



João Victor Neves Neiva – 1511876

Desenvolvimento de um protótipo de medidor de potência
para ciclismo

Projeto de Graduação em Engenharia Mecânica

Projeto de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Adrian Giassone

Rio de Janeiro,

03/12/2023

João Victor Neves Neiva

Desenvolvimento de um protótipo de medidor de potência para ciclismo

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao programa de graduação em engenharia mecânica, da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de engenheiro mecânico.

Orientador: Adrian Giassone

Rio de Janeiro
03 de novembro de 2023

Dedico este trabalho a todos os meus professores da graduação. Em especial ao professor e orientador Adrian Giassone, que lecionou a minha primeira aula de engenharia e me guiou no último projeto da graduação. E ao professor Igor Braga, que sem ele, teria sido muito mais difícil atingir os objetivos do trabalho.

Dedico à minha mãe e irmã, que passaram ao meu lado por todas as fases desta longa trajetória. Obrigado por estarem comigo e sempre me impulsionarem.

Agradecimentos

Agradeço à minha mãe. Obrigado por estar comigo em todas as dificuldades. À minha irmã, minha escudeira e confidente. Obrigado.

Amo muito vocês.

Agradeço ao professor Adrian por deixar o laboratório de portas abertas em todos os momentos que precisei. Também pelas trocas e direcionamentos ao longo do trabalho de conclusão. Obrigado por ser professor e amigo.

Agradeço à minha namorada, Olívia, por todo o carinho, compreensão, ajuda, e parceira na reta final.

Agradeço à minha amiga Isabela pela parceria e ajuda em todas as matérias pelas quais passamos durante estes anos.

Sou grato a vários dos professores do curso de graduação em engenharia mecânica. Todos me ensinaram que as dificuldades fazem crescer, e precisamos delas para sermos melhores.

Agradeço à PUC-Rio por todo o ambiente disponível estes anos.

Obrigado.

Resumo

O ciclismo necessita de inovações tecnológicas para a contínua evolução dos praticantes. Neste sentido, o medidor de potência é de extrema importância, pois permite uma análise mais precisa do desempenho do atleta em treinos ou provas. Os medidores de potência do mercado brasileiro possuem preços altos, diminuindo o acesso à tecnologia. Desta forma, propõe-se a construção de protótipo de medidor de potência utilizando-se de produtos disponíveis no Brasil. Os materiais usados foram: um microcontrolador, um sensor de inércia, extensômetros resistivos, um amplificador de sinal, e um módulo bluetooth para transmitir os dados. O protótipo foi validado comparando os dados adquiridos com os dados de um rolo de treino comercial em dois testes diferentes. Os resultados indicam o seu funcionamento correto. Para trabalhos futuros, o foco principal é diminuir o ruído no sinal, e depois, testar o protótipo em ambientes de treino ou prova, representando a condição extrema de uso. Deste modo, os objetivos do trabalho foram atingidos, e seus resultados satisfatórios.

Palavras-chave: Ciclismo. Potência. Extensometria. Arduino. Sensor. Prototipagem.

Abstract

Cycling requires technological innovations for the continuous evolution of practitioners. In this regard, the power meter is of utmost importance as it allows for a more precise analysis of the athlete's performance in training or competitions. Power meters in the Brazilian market have high prices, reducing access to technology. Therefore, the proposal is to build a prototype power meter using products available in Brazil. The materials used include a microcontroller, an inertia sensor, strain gauges, a signal amplifier, and a Bluetooth module for data transmission. The prototype was validated by comparing the acquired data with data from a commercial training roller in two different tests. The results indicate its correct operation. For future work, the main focus is to reduce signal noise and then test the prototype in training or competition environments, representing extreme usage conditions. Thus, the objectives of the study were achieved, and the results are satisfactory.

Palavras-chave: Cycling. Power. Strain gauging. Arduino. Sensor. Prototyping.

Sommario

Il ciclismo richiede innovazioni tecnologiche per la continua evoluzione dei praticanti. In questo senso, il misuratore di potenza è di estrema importanza, poiché consente un'analisi più precisa delle prestazioni dell'atleta durante allenamenti o gare. I misuratori di potenza presenti sul mercato brasiliano hanno prezzi elevati, riducendo l'accesso alla tecnologia. Pertanto, si propone la costruzione di un prototipo di misuratore di potenza utilizzando prodotti disponibili in Brasile. I materiali utilizzati comprendono un microcontrollore, un sensore di inerzia, deformometri resistivi, un amplificatore di segnale e un modulo Bluetooth per la trasmissione dei dati. Il prototipo è stato convalidato confrontando i dati acquisiti con quelli di un rullo di allenamento commerciale in due test diversi. I risultati indicano il corretto funzionamento. Per i lavori futuri, l'obiettivo principale è ridurre il rumore nel segnale e successivamente testare il prototipo in ambienti di allenamento o gara, rappresentando condizioni estreme di utilizzo. Così, gli obiettivi dello studio sono stati raggiunti e i risultati sono soddisfacenti.

Parole Chiave: Ciclismo. Potenza. Estensimetria. Arduino. Sensore. Prototipazione.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Locais de instalação do medidor de potência	14
Figura 2 – Decomposição da força resultante no pedivela	16
Figura 3 – Análise da assimetria	17
Figura 4 – Deformação normal	18
Figura 5 – Strain Gauge	19
Figura 6 – Ponte de Wheatstone	20
Figura 7 – Transdutor Sísmico	22
Figura 8 – Força de Coriolis	23
Figura 9 – Arduino Nano	26
Figura 10 – MPU6050	27
Figura 11 – HX-711	29
Figura 12 – HC-05	30
Figura 13 – Esquema de funcionamento do protótipo	31
Figura 14 – Protótipo completo	31
Figura 15 – Análise de malha	32
Figura 16 – Simulação das tensões atuantes	33
Figura 17 – Simulação da deformação no pedivela	33
Figura 18 – Extensômetros no pedivela	34
Figura 19 – Esquemático das ligações dos equipamentos	35
Figura 20 – Pedivela instrumentado	36
Figura 21 – Curva de calibração	38
Figura 22 – Montagem: protótipo e rolo de treino	39
Figura 23 – Comparação dos resultados do teste1	41
Figura 24 – Teste2: Gráfico do software	43
Figura 25 – Teste2: gráfico do protótipo	44

Lista de tabelas

Tabela 1 – Medidores de potência comercial	24
Tabela 2 – Especificações <i>Strain Gauge</i> BF350	28
Tabela 3 – Calibração <i>strain gauge</i>	37
Tabela 4 – Teste1: análise estatística	42
Tabela 5 – Teste2: análise estatística	42
Tabela 6 – Teste1: comparação dos valores médio e máximo	43
Tabela 7 – Teste2: comparação dos valores médio e máximo	43
Tabela 8 – Comparação dos valores médio e máximo	44
Tabela 9 – Análise de custos	45

Lista de abreviaturas e siglas

2D	Duas dimensões
ADC	conversor analógico digital
ANT	Actor-Network Theory
DAS	Documento de Arrecadação do Simples Nacional
EEPROM	Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory.
FE	Força Efetiva
GND	Ground (Terra)
I2C	Inter-Integrated Circuit
IDE	Integrated Development Environment
KB	Kilo Bytes
LE	Low Energy
MEMS	Micro eletromecânicas
Mbps	Mega bits por segundo
PDF	Portable Document Format -Formato Portátil de Documento.
R1	Resistência 1
R2	Resistência 2
R3	Resistência 3
R4	Resistência 4
SPI	Serial Peripheral Interface
SRAM	Static Random Access Memory.
SRM	Schoberer Rad Messtechnik
USB	Universal Serial Bus
rad	radiano
rpm	rotações por minuto
s	segundos

Sumário

1	Introdução	13
1.1	Motivação	13
1.2	Objetivo Principal	14
1.2.1	Objetivos secundários	15
1.3	Estrutura	15
2	Revisão da Literatura	16
2.1	Potência	16
2.2	Mecânica da pedalada	17
2.3	Medições com sensores	18
2.3.1	Deformação	18
2.3.2	Extensometria	19
2.3.2.1	<i>Strain Gauges</i>	20
2.3.3	Velocidade Angular	21
2.3.3.1	Giroscópio e Acelerômetro	22
2.4	Medidores de Potência comerciais	23
3	Materiais e Método	25
3.1	Requisitos de projeto	25
3.2	Seleção dos equipamentos	25
3.2.1	Microcontrolador Arduino NANO	25
3.2.2	Sensores Inerciais	26
3.2.2.1	MPU6050	27
3.2.3	<i>Strain Gauges</i> e amplificador de sinal HX711	28
3.2.4	Módulo <i>Bluetooth</i> HC-05	29
3.3	Desenvolvimento do protótipo	30
3.3.1	Visão geral	30
3.3.2	Extensometria	32
3.3.2.1	Análise da malha - Simulação 2D	32
3.3.2.2	Colagem dos <i>strain gauges</i>	33
3.3.3	Desenvolvimento do circuito	35
3.3.4	Análise dos dados	36
3.3.5	Posicionamento do pedivela	36
3.3.5.1	Modelo de pedivela	37
3.4	Calibração	37
3.5	Comparação com modelo comercial	38
3.5.1	Medidor de potência comercial	39

3.5.2	Software	39
3.5.3	Método de comparação	39
4	Resultados e Discussão	41
4.1	Resultados	41
4.1.1	Teste de funcionamento 1	41
4.1.2	Teste de funcionamento 2	43
4.1.3	Análise de custo	45
4.2	Discussão	45
5	Conclusão	46
	Referências	47
	ANEXOS	49
	ANEXO A – Programação do Arduino	51

1 Introdução

1.1 Motivação

Maier *et al.* (2017) afirma que diferentes modalidades de ciclismo, com a finalidade de conduzir testes e monitorar o treinamento e provas, utilizam de tecnologias que medem as potências produzidas pelo atleta. O ciclismo teve sua estreia nos jogos olímpicos em 1896, e desde então apareceu em todas as edições seguintes, com exceção a que aconteceu em Estocolmo em 1912.(OLYMPICS CHANNEL, 2023) Isto mostra a popularidade do esporte no cenário mundial, e por consequência o interesse na evolução do treinamento.

Segundo (Candotti, 2003) o ciclismo depende, além do treinamento direcionado ao condicionamento físico, de um tipo de treinamento técnico. O que gera uma necessidade de monitorar e analisar o desempenho do atleta. Com isto, conforme a autora, a evolução tecnológica permite o avanço no desempenho dos atletas.

Em Bini, Hume e Cerviri (2011), a tecnologia desenvolvida para medir potência é preferível que a de batimento cardíaco para se medir a intensidade da atividade, pois ela não é afetada pela temperatura ou por efeitos hemodinâmicos. Elias *et al.* (2015) afirma que o medidor de potência é a tecnologia que mais auxilia os ciclistas, já que os treinadores conseguem compreender melhor as necessidades individuais e o percurso e, por conseguinte, elaborar um plano de treino mais preciso e eficiente.

Os equipamentos que medem potência para ciclismo podem ser separados em dois grupos: os cicloergômetros *indoor*, e os que podem ser instalados na bicicleta, usados em atividades *outdoor*. A diferença de uso entre os mesmos está na sua finalidade. Sendo os cicloergômetros usados para avaliações laboratoriais, onde se determina com precisão os limiares máximos de esforço, usados como base para elaborar os treinos. Já os medidores *outdoor* são usados para retratar o esforço durante o exercício, deste modo, pode-se analisar a execução em determinada condição de treino (Earnest *et al.*, 2005). Logo, o medidor de potência *outdoor* é o método mais preciso e não invasivo de controle de carga que pode ser usado em diferentes condições Elias *et al.* (2015).

Ciclistas buscam sempre produzir o máximo de potência por longas durações. A potência imprimida no pedal é transferida para o pedivela, que, é transferida para o mecanismo de movimento da bicicleta. O medidor de potência normalmente utiliza do torque aplicado ao pedal ou então no pedivela.(Gharghan; Nordin; Ismail, 2017). Várias técnicas são utilizadas hoje, onde as principais diferenças estão nos tipos de sensores usados e local de instalação (Vieira; Gonçalves, 2015).

