs. Citado na página 13.
- RESEARCH, S. *Case Study*. 2010. Disponível em: <[http://www.strike-research.org/?p=c\\_study](http://www.strike-research.org/?p=c_study)>. Acesso em: 10 out. 2014. Citado na página 13.
- RESEARCH, S. *A comparison of our units of Measurement of impacts in the Fighting Arts, with Units used traditionally*. 2010. Strike Research. Disponível em: <[http://www.strike-research.org/pages/p\\_data/Limit5.pdf](http://www.strike-research.org/pages/p_data/Limit5.pdf)>. Acesso em: set. 2014. Citado na página 13.

- RESEARCH, S. *Layers of Power*. 2010. Strike Research. Disponível em: <[http://www.strike-research.org/pages/p\\_data/Layers.pdf](http://www.strike-research.org/pages/p_data/Layers.pdf)>. Acesso em: set. 2014. Citado na página 13.
- ROWBERG, J. *jrowberg/i2cdevlib - GitHub*. 2014. Disponível em: <<https://github.com/jrowberg/i2cdevlib>>. Citado na página 27.
- SCIENCE, S. *Mauricio "Shogun" Rua on Sports Science*. 2011. Disponível em: <[https://www.youtube.com/watch?v=KftA7Top\\_j0](https://www.youtube.com/watch?v=KftA7Top_j0)>. Acesso em: 2014. Citado na página 10.
- SIDTHILAW, S. Kinect and kinematic analysis of thai boxing roundhouse kicks. 1997. Citado na página 10.
- TATO. *MPU-6050 acelerômetro e giroscópio*. 2014. Disponível em: <<http://www.tato.ind.br/produto/MPU%252d6050-aceler%F4metro-e-girosc%F3pio.html>>. Citado na página 26.
- VECCHIO, F. D. et al. Energy asorbed by electronic body protectors from kicks in a taekwondo competition. *Biology of Sport*, v. 28, n. 1, p. 1–11, 2011. Citado na página 11.
- WALILKO, T.; VIANO, D.; BIR, C. Biomechanics of the head for olympic boxer punches to the face. *Br J Sports Med*, p. 1–11, 2005. Citado na página 10.

## Apêndices



# APÊNDICE A – Análise das Diferentes Soluções

Para conseguir alcançar o objetivo do projeto, foi necessário escolher o melhor sensor, ligado a um modelo mecânico, que seja capaz de medir a força e o impulso de um golpe direta ou indiretamente. Foram sugeridos três modelos que possibilitam obter o valor da força de um golpe utilizando métodos diferentes na aquisição dos dados necessários para os cálculos. Para avaliar qual foi a melhor escolha a ser usada neste projeto, foi feita uma análise das viabilidades técnica, operacional, econômica e de cronograma de cada um dos modelos.

A viabilidade técnica avalia se as tecnologias necessárias para realizar o projeto já estão bem desenvolvidas e se são fáceis de obter, se foi necessário aprender algo novo e qual foi a dificuldade envolvida nesse novo aprendizado. Quanto mais fácil e acessível forem as tecnologias e habilidades necessárias para conclusão do projeto melhor, pois aumenta-se as chances de conclusão.

A viabilidade operacional serve para avaliar a facilidade de operação do aparelho, se irá necessitar de muita manutenção e se necessita de um algum nível de treinamento para fazê-lo funcionar de maneira correta. Quanto mais intuitivo o aparelho for, melhor, pois será usado por pessoas que não tem necessariamente um nível técnico.

A viabilidade econômica estuda se o projeto irá necessitar de um orçamento muito alto ou não para atender todos os requisitos, inclusive o cronograma. O custo de um projeto, dependendo do caso pode ser um fator limitante, por isso é importante avaliar a melhor opção que atenda à demanda e tenha o menor custo.

A viabilidade de cronograma analisa se o projeto poderá ser concluído dentro do cronograma esperado. Dentro do cronograma está a fase de compra dos materiais, que dependendo do local onde for comprado ou do fato de ser necessário construir o componente, pode demandar um tempo crítico. O tempo de montagem e instalação dos componentes e da fase de teste também são importantes, pois até a data da entrega, o projeto deve funcionar perfeitamente.

Os modelos avaliados são descritos abaixo.