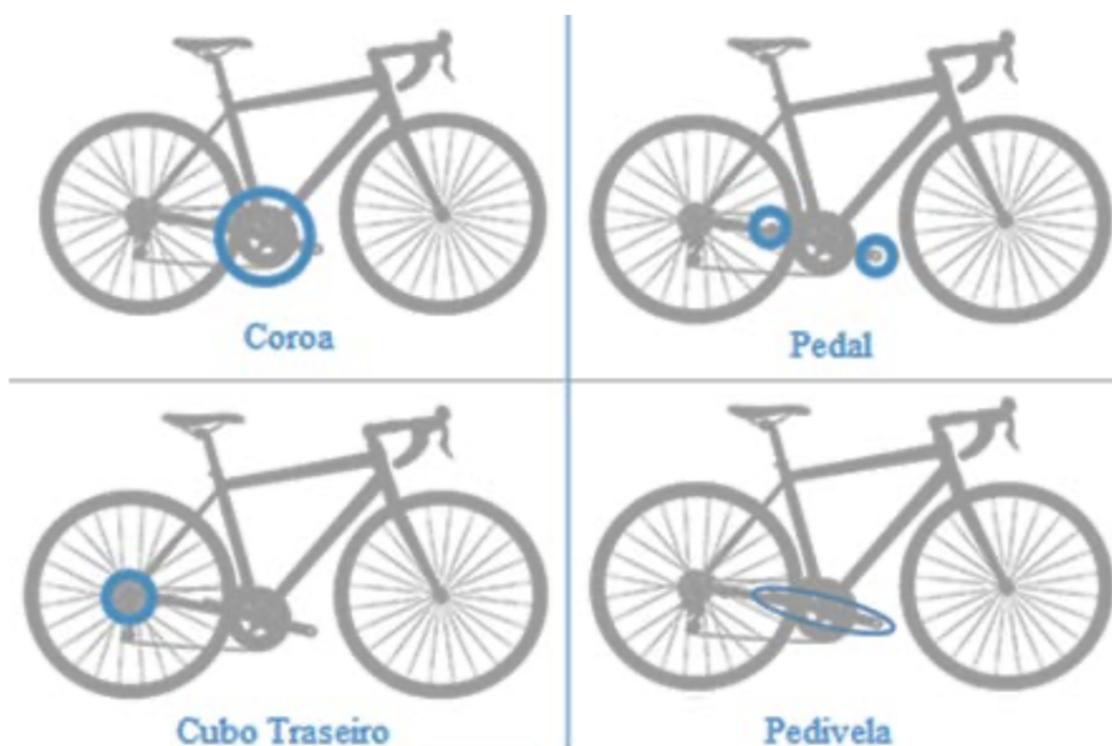


Figura 1 – Locais de instalação do medidor de potência

O mercado atual possui diversas marcas e tipos de medidores de potência usados por ciclistas e triatletas. O extensômetro, é o principal tipo de sensoriamento usado para medir a força aplicada pelos ciclistas. Ele pode ser colado em quatro partes da bicicleta para coletar a informação da força aplicada. Elas são: a coroa, o pedivela, o pedal, ou o cubo traseiro (Elias *et al.*, 2015). A Figura 1 ilustra os possíveis locais. A extensometria será abordada mais adiante no trabalho.

No comércio, segundo Gharghan, Nordin e Ismail (2017), o produto mais comum disponível é o *Schoberer Rad Messtechnik (SRM®)*. Este mede o torque entre os pedivela direito e esquerdo com o uso de *strain gauges* - tipo de extensômetro de resistência (Instruments, 2023) - e multiplica pela cadência da pedalada, medida por um sensor magnético, para determinar a potência. A *Power Tap®* utiliza do torque produzido no cubo traseiro e o mede também com *strain gauges*. O produto da *Ergomo Pro®* usa de dois optoeletrônicos sensores localizado na parte que conecta ambos os pedivela. A *POLAR®* mede a potência baseado na velocidade e tensão da corrente. A *Garmin®* mede através da força aplicada aos pedais direito e esquerdo.

1.2 Objetivo Principal

Vista a necessidade de um produto nacional para medir a potência de ciclistas profissionais ou amadores, o presente trabalho tem o objetivo de construir um protótipo de

medidor de potência para ciclismo, instalado no pedivela esquerdo, utilizando componentes comprados no mercado nacional.

1.2.1 Objetivos secundários

- Baixo custo;
- Produtos encontrados no mercado brasileiro;
- Não atrapalhar o ciclista durante o movimento de pedalar;
- Transmissão sem fio;
- Validação com um medidor comercial.

1.3 Estrutura

Na seção 2.1 será discutida o conceito de potência, e como a mesma pode ser calculada em bicicletas. Em seguida, em 2.2, será analisada a mecânica de uma pedalada, já que é importante compreender como as forças se aplicam ao pedal durante um ciclo. Na seção 2.3 se discutirá a teoria dos sensores escolhidos. Na seção 3 será apresentado os modelos dos sensores, a montagem, a calibração do instrumento, e o procedimento para validação do protótipo. Em seguida, na seção 4, serão discutidos os resultados obtidos. Ao final do documento, na seção 5, será apresentada a conclusão acerca do protótipo construído.

2 Revisão da Literatura

2.1 Potência

Em Vieira e Gonçalves (2015), pode-se correlacionar o torque com a força aplicada pelo ciclista no momento da pedalada, em Newtons, multiplicada pelo tamanho do pedivela, em metros. E para obter a potência despendida pode-se multiplicar esta relação pela cadência, que é a velocidade angular com a qual o pedivela gira, em radianos por segundo.

Segundo Figliola e Beasley (2006) a potência sempre é transmitida por componentes mecânicos, e está relacionada conforme a Eq.(2.1):

$$P = \omega \times T = \omega \times F \cdot L \quad (2.1)$$

onde ω é a velocidade de rotação em radianos por segundo, F é a força aplicada em Newtons, e L é o comprimento da alavanca em metros.

Ao analisar a mecânica do ciclo da pedalada, conclui-se que existe uma parcela da força resultante que é capaz de gerar movimento. Esta parcela é chamada força efetiva (ver Figura 2), e é a componente perpendicular ao pedivela (Araújo, 2021).

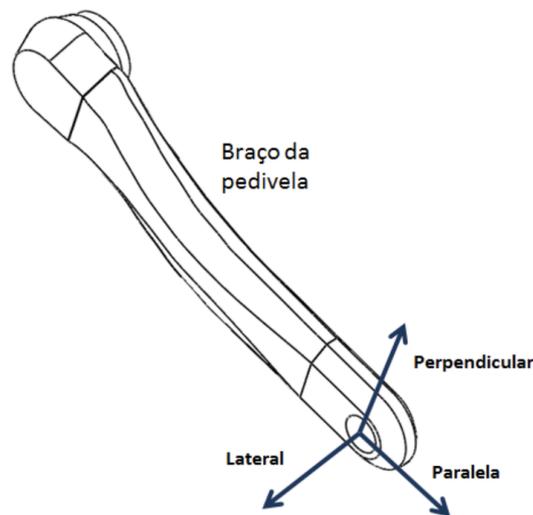


Figura 2 – Decomposição da força resultante no pedivela

Então o torque é:

$$T = FE \cdot L \quad (2.2)$$

onde T é o torque resultante em [Nm], FE é a Força Efetiva em [N], e L é o comprimento do braço do pedivela em [m].

A velocidade angular de rotação do pedivela é normalmente mensurada em rotações por minuto, sendo denominada cadência. Aplicando a conversão de rpm para rad/s na Eq.(2.2), obtém-se a Eq.(2.3) que descreve a potência instantânea em relação ao torque e à cadência do ciclista (Araújo, 2021):

$$P = \omega \times T = \frac{2\pi}{60} \omega \times FE \cdot L \quad (2.3)$$

2.2 Mecânica da pedalada

De acordo com Candotti (2003), a força aplicada aos pedais é usada para caracterizar a técnica de pedalada dos ciclistas, e esta força pode ser medida com o auxílio de pedais especiais chamados plataformas de força. Este estudo descreve a força em termos de suas componentes. Destas, a única responsável pelo movimento do conjunto é a força efetiva (imagem 2), perpendicular ao pedivela. Para Groot *et al.* (1994), a força aplicada pelo ciclista terá sua componente efetiva com módulo cada vez mais semelhante conforme atue no plano sagital durante a fase propulsiva da pedalada.

Em Araújo (2021), analisou-se a combinação vetorial das componentes da força resultante aplicada pelo ciclista. Também notou-se no estudo que outra variável importante é a assimetria bilateral, que é um índice que mostra as diferenças entre as forças do membro dominante do não dominante. Contudo, em Bini, Hume e Cerviri (2011), estudou-se a assimetria bilateral, e conforme a Figura 3, ela não possui efeito significativo.

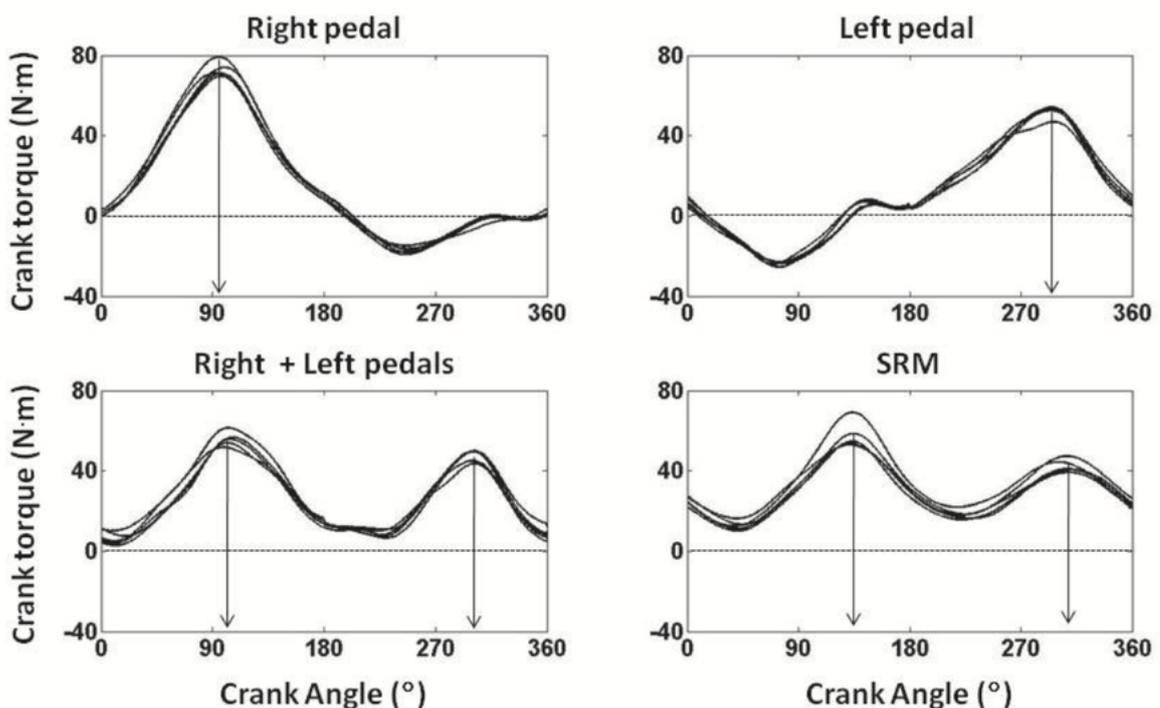


Figura 3 – Análise da assimetria

2.3 Medições com sensores

Transdutores são itens que fornecem valores para grandezas físicas em forma de tensão, corrente, resistência, etc. Deste modo, os sensores utilizam desta tecnologia para poder transformar sinais físicos em variações elétricas e que, por sua vez, podem ser lidas por equipamentos adequados como microprocessadores (Figliola; Beasley, 2006).

Segundo Vieira e Gonçalves (2015) a tecnologia avançou de tal forma que atualmente são usados transdutores baseados em tecnologia de sistemas micro eletromecânicos (MEMS). Tal tecnologia é uma alternativa de baixo custo e com vantagens como: menor tamanho, menor peso, menor consumo de energia, e com alta confiabilidade de operação. Tendo os conhecimentos das leis da dinâmica e como o movimento do corpo de estudo é descrito, estes aparelhos são projetados para perceber os efeitos da ação das forças que provocam alterações no estado, transformando esta mudança em sinal elétrico. Esta tecnologia é capaz de fornecer variações de velocidade e aceleração, linear ou angular.

2.3.1 Deformação

Em Figliola e Beasley (2006) a análise mecânica dos materiais fornece uma base para prever as características essenciais de um projeto mecânico e provê entendimento fundamental do comportamento das partes sujeitas a carregamento.

A força aplicada em um objeto está relacionada com a tensão por meio de:

$$\sigma_a = \frac{F_n}{A_c} \quad (2.4)$$

onde A_c é a área transversal e F_n é a força de tração aplicada.

Na maioria dos casos a tensão não pode ser medida diretamente (Figura 4). Contudo, como o material varia seu comprimento conforme uma carga é aplicada, esta mudança no comprimento ou na forma pode ser medida, da seguinte forma:

$$\varepsilon_a = \frac{\delta L}{L} \quad (2.5)$$

onde ε_a é a deformação linear média, δL é a variação do comprimento, e o comprimento original sem carga é L .

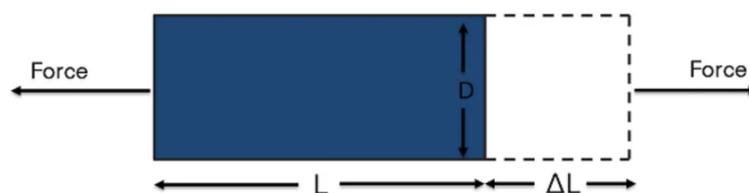


Figura 4 – Deformação normal

A região elástica é a região em que o material não deforma permanentemente quando aplicado carregamentos sobre o mesmo, apresentando uma relação linear entre tensão deformação. Esta relação entre deformação e tensão, é definida pela lei de Hook:

$$\sigma_a = E_m \varepsilon_a$$

onde o fator E_m é chamado módulo de Young ou módulo de elasticidade (Hibbeler, 2010).

2.3.2 Extensometria

Para medir as forças e torques que atuam em uma estrutura, frequentemente se usa uma estrutura mecânica instrumentada com sensores mecânico elétrico chamados extensômetros. Esta é comumente caracterizada pelo uso de *strain gauges* (Figura 5), transdutores que variam sua resistência elétrica conforme sofre deformação. Desta forma, a deformação mecânica pode ser medida, desde que o extensômetro seja calibrado corretamente. Esta ferramenta possui baixo custo financeiro, são pequenos, leves, e possuem boa precisão. Logo, são uma ótima opção para uma variedade de situações (Carlos Neto *et al.*, 2001) (Figliola; Beasley, 2006; Elias *et al.*, 2015)

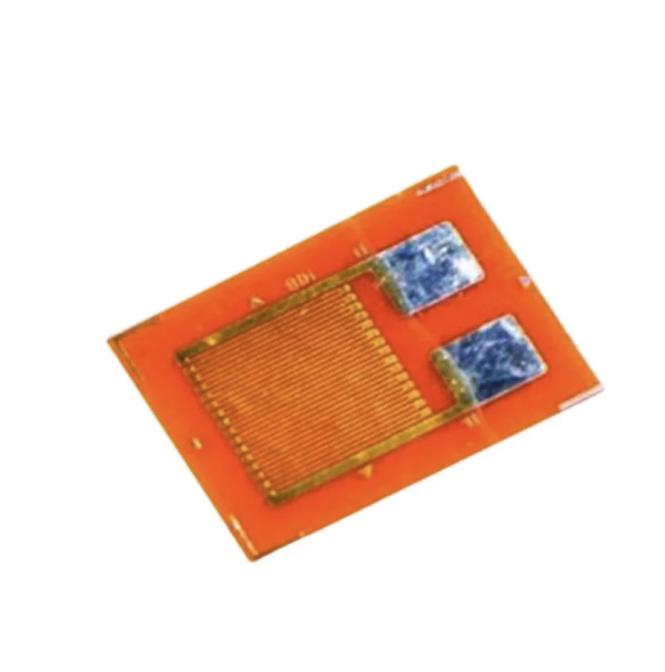


Figura 5 – Strain Gauge

Um aspecto que torna atraente o uso de extensômetro de resistência elétrica diz respeito ao tipo de circuito utilizado. O circuito tipo ponte completa de Wheatstone (Figura 6) que permite detectar pequenas variações da resistência elétrica. Esse tipo de configuração compensa os efeitos da temperatura, já que este é um dos principais obstáculos a ser superado quando se usa *strain gauges* para medir a deformação (Figliola; Beasley, 2006)(Carlos Neto *et al.*, 2001).

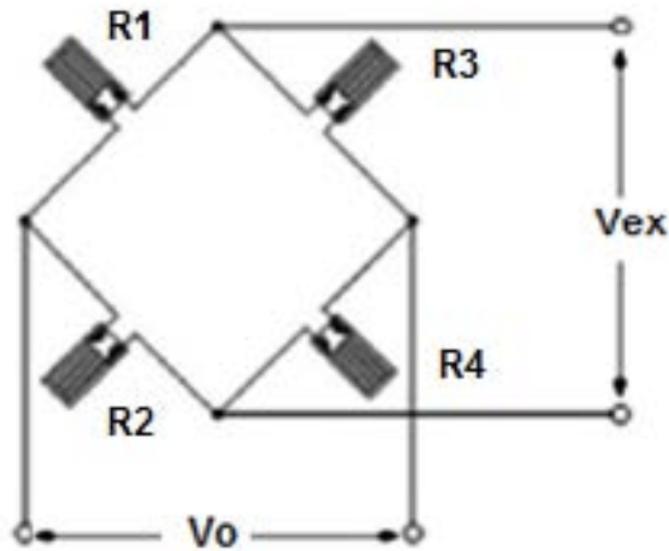


Figura 6 – Ponte de Wheatstone

O posicionamento estratégico de múltiplos sensores pode aumentar a saída na ponte, e cancelar efeitos ambientais indesejados, produzindo um sinal de tensão na saída da ordem de microVolt. Deste modo, microcomputadores podem ser utilizados para processar estes sinais (Figliola; Beasley, 2006).

2.3.2.1 *Strain Gauges*

A técnica de célula de carga com *strain gauge*: são geralmente construídas de metal e tem uma forma tal que a faixa de forças a serem medidas resulta em uma tensão de saída mensurável na faixa de operação desejada. Em geral, células de carga podem ser caracterizadas como células de carga do tipo viga - cisalhamento ou flexão, anéis de prova, ou colunar. Uma célula de carga do tipo viga de flexão é configurada de tal forma que o elemento sensível da célula funciona como uma viga em balanço. Extensômetros são instalados na parte superior e inferior da viga para medir tensão de flexão ou tensões normais (Figliola; Beasley, 2006).

O *strain gauge* é o tipo de sensor, ou transdutor, que converte força mecânica em sinal elétrico. O ponto de equilíbrio dele é afetado por mudanças de temperatura, o que pode introduzir erros de medição. Com isto, a ponte de Wheatstone ajuda a superar este problema e a promover medidas mais precisas (Gharghan; Nordin; Ismail, 2017). Pode-se utilizar de algumas estruturas de ponte. São elas: um quarto de ponte, meia ponte, e ponte completa. A seleção de qual tipo utilizar depende da orientação dos *strain gauges*, e o tipo de deformação que deseja-se medir (Instruments, 2023). Em Gharghan, Nordin e Ismail (2017) e Figliola e Beasley (2006) para uma ponte completa, usa-se quatro *strain gauges*

(R_1, R_2, R_3, R_4), e a voltagem de saída (V_{out}) pode ser determinada por:

$$V_{out} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) V_{in} \quad (2.6)$$

A ponte está em equilíbrio quando $R_1=R_2=R_3=R_4$. As mudanças na temperatura também alteram a resistência dos *strain gauges*, de modo que $R_n = R_n + \Delta R_n$ ($n=1, 2, 3,$ and 4). Logo, a Eq. (2.6) se transforma em:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 0.25 \left(\left(\frac{\Delta R_1}{R_1} \right) - \left(\frac{\Delta R_2}{R_2} \right) + \left(\frac{\Delta R_3}{R_3} \right) - \left(\frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \right) \quad (2.7)$$

onde $\Delta R/R$ é denominado fator *gauge*, o qual representa a sensibilidade das mudanças na resistência do *strain gauge* na deformação aplicada. Pode-se, então, relacionar $\Delta R/R$ com a deformação:

$$\frac{\Delta R}{R} = \kappa \cdot \varepsilon \quad (2.8)$$

onde ε é a deformação, e κ é o fator *gauge* do *strain gauge*. O que leva a Eq. (2.9):

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{\kappa}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (2.9)$$

onde $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3,$ e ε_4 são as deformações associadas à resistência 1, resistência 2, resistência 3, e resistência 4, respectivamente.

2.3.3 Velocidade Angular

Em geral, a velocidade pode ser medida diretamente por meios mecânicos apenas por tempos muito curtos ou por pequenos deslocamentos, devido a limitações nos transdutores. Entretanto, se o deslocamento de um corpo rígido é medido em intervalos de tempo identificáveis, a velocidade pode ser determinada pela derivada do deslocamento em relação ao tempo. Ou então, se a aceleração é medida, a velocidade pode ser obtida da integração do sinal da aceleração (Figliola; Beasley, 2006).

Deste modo, pode-se definir que a velocidade angular é a taxa com que a posição angular está variando no tempo. Ou seja, a relação entre o deslocamento angular e o tempo necessário para fazer esse deslocamento. Como normalmente a velocidade angular está em rad/s, a Eq.(2.10) converte a velocidade angular para rotações por minuto, ou seja:

$$\omega = 60/2\pi * \omega_{rad/s} [rpm] \quad (2.10)$$

2.3.3.1 Giroscópio e Acelerômetro

Em Figliola e Beasley (2006) afirma-se que a medição do deslocamento, velocidade, e aceleração são requeridas para uma variedade de propósitos. Os aspectos fundamentais de aceleração, velocidade e deslocamento podem ser percebidos através de um dispositivo de medição mais simples chamado transdutor sísmico (Figura 7). Este consiste nada mais do que em um conjunto massa mola amortecedor. Se projetado de forma correta, a saída será uma indicação direta do deslocamento ou da aceleração. Dito isto, o acelerômetro é um transdutor sísmico projetado de tal forma que o sinal de saída possa ser interpretado em termos de deslocamento de entrada ou da aceleração de entrada. Estas medições podem ser derivadas para fornecer a velocidade, se for interpretada como deslocamento, ou integradas, se interpretada como aceleração.

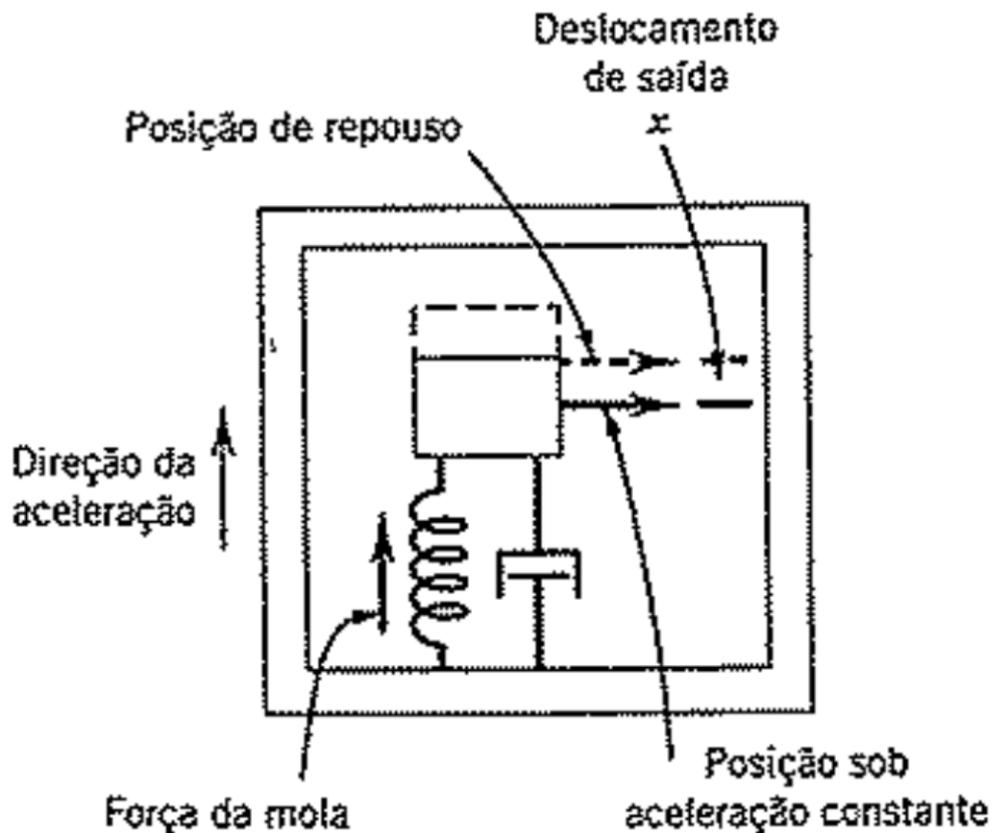


Figura 7 – Transdutor Sísmico

O giroscópio consiste em um dispositivo capaz de mensurar e parametrizar rotações. Quanto ao acelerômetro, trata-se de ser um sensor capaz de detectar e mensurar aceleração, podendo ser a aceleração gravitacional ou qualquer outra aceleração resultante (Vieira; Gonçalves, 2015).

Existem diferentes tipos de giroscópios em relação a estrutura interna, mas todos

funcionam de acordo com o princípio da força de Coriolis (Figura8). Todos possuem uma massa em um substrato, e quando este é submetido à rotação, ele percebe o efeito da força de Coriolis, a qual atua perpendicularmente ao eixo da rotação e à direção na qual o substrato em movimento se encontra. Sabendo a velocidade linear e a força de Coriolis, é possível determinar a velocidade angular(Fedorov *et al.*, 2015).