## A.1 Modelo Barra Engastada e *Strain gage*

Esse modelo mede a força de um golpe a partir da deformação de uma barra duplamente engastada. Abaixo segue uma rápida descrição do modelo. O sensor *strain gage* colado nas extremidades da barra se deforma junto com ela. Esse valor pode ser utilizado para calcular a força aplicada pelo método da resistência dos materiais.

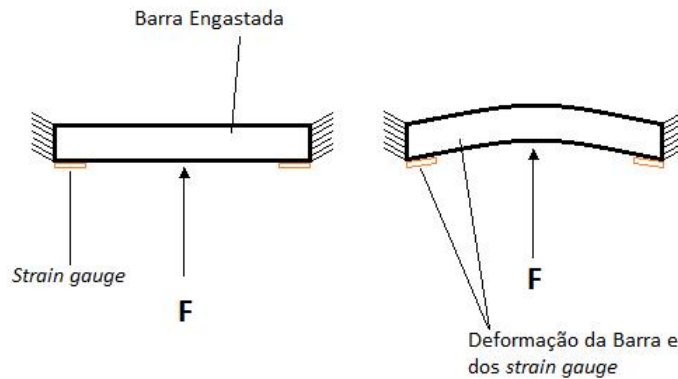


Figura 25 – Modelo com barra engastada e *strain gage*

O *strain gage* é um sensor resistivo que tem o valor de sua resistência alterado proporcionalmente à sua deformação. O sinal gerado pela variação de deformação normalmente é baixo, ou seja, a variação da resistência, que gera uma variação de tensão é pequena, por isso é necessário um sistema para amplificar esse sinal. O mais comum utilizado em *strain gages* é a ponte de Wheatstone.

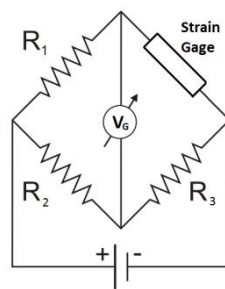


Figura 26 – Ponte de Wheatstone

A fórmula obtida aplicando a Lei de Kirchhoff nos nós para o valor da tensão  $V_G$  é:

$$V_G = \frac{R_1}{R_1 + R_{SG}} + \frac{R_2}{R_2 + R_3}$$

A força gerada será encontrada realizando o cálculo considerando a resistência dos materiais.

### A.1.1 Viabilidade Técnica

Analisando a viabilidade técnica desse modelo, será necessário um conhecimento de resistência dos materiais com vigas hiperestáticas para os cálculos, utilização do sensor *strain gage*, eletrônica necessária para a aquisição de dados.

Será necessária a construção de um circuito eletrônico que permita a aquisição dos dados e a comunicação com o computador. Essa comunicação pode ser feita por meio de um microcontrolador. A placa precisará de um filtro para evitar interferência nos dados vindos do sensor.

### A.1.2 Viabilidade Operacional

O material com o qual a barra deve ser feita não pode ser muito resistente para não prejudicar o desempenho do atleta, já que esse tipo de material pode machucá-lo ou fazer com que ele não use toda sua força com medo de se ferir, o que não é o objetivo do aparelho.

Uma barra que se deforma demais também pode prejudicar a leitura do sensor, pois o ideal é que ele se deforme  $\pm 3000 \mu\epsilon$  (“microstrain”). Essa é uma unidade de medida criada para mostrar a deformação do sensor que é dada por:

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_o}$$

Caso essa deformação seja maior, há um grande risco da leitura ser prejudicada e será necessário trocar o sensor. Seu valor significativamente baixo permite que haja essa troca, porém é necessário um conhecimento básico para poder reinstalá-lo de forma correta.

### A.1.3 Viabilidade Econômica

Os componentes necessários para construção desse projeto tem um valor relativamente baixo. Tanto os sensores quanto a eletrônica necessária para a aquisição dos seus dados são de baixo custo.

O valor da barra também não é muito representativo, apenas o suporte que necessita de fabricação poderá ter um custo relativamente elevado.

### A.1.4 Viabilidade Cronograma

Para construção do sistema mecânico será necessário uma barra em formato de viga e um aparato para garantir o engaste necessário para o bom funcionamento, para isso seria necessária a fabricação desses componentes.

Os componentes eletrônicos são itens de fáceis de encontrar em lojas especializadas e não necessitam de importação, porém a montagem deles na placa incluindo testes para garantir o bom funcionamento precisam de um bom tempo.