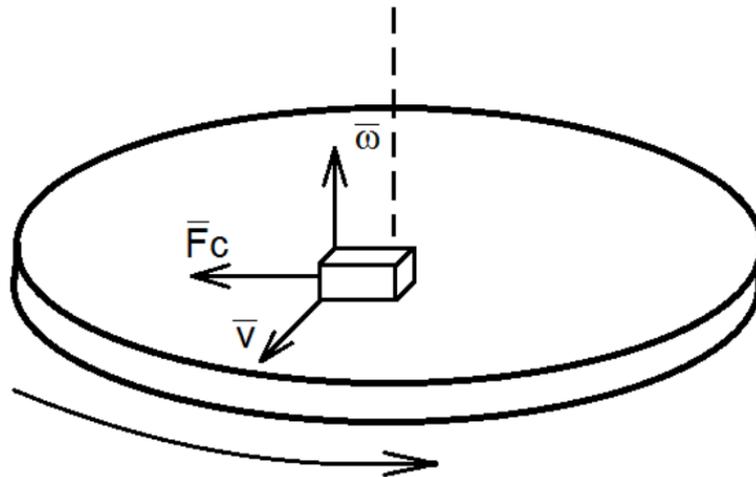


Figura 8 – Força de Coriolis

2.4 Medidores de Potência comerciais

Segundo Elias *et al.* (2015) atualmente existem diferentes técnicas de medição de potência. As suas principais diferenças estão no conjunto de sensores, tecnologia, e ainda, nas posições onde os sensores são instalados na bicicleta. Entretanto, todos têm o mesmo objetivo que é apresentar um resultado cada vez mais preciso e confiável da potência aeróbica despendida pelo atleta.

Em Gharghan, Nordin e Ismail (2017), o medidor de potência da *Schoberer Rad Messtechnik* (SRM©) é o dispositivo mais comum disponível no mercado. Ele mede o torque entre os pedivelas direito e esquerdo usando *strain gauges*, e depois o multiplica pela cadência, a qual é medida por um sensor magnético (*reed switch*). Existem diversos outros produtos usados pelos ciclistas para o mesmo propósito. Contudo, o preço de venda destes produtos no Brasil ainda é muito elevado, dificultando o acesso dos ciclistas à tecnologia, conforme a Tabela 1. E ainda, algumas marcas, como por exemplo *SRM*, *Power Tap* e *Stages*, não atuam no mercado brasileiro.

Tabela 1 – Medidores de potência comercial

Marca	Posição de instalação	R\$
SRM	Pedivela	6.339,90
Power Tap	Cubo traseiro	2.121,16
U2e	Pedivela	2.700,00
Cyclotronics	Rolo de treino	7200,00
Garmin	Pedal	9.849,00

3 Materiais e Método

3.1 Requisitos de projeto

Com o panorama da falta de medidores de potência no mercado nacional e a sua importância no treinamento de ciclismo, construiu-se um protótipo que pode solucionar este problema. Criou-se um medidor de potência de baixo custo para instalar no pedivela esquerdo da bicicleta. Os materiais usados foram o sensor MPU6050 (InvenSense, 2012), *strain gauge* modelo BF350 de 350 ohm, microprocessador Arduino Nano (ARDUINO®, 2023), amplificador de sinal HX711 (AVIA SEMICONDUTOR, 2023), módulo *bluetooth* HC-05 (IteadStudios, 2010), e bateria de 9V comum com o intuito de fornecer energia e portabilidade ao aparelho. O protótipo possui as dimensões necessárias para não atrapalhar o movimento da pedalada.

3.2 Seleção dos equipamentos

3.2.1 Microcontrolador Arduino NANO

Em Vieira e Gonçalves (2015) define-se que os microcontroladores são dispositivos inteligentes que consistem em um circuito processador contendo entradas, saídas e uma memória. O que diferencia os tipos são as características como a memória, área de aplicação, velocidade de operação, alimentação, e sua arquitetura.

Escolheu-se a plataforma Arduino, pois é ela é uma plataforma de prototipagem eletrônica *open-source* de amplo uso, e que se baseia em *hardwares* e *softwares* flexíveis de fácil utilização. É baseada no microcontrolador Atmel Atmega, e usada em aplicações de automação, *smart grids*, controle de casa inteligente, monitoramento de saúde, monitoramento de desempenho esportiva, entre outros (Gharghan; Nordin; Ismail, 2017).

O Arduino Nano, ilustrado na Figura 9, possui um 8-bit 16MHz Atmega 328p microcontrolador embutido (ARDUINO®, 2023) e foi escolhido devido à suas características tanto de processamento quanto de dimensão física. Ele possui 32 KB de memória *flash*, 2KB de SRAM, 1KB de EEPROM, 8 canais de 10-bit *analog to digital converter* (ADC), 20 canais digitais de entrada e saída, conexão USB, interface SPI, comunicação serial com protocolo *integrated circuit* (I2C), e necessita de uma bateria de 5V para funcionar (Gharghan; Nordin; Ismail, 2017). Suas dimensões físicas são uma placa retangular de 18mm por 45mm, e pesa apenas 7 gramas (ARDUINO®, 2023). No barramento a placa possui uma linha bidirecional de comunicação que transfere os dados chamada SDL, e também, a SDA, que é responsável pela temporização entre os dispositivos (I2CBUS, 2023).

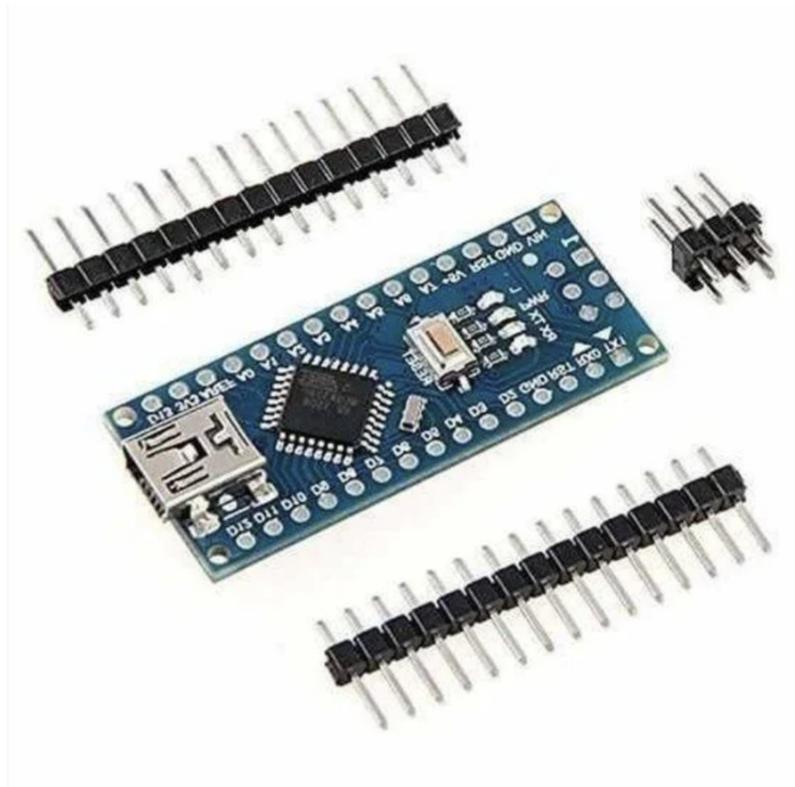


Figura 9 – Arduino Nano

A programação do Arduino Nano foi feita por meio do *software* Arduino IDE versão 2.2.1 disponibilizado pela própria plataforma. A linguagem utilizada é similar a C++, com uma estrutura de funções, variáveis, e *structs*, e possui diversas bibliotecas disponíveis para serem usadas (Arduino®, 2023). O código utilizado está no anexo A.

Programou-se o Arduino Nano para:

- 1) Receber os dados de deformação lidos pelos *strain gauges*, e transforma-los em leituras torque através da curva de calibração;
- 2) Receber os dados de velocidade angular do MPU6050;
- 3) Transmitir por meio do módulo *bluetooth* HC-05 os valores de potência.

3.2.2 Sensores Inerciais

Sistemas micro eletromecânicos (MEMS) são uma alternativa de baixo custo, mais leve, rápida, e normalmente mais preciso do que sua contrapartida macroscópica. Em um único circuito integrado encontram-se estruturas mecânicas formando transdutores mecânicos, e estruturas microeletrônicas, que fornece sinais elétricos analógicos equivalentes às forças submetidas no sensor (Vieira; Gonçalves, 2015)(Singh; Ambedkar, 2020).

Um exemplo típico é o conjunto acelerômetro/giroscópio, que está presente em celulares, *tablets*, etc. São usados para medir aceleração linear e velocidade angular. Desta forma, a combinação deles permite determinar o movimento de um corpo nas três dimensões (Fedorov *et al.*, 2015).

3.2.2.1 MPU6050

Segundo (Fedorov *et al.*, 2015), o MPU6050 (Figura 10) é um MEMS que inclui um giroscópio e um acelerômetro, permitindo medir a aceleração linear e a velocidade angular do corpo. O dispositivo combina um giroscópio de 3 eixos e um acelerômetro de 3 eixos no mesmo circuito integrado, um conversor analógico digital (ADC) de 16 bits, e um processador *Motio Fusion* de 6 eixos. A alimentação pode variar de 3 a 5 V, e um barramento de comunicação I2C, é possível comunicar o sensor com outros tipos de processadores. O giroscópio tem a capacidade de mensurar variações independentes nos três eixos de até 2000° por segundo, possuindo quatro faixas de precisão: $\pm 250^\circ/s$, $\pm 500^\circ/s$, $\pm 1000^\circ/s$, $\pm 2000^\circ/s$. Já o acelerômetro consegue mensurar acelerações independentes nos três eixos de até 16g, e possui quatro faixas de precisão: $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 6g$, $\pm 16g$. Tal que “g” é o valor da aceleração gravitacional (InvenSense, 2012) (Vieira; Gonçalves, 2015).

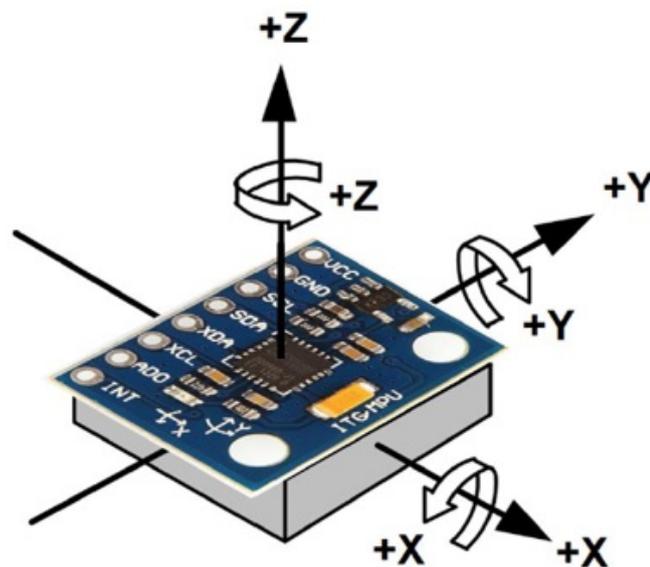


Figura 10 – MPU6050

Deste modo, pode-se usar o MPU6050 para determinar a velocidade angular com o qual o pedivela gira.

3.2.3 *Strain Gauges* e amplificador de sinal HX711

Foram utilizados 4 extensômetros de 350 ohm (Figura 5) em formação de ponte completa (Figura 6) para medir a deformação longitudinal do pedivela. Deste modo, foram eliminados os efeitos da temperatura na medida. Os dados do extensômetro estão na Tabela 2 .

Tabela 2 – Especificações *Strain Gauge* BF350

Modelo	BF350
Resistência	350 ohm
Tolerância de resistência (média)	0.1%
Fator de Sensibilidade	2 - 2.20
Sensibilidade do coeficiente de dispersão	1%
Limite de deformação	2%
Coeficiente de compensação de temperatura	9/11/16/23/27
Temperatura de operação	-30 °C - 80 °C
Dimensões	4.4 X 7.4 mm
Peso	1g

<https://www.eletrogate.com/sensor-extensometro-transdutor-strain-gauge-bf350>

Em Vieira e Gonçalves (2015), mesmo o *strain gauge* possuindo um sinal de tensão elétrica na saída, existe a necessidade de amplificação do mesmo, pois são sinais de baixa amplitude, da ordem de microvolt (μV).

Selecionou-se o amplificador de sinais HX711 (Figura 11), que, segundo AVIA SEMICONDUTOR (2023) é um conversor analógico digital (ADC) de 24 bits de precisão feito para ter interface direta com sensores em ponte. Possui dois canais programáveis: canal A, que pode ser programado com ganho de 128 ou 64, e canal B, com ganho fixo de 32. O chip funciona com alimentação de 2.7 - 5.5 V, e possui um regulador de tensão o que dispensa o uso de reguladores externos. Todos os controles necessários para o HX711 são feitos por meio dos pinos disponíveis. A sua temperatura de operação varia de -40 °C até 85 °C.