## A.2 Modelo Massa-Mola e *Encoder*-Acelerômetro

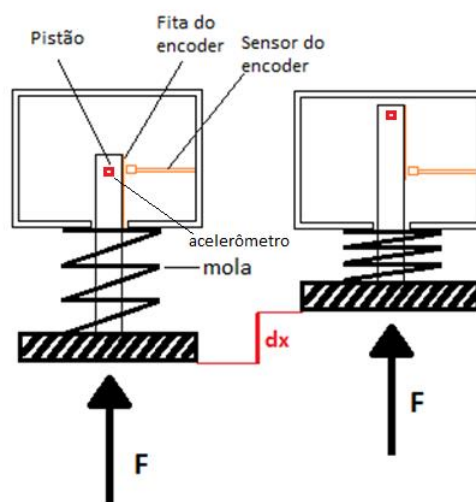


Figura 27 – Modelo Massa-Mola e *Encoder* - Acelerômetro

O modelo representado na Figura 27, é composto por um pistão por uma mola. O impulso do golpe será medido através da resultante das forças elástica e de inércia que causam o deslocamento do pistão.

O golpe aplicado causa um deslocamento  $dx$  na mola e assim como parte da força é utilizada para vencer a inércia do pistão, dessa forma, aplicando a 2ª Lei de Newton e a Lei de Hooke no sistema, temos:

$$F = m.a + k.dx$$

Onde  $m$  é a massa do pistão,  $a$  é a aceleração máxima do movimento,  $k$  é o coeficiente da mola e  $dx$  o deslocamento máximo alcançado. O valor da força encontrado é usado para calcular o impulso gerado no sistema pelo golpe.

### A.2.1 Viabilidade Técnica

Os cálculos necessários nesse caso são mais simples e as informações obtidas pelos sensores já estão diretamente ligadas às grandezas que se deseja obter. Sua eletrônica é mais simples o que facilita a aquisição dos dados e dá mais confiança.

Por outro lado, o projeto apresenta uma mecânica mais complexa, sendo necessária a instalação de componentes como um mancal de deslizamento que garanta um atrito muito baixo durante o movimento do pistão, estrutura de apoio e guias para evitar que o torque causado por uma força aplicada fora do centro prejudique o deslocamento. Também será necessário um contrapeso no final do pistão, pois o mesmo estará na horizontal e seu centro de massa deslocado não permitirá um deslocamento suave e unidimensional.

### A.2.2 Viabilidade Operacional

O sistema de molas será dimensionado para uma força máxima, o que limita valor máximo que poderá ser aplicado no sistema, pois existe um limite do deslocamento do pistão. Como o valor máximo de força é estimado, corre-se o risco de estar abaixo do real, principalmente pensando em um atleta de rendimento.

A eletrônica mais robusta evita problemas durante a aquisição de dados, contanto que as especificações como a taxa de aquisição de dados e velocidade máxima transversal do *encoder* sejam respeitadas e estejam de acordo com os valores estimados para um golpe.

### A.2.3 Viabilidade Econômica

O *encoder* linear é o que possui um maior custo. As especificações que ele precisa atender como uma boa resolução (menor que  $25\ \mu m$ ) e uma velocidade máxima transversal alta (maior que  $10m/s$ ) encarece o preço do produto. Já o acelerômetro é um item fácil de encontrar e a maioria atende as especificações necessárias. O material necessário para construção da estrutura do sistema como madeira, mancais e tubos para o eixo aumentam o custo do projeto.

### A.2.4 Viabilidade Cronograma

Muitas peças terão que ser fabricadas e será necessária a importação do *encoder*, o que irá prejudicar o cronograma do projeto. O tempo para montar a estrutura e instalar os componentes irá consumir o disponível para testes, o qual é de extrema importância, pois será necessário garantir o bom funcionamento do sistema, dados os possíveis problemas citados acima. Mesmo que todas as especificações sejam atendidas, apenas os testes garantirão o bom funcionamento do aparelho e se for necessário grandes modificações, não haverá tempo sobrando para o ajuste.