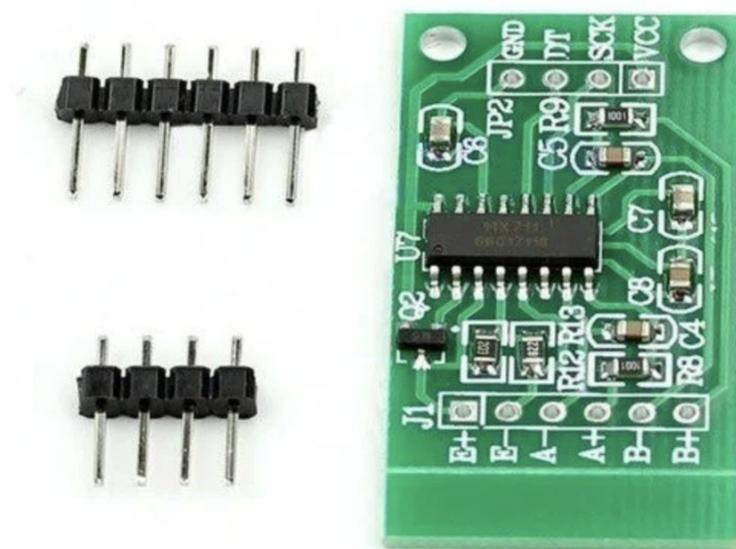


Figura 11 – HX-711

3.2.4 Módulo *Bluetooth* HC-05

O módulo HC-05 (Figura 12) é uma forma fácil de usar o *bluetooth* SPP (*Serial Port Protocol*), V2.0+EDR (*Enhance Data Rate*) 3Mbps com 2.4GHz *radio transceiver and baseband*. E tem as dimensões de 12,7 x 27 mm, com alcance de 10 metros e modulação GFSK (IteadStudios, 2010).

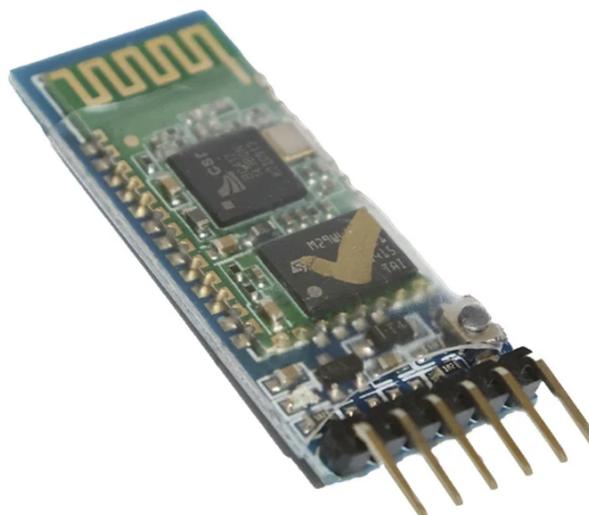


Figura 12 – HC-05

De acordo com Vieira e Gonçalves (2015), visto que o módulo possui modos tanto escravo como mestre, ou seja, de enviar ou receber dados, e tem uma alimentação de 3,3 a 5V de baixo consumo, o dispositivo é uma forma fácil e eficiente de comunicação com o microcontrolador Arduino.

De acordo com IteadStudios (2010), o pino Rx suporta até 3,3V em sua conexão, e como, segundo ARDUINO® (2023) os pinos de saída digital funcionam em uma voltagem de 5V, é necessário utilizar um conversor de nível lógico, ou um divisor de tensão.

Como o medidor de potência deve ser um dispositivo acoplado à bicicleta, foi necessário elaborar uma forma de transmitir os dados recolhidos pelos sensores para o computador. A solução foi através do módulo *Bluetooth* HC-05.

3.3 Desenvolvimento do protótipo

3.3.1 Visão geral

A Figura 13 apresenta um esquemático do funcionamento do equipamento (Figura 14).

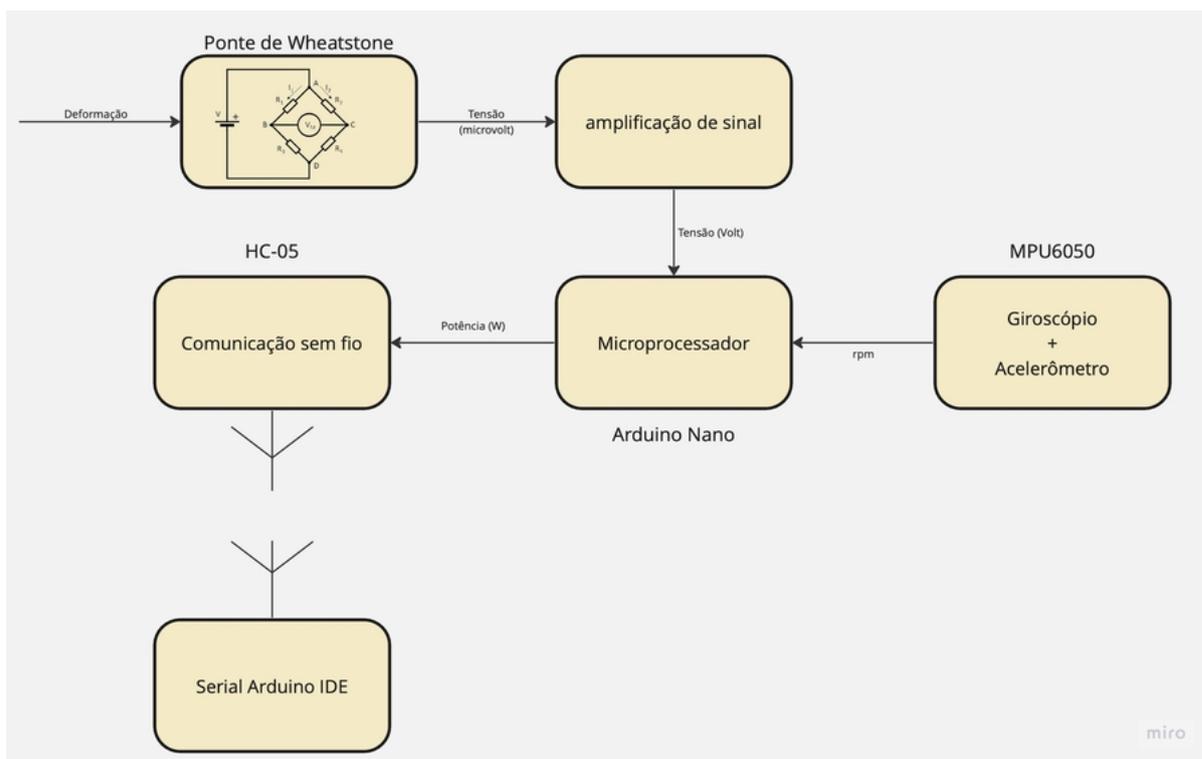


Figura 13 – Esquema de funcionamento do protótipo

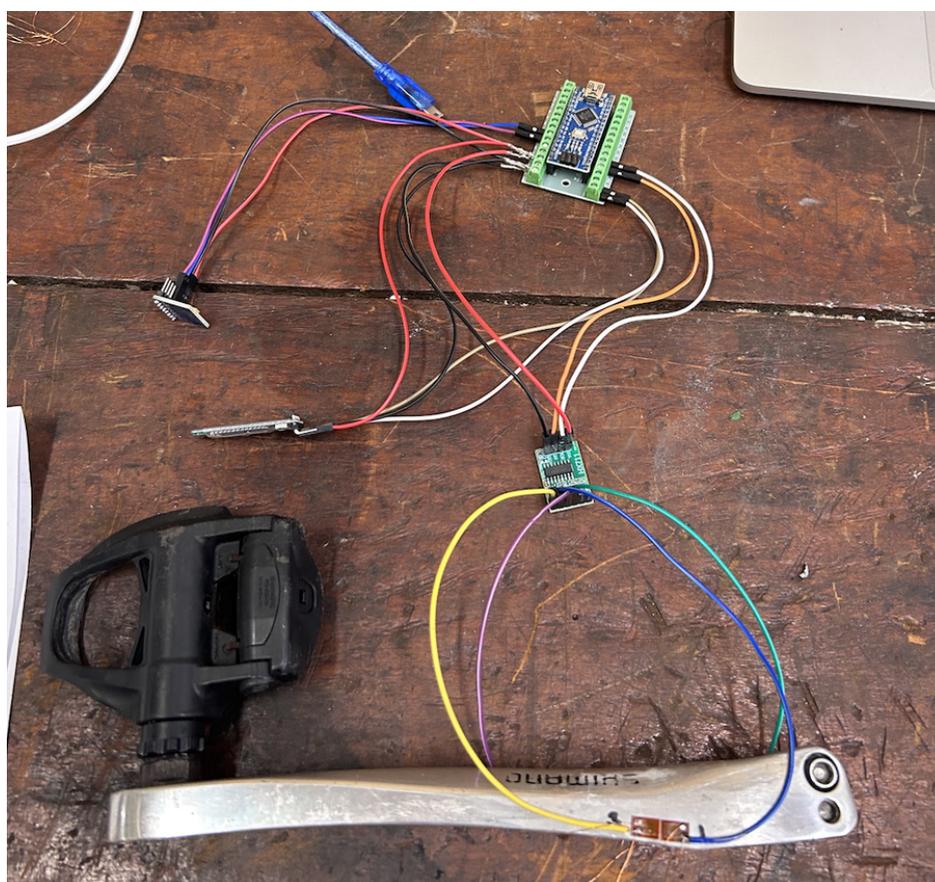


Figura 14 – Protótipo completo

3.3.2 Extensometria

O uso de *strain gauges* é interessante para o ciclismo devido a sua pouca adição de massa ao conjunto. Contudo, posicioná-lo na região de maior deformação do pedivela é fundamental (Gharghan; Nordin; Ismail, 2017).

3.3.2.1 Análise da malha - Simulação 2D

Um pedivela comercial (SRAM®, 2023) foi modelado com a ferramenta SolidWorks™, sendo analisadas as características estáticas 2D (1000N) dos braços do pedivela pelo método dos elementos finitos. Analisaram-se diferentes malhas (das mais grosseiras até as mais refinadas - Figura 15) para ver se a tensão máxima converge no programa. Dado que as tensões máximas convergiram para o mesmo valor de $1,356e8$ (Figura 16), a simulação foi validada. Assim, foi possível determinar o melhor local de colagem dos extensômetros de acordo com a maior deformação da peça. Em Elias *et al.* (2015), diz-se que o ponto máximo de deformação se encontra em aproximadamente um quarto do comprimento do eixo do cubo do pedivela, e o estudo da deformação feito concorda com esta informação (Figura 17).

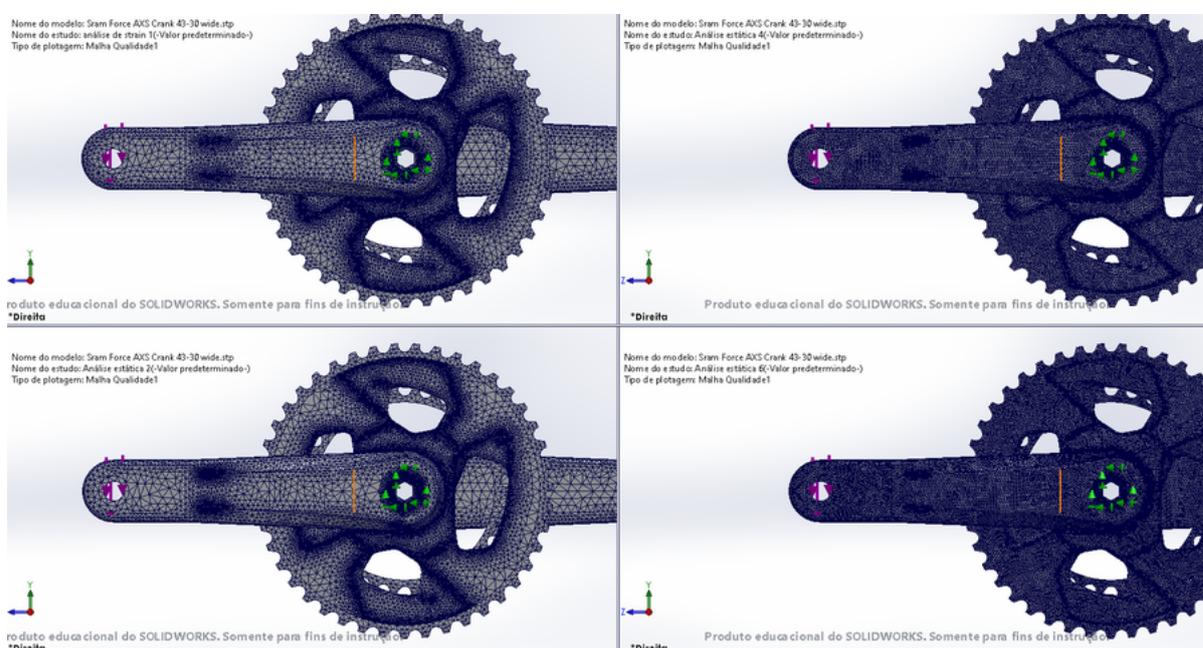


Figura 15 – Análise de malha

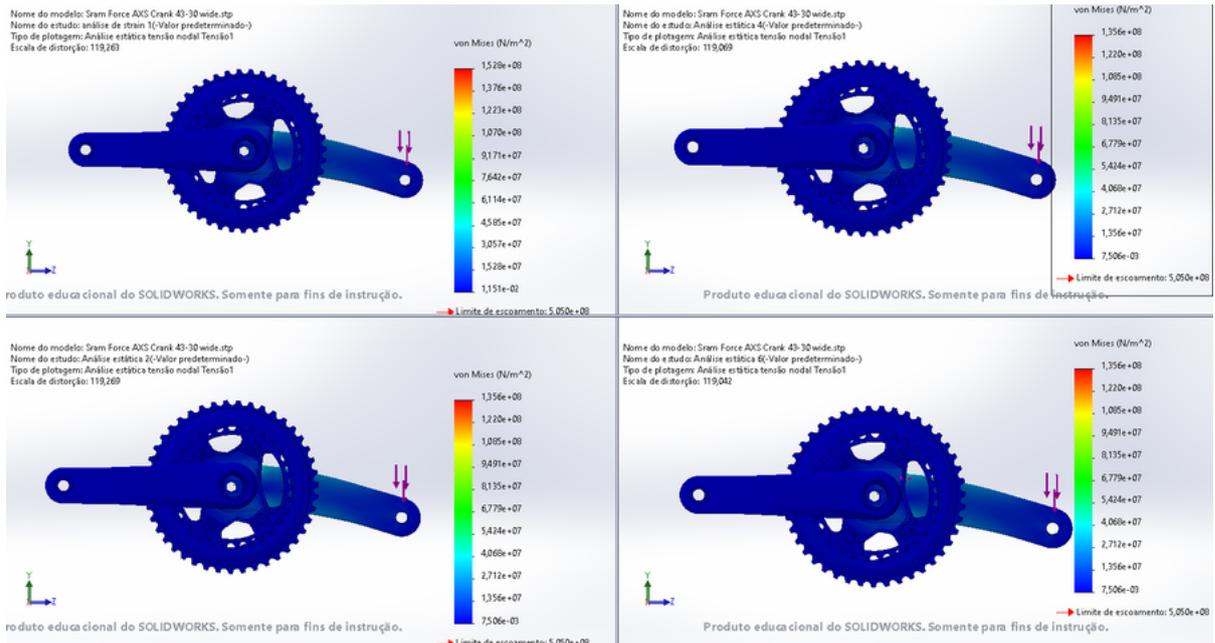


Figura 16 – Simulação das tensões atuantes

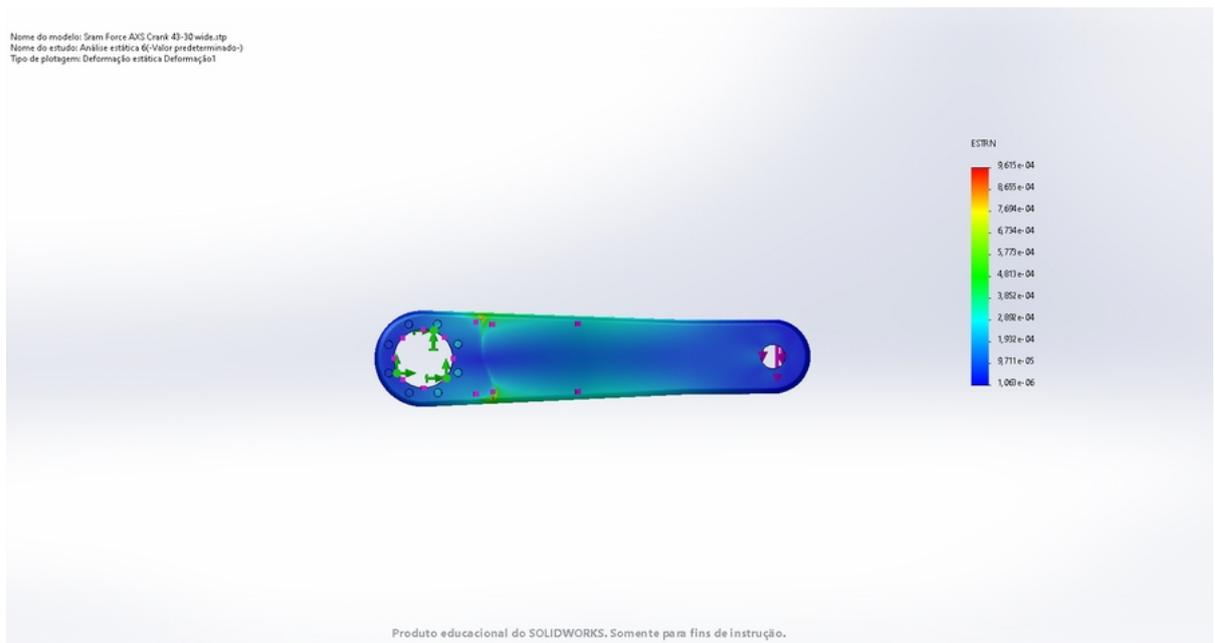


Figura 17 – Simulação da deformação no pedivela

3.3.2.2 Colagem dos *strain gauges*

Realizou-se a medição de força através dos *strain gauges* de $350 \pm 1\%$ ohm, em configuração de ponte de Wheatstone completa, visto que pode-se compensar os efeitos da temperatura desta forma, bem como melhorar a leitura dos dados. Dois extensômetros colocados na parte onde a tração é atuante, e os outros dois na região onde os efeitos de compressão atuam.

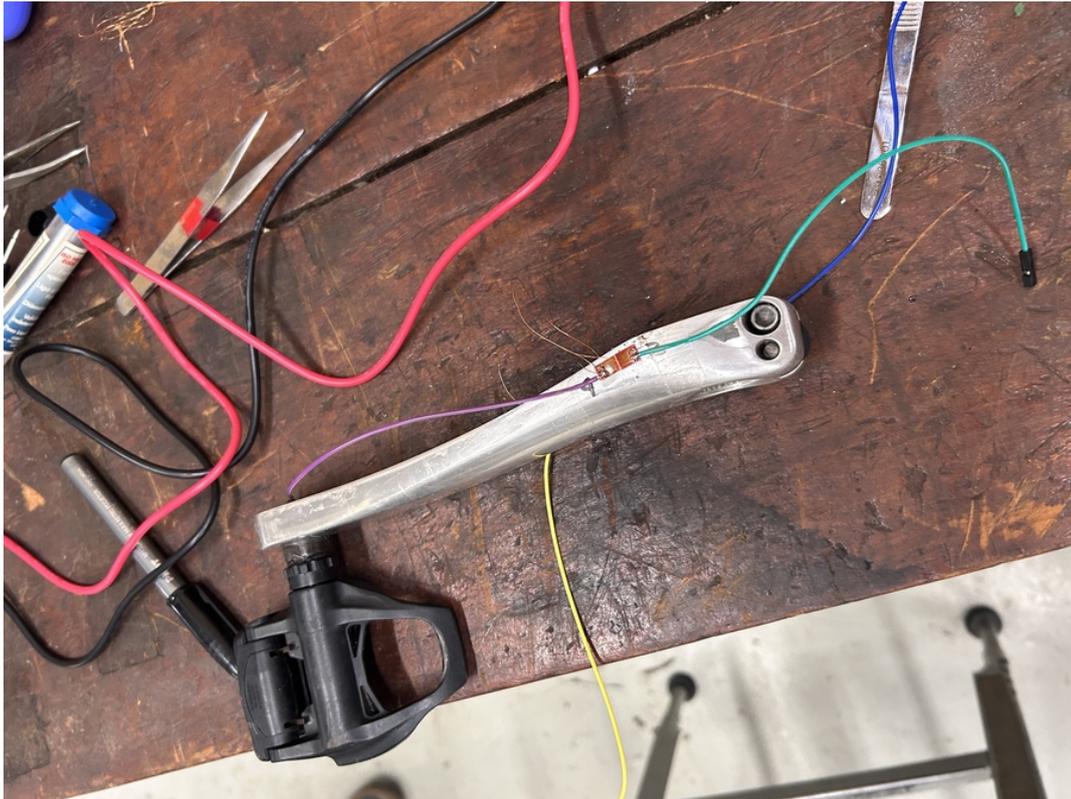


Figura 18 – Extensômetros no pedivela

Para a fixação dos extensômetros seguiu-se o seguinte processo: lixou-se, em seqüência, a superfície do pedivela com lixas de gramaturas 80, 180, 240, 800, 1000. Depois limpou-se a região com álcool isopropílico e pano, verificando se o pano saiu com impureza após cada passagem para garantir a não presença de impurezas, que poderiam influenciar na correta fixação do *strain gauge*. Em seguida, com a utilização de uma pinça manuseou-se o transdutor com cuidado e o colocou numa fita adesiva do tipo durex. Então, colou-se, na localização estimada de maior deformação do pedivela, a fita durex com o *strain gauge*. Uma vez o *strain gauge* no local correto, fixou-o com o uso da cola adesiva instantânea 793 da empresa *TEK BOND Saint-Gobain*, e depois deixou-o curar por cerca de 10 minutos. O processo de lixar e limpar o corpo de prova foi feito duas vezes, e o de colagem do *strain gauge*, quatro vezes.

Com os quatro extensômetros fixados longitudinalmente ao pedivela, realizou-se a soldagem dos fios aos terminais do extensômetro, seguindo a montagem determinada pela ponte de Wheatstone. Deste modo, os extensômetros na parte superior, sujeitos à tração, são numerados como 1 e 3, e os da parte inferior, sujeitos à compressão, 2 e 4. Para a soldagem usou-se material de solda 63% de estanho e o ferro de soldar *Hikari*. Depois da soldagem, verificou-se com um multímetro se as resistências e voltagens corretas estavam sendo lidas, ou seja, se a ponte estava calibrada. Uma vez todos funcionando, soldaram-se os fios nos terminais que seriam ligados ao amplificador HX711. Fez-se nova verificação. A Figura 18 mostra a vista superior do resultado das operações descritas.

3.3.3 Desenvolvimento do circuito

A deformação sofrida pelo pedivela gera pequenas deformações nos extensômetros, e conseqüentemente na sua resistência. A alteração da resistência e o esquema de ligação como ponte de Wheatstone gera uma tensão da ordem de *microvolt*. Então, para esta tensão ser lida pelo microprocessado é necessário um estágio de amplificação. Esta necessidade é suprida pelo HX711, que provê um ganho de 128 ou 64 no canal A, ou 32 no canal B. Apesar de um ganho de 64 ser suficiente para ler, o HX711 tem como ganho *default* 128. Desta forma, preferiu-se não mexer nas configurações de fábrica.

Dado o esquemático da Figura 19 , tem-se as seguintes ligações:

- A comunicação com o módulo *bluetooth* HC-05 é feito pelas portas D9 e D10. A ligação com Rx teve sua tensão diminuída para 3,3V por um divisor de tensão usando duas resistências(R1 = 1kohm e R2 = 2 kohm);
- A comunicação com o amplificador de sinal HX711 pelas portas D6 e D7;
- A comunicação com o MPU6050 pelas portas A4 e A5;
- A alimentação de 5V e o GND (ground) responsáveis por alimentar os equipamentos;
- Bateria 9V que alimenta o Arduino Nano.