## A.3 Modelo Saco de Pancadas e Acelerômetro

Esse modelo é o mais encontrado para mensurar impactos de golpes. Consiste de um sensor acelerômetro acoplado em um saco de pancadas. Esse sensor irá medir a

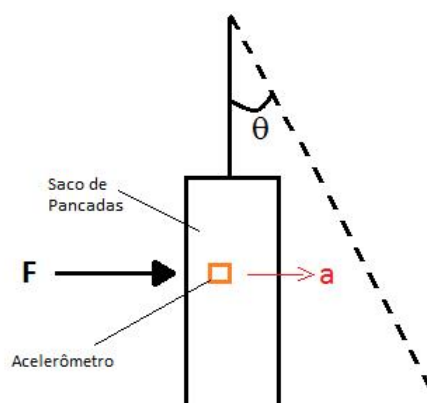


Figura 28 – Modelo Saco de Pancadas e Acelerômetro

aceleração do saco gerada pelo golpe aplicado nele.

Pela 2ª Lei de Newton é possível chegar no valor da força que causou o movimento do saco. Como ele estará suspenso superiormente como um pêndulo, é importante garantir que seu deslocamento angular, demonstrado pela Figura 28 pelo ângulo  $\theta$ , seja pequeno o suficiente para que possa ser considerado linear. Tanto o impulso quanto a força serão calculados com base no valor máximo de aceleração medido.

### A.3.1 Viabilidade Técnica

Sua montagem é relativamente simples. Não é necessário desenvolver nenhuma placa eletrônica complexa para obter os dados do acelerômetro, pois o mesmo já possui um circuito próprio sendo apenas necessário conectar seus pinos no micro controlador. O sinal de resposta do sensor pode ser digital, ou seja, é enviado um conjunto de bits contendo o valor da aceleração, ou analógico, sendo nesse caso, sua resolução dada por  $mV/g$  e depende da sua tensão de saída e da faixa de medida do sensor.

Uma dificuldade será prender o acelerômetro, para isso será necessário algum tipo de caixa que possa ser acoplado no saco e permita que o sinal do micro controlador chegue ao computador para que seja feito os cálculos.

### A.3.2 Viabilidade Operacional

Como o saco de pancadas já é um item comum em um treinamento de artes marciais principalmente para treinamento de força, não causará nenhuma estranheza para o atleta ao utilizá-lo.

O acelerômetro terá que ser instalado em um local que não prejudique a aplicação do golpe. A caixa em que ele está colocado não pode se soltar do saco durante o uso, por

isso deve ser muito bem presa ao mesmo.

O saco ficará em movimento após o golpe devido a inércia, dessa forma, muitos valores de aceleração serão medidos, o valor que será usado para o cálculo da força e consequentemente do impulso, será o máximo atingido.

### A.3.3 Viabilidade Econômica

Dos componentes necessários para a realização do projeto, o único com valor mais elevado será o saco de pancadas, devido à necessidade de se ter um peso alto. O acelerômetro não é um sensor caro e dependendo das suas especificações, é facilmente encontrado em lojas de eletrônicos brasileiras, não necessitando de importação.

### A.3.4 Viabilidade Cronograma

Devido à maior facilidade para trabalhar com a eletrônica e a não necessidade de se fabricar nenhum componente mecânico, a fase de testes pode iniciar mais rápido, tornando maiores as chances do sistema funcionar perfeitamente no fim do projeto. O fato do acelerômetro não precisar de importação também é um fator favorável ao cronograma.

## A.4 Escolha Entre os Modelos Apresentados

Para escolher o melhor modelo, será utilizada uma matriz de decisão, no qual será dada uma nota de um a três para cada modelo, sendo 3 o melhor naquele item e 1 o pior. Também será dado um peso para eles, sendo:

- a) Viabilidade técnica: 4;
- b) Viabilidade operacional: 3;
- c) Viabilidade econômica: 2;
- d) Viabilidade cronograma: 5.

Assim, tem-se a seguinte tabela:

Modelo	Técnica	Operacional	Econômica	Cronograma	Total
<b>Strain Gage + Barra</b>	2	1	3	2	27
<b>Encoder + Mola</b>	1	2	1	1	17
<b>Acelerômetro + Saco</b>	3	3	2	3	40

Tabela 6 – Matriz de Decisão

Pela Tabela 6, pode-se perceber que o melhor modelo para o projeto é o do acelerômetro com saco de pancadas.

O modelo que será utilizado para mensurar um golpe será composto por um sensor acelerômetro acoplado em um saco de pancadas que irá receber os golpes. Esse saco deve ter uma massa relativamente alta para garantir que seu deslocamento possa ser considerado linear.