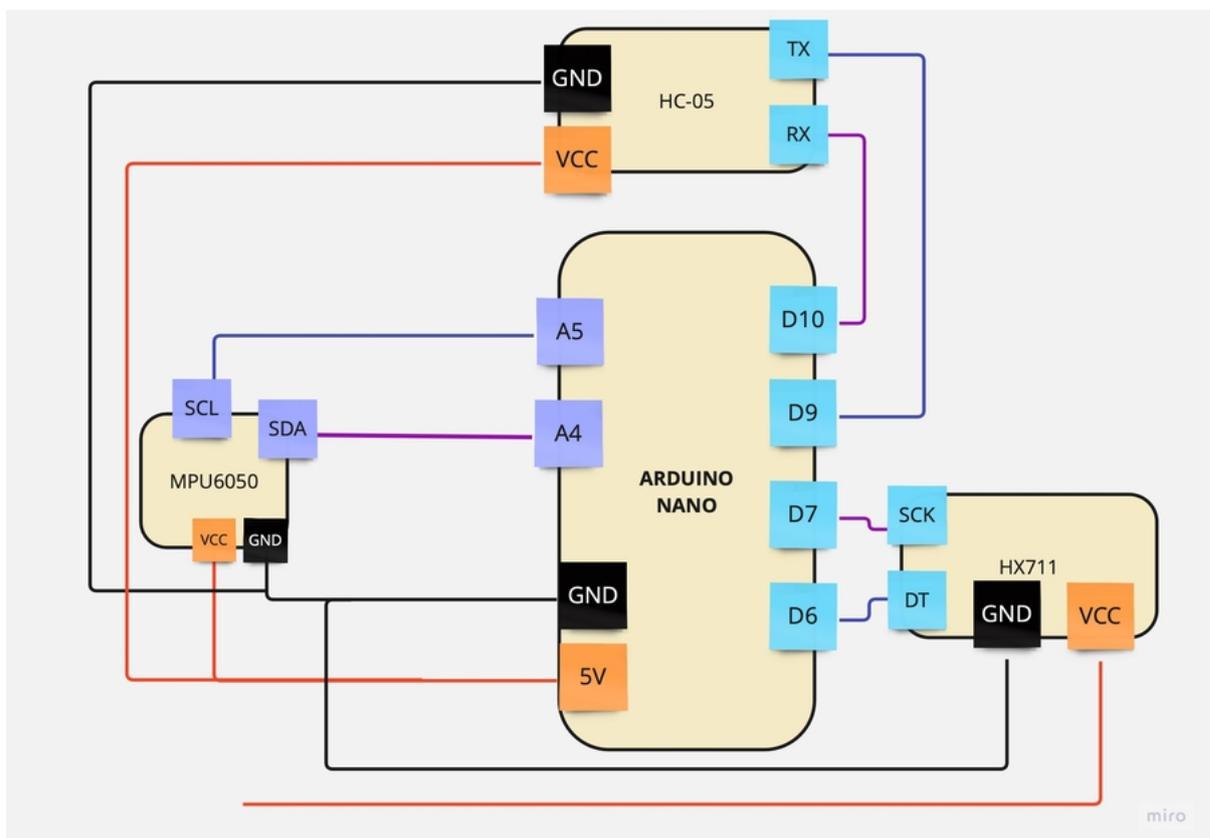


Figura 19 – Esquemático das ligações dos equipamentos

3.3.4 Análise dos dados

Após a aquisição dos dados na parte inicial do funcionamento, referentes ao torque aplicado e a velocidade angular do movimento, os mesmos são tratados pelo microcontrolador, onde passam pela modelagem matemática, capaz de parametrizar a força aplicada em potência desenvolvida pelo ciclista. Após essa etapa, esses dados são transmitidos pelo módulo *bluetooth* ao terminal serial do Arduino IDE.

O protótipo imprime os dados a cada três segundos. Dentro destes três segundos são feitas 10 leituras a cada 300 milissegundos, e então calculada a média para ser transmitida ao visor.

3.3.5 Posicionamento do pedivela

O protótipo foi colocado no pedivela de forma que o ciclista não seja atrapalhado no movimento da pedalada (Ver Figura 20). Com a finalidade de tentar diminuir o ruído no sinal, foi importante atentar-se ao fato de que o fio de ligação entre o extensômetro, HX711, e o arduino não fosse longo, assim como a tentativa de aterramento do próprio pedivela, o qual funciona como uma antena.

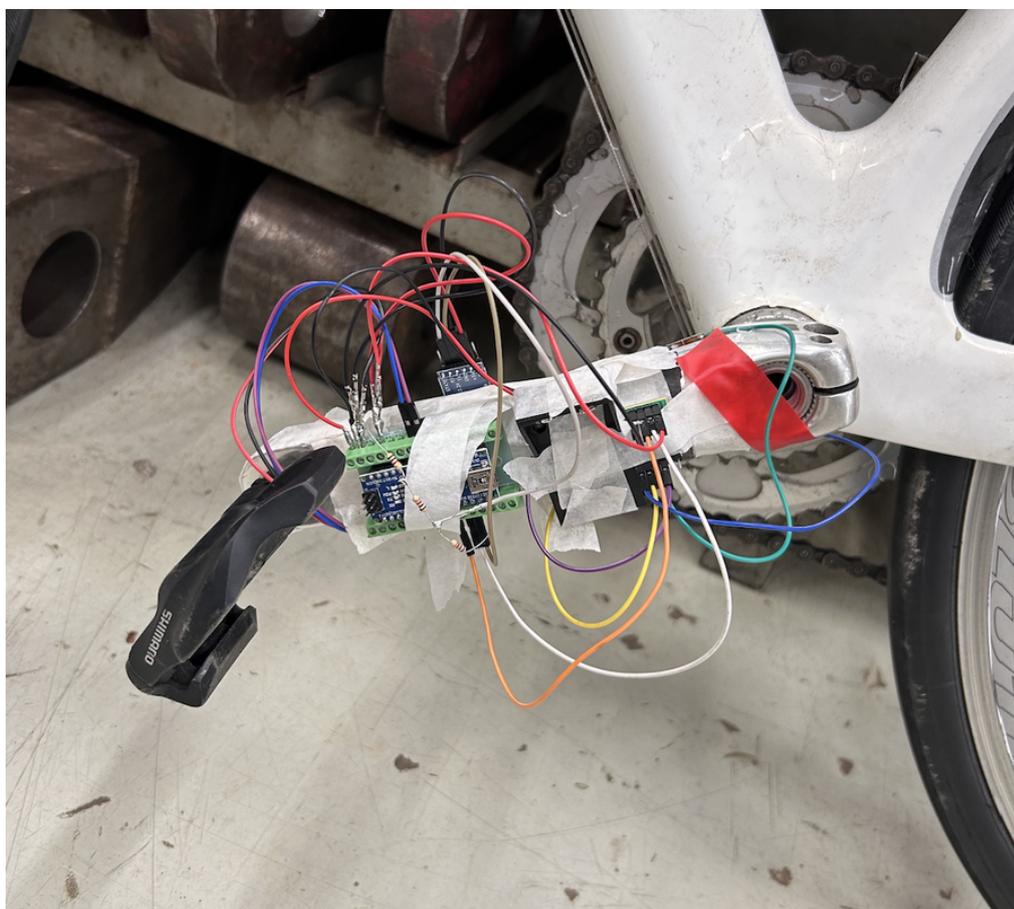


Figura 20 – Pedivela instrumentado

3.3.5.1 Modelo de pedivela

O modelo de pedivela usado foi o Shimano® 105 de 170mm de comprimento nominal e cor prateada.

3.4 Calibração

O processo de calibração é necessário para relacionar a voltagem de saída do *strain gauge* quando aplicada uma força no pedivela.

O processo de calibração foi feito por meio de pesos conhecidos. Primeiro travou-se o pedivela de 170cm, e em seguida pendurou-se pesos conhecidos enquanto executou-se a leitura dos mesmos. Foram feitas 10 medidas para 5 pesos diferentes. Foram usados pesos de 10,20,30,40, e 50N. A Tabela 3 mostra a média das leituras. Após feita a média das leituras para cada um dos pesos conhecidos, multiplicou-se cada peso pelo tamanho do pedivela (170mm), para assim obter o torque aplicado. Logo, foi possível determinar a relação entre torque aplicado e a saída do *strain gauge*, conforme mostra a Figura 21.

Tabela 3 – Calibração *strain gauge*

Peso [N]	TORQUE [N.m]	MÉDIA DAS LEITURAS [miliVolt]
10	1,70	2182,42
20	3,40	3269,12
30	5,10	4320,61
40	6,80	5302,64
50	8,50	6194,20

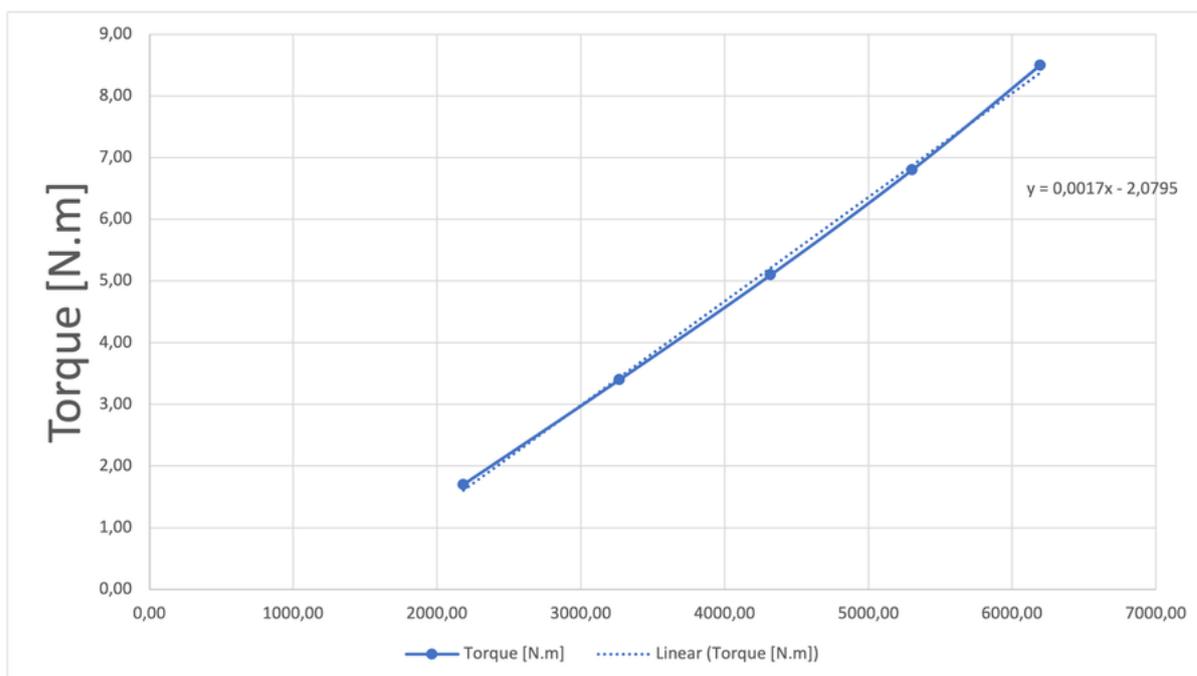


Figura 21 – Curva de calibração

Da aproximação linear dos resultados foi possível encontrar a Eq. (3.1) que foi usada no algoritmo para obter diretamente a leitura do torque, ou seja:

$$y = 0.0017 \times x - 2.0795 \quad (3.1)$$

onde y é o torque [N.m] e x a saída do *strain gauge*.

3.5 Comparação com modelo comercial

Conforme indicado nos requisitos do projeto (1.2.1), um dos objetivos é a validação do protótipo por meio da comparação com um medidor de potência comercial (Figura 22). Escolheu-se um modelo rolo de treino *smart*, visto que o ensaio poderia ser feito em ambiente controlado. Este tipo de equipamento consegue se comunicar com softwares que podem fazer o controle da potência exercida. Facilitando assim os testes e a comparação.



Figura 22 – Montagem: protótipo e rolo de treino

3.5.1 Medidor de potência comercial

Usou-se o rolo de treino *smart* Cyclotronics® que possui comunicação ANT+ FE-C e *Bluetooth* LE; *Dongle* ANT+ USB incluso. Além disso, como o rolo é calibrado na fábrica utilizando um dinamômetro com motorização elétrica, possui erro de $\pm 1\%$.

3.5.2 Software

Usou-se o aplicativo de treino Zwift® para conectar com o rolo de treino *smart*. Este consegue programar os valores de potência que o ciclista fará. Ele também, ao final do treino, fornece um gráfico, e valores de potência máxima e média. Deste modo, foi interessante usá-lo para fins de comparação entre o protótipo desenvolvido e o medidor de potência comercial em um ambiente totalmente controlado.

3.5.3 Método de comparação

Foram feitos dois testes. O primeiro com valores crescentes de potência despendida por 35 segundos cada. E o segundo programa com o ciclista podendo pedalar livremente.

Com o rolo de treino conectado ao *software*, e o protótipo ligado e enviando os valores para o computador iniciaram-se os testes.

Após a coleta dos dados, fez-se a análise estatística e gráfica conforme será discutido na seção 4.

4 Resultados e Discussão

4.1 Resultados

4.1.1 Teste de funcionamento 1

O teste foi caracterizado pelo aumento do valor da potência para valores constantes em intervalos de 35 segundos. Executou-se o mesmo teste duas vezes com a finalidade de confirmar os resultados. O gráfico da Figura 23 mostra a comparação entre o teste1, teste2, e o valor de referência.

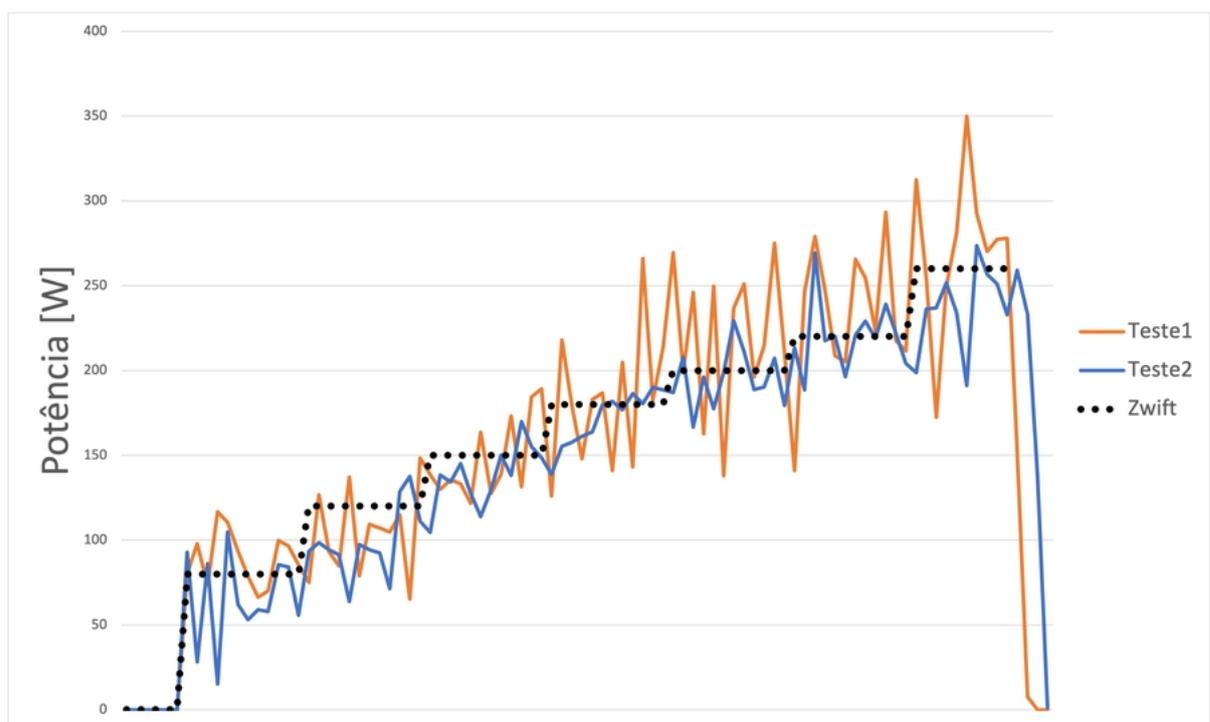


Figura 23 – Comparação dos resultados do teste1

Tratou-se estatisticamente os dois testes, com o intuito de saber a média, o desvio padrão, e o erro médio para cada um dos valores de referência:

Tabela 4 – Teste1: análise estatística

Referência [W]	Média [W]	Desvio Padrão [W]	Erro(%)
80	89,35	19,47	11,7
120	99,72	25,51	16,9
150	134,14	28,54	10,6
180	171,93	47,19	4,5
200	109,75	39,90	4,9
220	226,33	40,36	2,9
260	256,43	137,24	1,4

Tabela 5 – Teste2: análise estatística

Referência [W]	Média [W]	Desvio Padrão [W]	Erro(%)
80	77,08	19,68	3,6
120	102,74	24,61	14,4
150	142,91	15,53	4,7
180	177,55	11,50	1,4
200	196,23	18,29	1,9
220	220,50	21,63	0,2
260	241,43	21,33	7,1

Além da análise estatística, o *software* nos fornece o valor máximo de potência percebida por ele, e também a potência média do treino.

Tabela 6 – Teste1: comparação dos valores médio e máximo

	Software	Protótipo	Erro(%)
Média [W]	146	173,96	19
Máximo [W]	298	350,03	17

Tabela 7 – Teste2: comparação dos valores médio e máximo

	Software	Protótipo	Erro(%)
Média [W]	146	139,45	4
Máximo [W]	298	273,6	8

4.1.2 Teste de funcionamento 2

O teste foi caracterizado pela aleatoriedade. Desta forma, pedalou-se durante 8 minutos de forma a executar valores de potência aleatórios. O *software*, ao final do percurso, mostra um gráfico (Figura 24) que pode ser usado para comparar com o gráfico gerado pelos dados do protótipo (Figura 25), além dos valores de potência médio e máximo. O teste foi executado apenas uma vez.

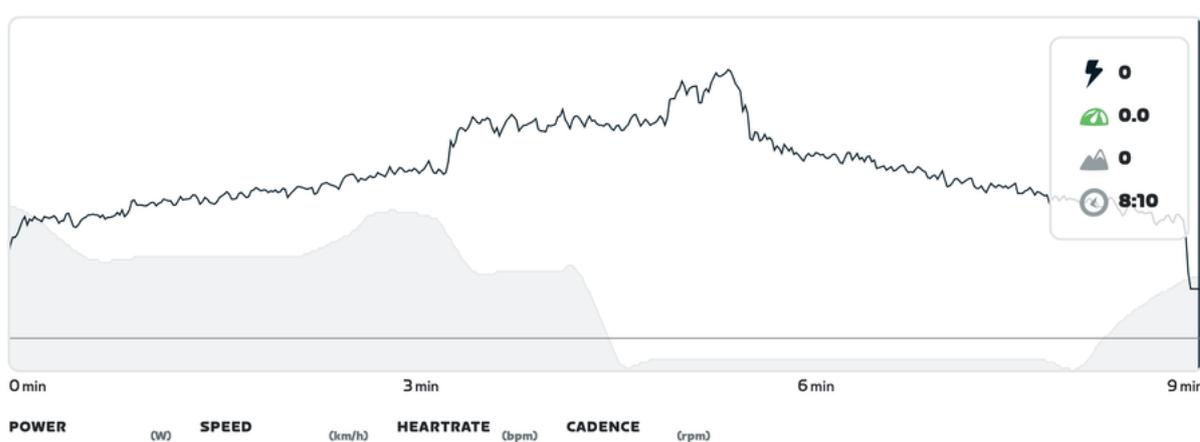


Figura 24 – Teste2: Gráfico do software

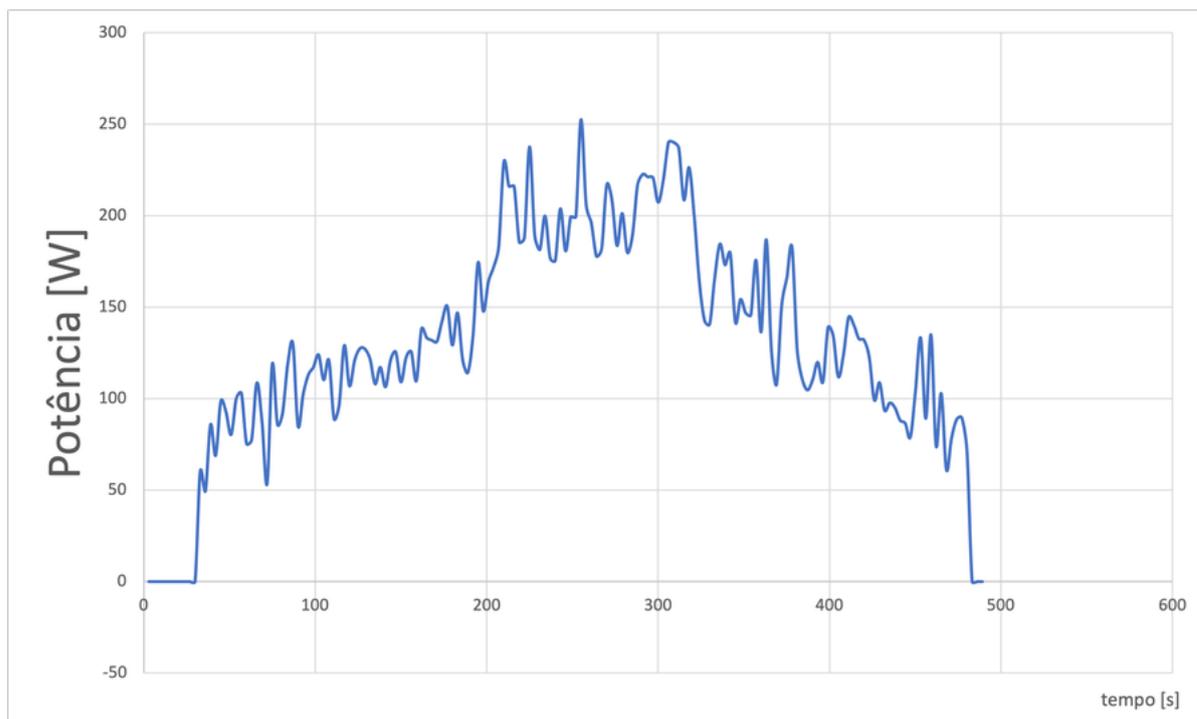


Figura 25 – Teste2: Gráfico do protótipo

Tabela 8 – Comparação dos valores médio e máximo

	Software	Protótipo	Erro(%)
Média [W]	141	129,87	8
Máximo [W]	264	252,41	4

4.1.3 Análise de custo

A Tabela 9 mostra a análise de custos da construção do protótipo:

Tabela 9 – Análise de custos

Item	Função	Quantidade	Custo - R\$
Strain Gauge BF300	Extensômetro	4	19,60
HX711	Amplificador de sinal	1	14,90
MPU6050	Acelerômetro e Giroscópio	1	22,90
Arduino Nano	Microprocessador	1	48,90
HC-05	Módulo Bluetooth	1	46,90
Suporte para Bateria	Suporte da alimentação do circuito	1	6,90
Jumpers	Conexão	12	4,14
Resistências 1k	Divisor de tensão	3	0,36
TOTAL			164,60

4.2 Discussão

Pelo gráfico da Figura 23 pode-se observar que o comportamento do protótipo segue o estipulado pela referência controlada pelo conjunto software e rolo de treino. Quanto ao gráfico da Figura 25, o protótipo também segue a mesma tendência da referência, confirmando o funcionamento do mesmo.

Ao analisar as tabelas de análise estatísticas (Tabela 4, e Tabela 5), percebe-se que as médias se aproximaram das referências, visto que o valor máximo do erro foi de 16,9%, o que é um valor aceitável neste primeiro momento. Pelos valores do desvio padrão das amostras, percebe-se a grande variação da amplitude dos sinais, mesmo que em média, o valor se aproxime da referência. Isto pode ser explicado pelos ruídos eletromagnéticos. A calibração dos *strain gauges* não é suficiente para diminuir os efeitos dos ruídos na leitura. A variação da amplitude dos sinais também pode ser influência do movimento do ciclista, pois seu valor máximo ($\pm 137,24W$) se encontra no valor de referência de 260W, o que não é uma tarefa fácil de se manter para um ciclista amador.

O estudo possui o objetivo principal de criar um protótipo de medidor de potência colocado no pedivela esquerdo usando produtos do mercado nacional, e após a comparação entre o *software* e o protótipo construído, pode-se concluir que o protótipo é funcional e está aprovado em um primeiro momento. O protótipo tinha como objetivos secundários o baixo custo, e não atrapalhar o movimento do ciclista, o que também foi cumprido.

5 Conclusão

O ciclismo é um esporte com muitos adeptos e que está presente em competições importantes como as Olimpíadas. Deste modo, as soluções tecnológicas são imprescindíveis para a evolução e para a obtenção dos melhores resultados. O medidor de potência é uma inovação importante neste sentido, já que permite uma melhor análise da performance do atleta, e também um melhor guia para os treinamentos. O mercado brasileiro é defasado neste sentido, visto que o acesso a estes aparelhos é limitado a poucas pessoas, pois o custo de aquisição é alto. Assim, o trabalho se propôs a construir um protótipo de medidor de potência de baixo custo, acoplado ao pedivela esquerdo da bicicleta, com materiais encontrados no mercado brasileiro.

Após a construção do protótipo, validou-se a sua performance ao compará-lo com a performance de um rolo de treino *smart* em conjunto com um *software* de ciclismo que permite controlar a potências despendida pelo ciclista. Foram feitos dois testes: o primeiro com a potência sendo controlada pelo software, e o segundo com valores aleatórios controlados apenas pelo ciclista. O experimento aconteceu em ambiente controlado de laboratório e os valores são lidos por um computador e pelo *software* ligado ao rolo de treino. O primeiro teste apresentou valores de potência médio muito próximos das referências, e no segundo, a análise gráfica também foi satisfatória. Desta forma, os resultados comprovaram o funcionamento do protótipo, apesar do alto desvio padrão das amostras proveniente de ruído no sinal.

Para a contínua evolução do protótipo é necessário antes de tudo diminuir os efeitos do ruído. Para isto, deve-se procurar fazer um melhor aterramento do pedivela, cujo o qual funciona como uma antena, e blindá-lo dos efeitos de campos elétricos com o uso do conceito da gaiola de Faraday. Para anular os efeitos magnéticos, exigirá um pouco mais de engenhosidade, visto que estes são, por natureza, mais difíceis de eliminar. Pode-se estudar especificamente o processo de colagem dos *strain gauges* para tornar a leitura do sinal a melhor possível. Além disso, pode-se criar uma peça para juntar todos os equipamentos de forma otimizada no espaço disponível pelo pedivela, e que permita a intercambiabilidade do aparelho entre bicicletas. Também é importante para trabalhos futuros validar o produto coletando dados em situações de ambiente externo, e entender a influência de outras variáveis como temperatura, umidade, etc.

Referências

- ARAÚJO, M. O. D. **DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA DE FORÇA BASEADA EM TACOS DE SAPATILHAS PARA CICLISMO**. 2021. Tese (Doutorado).
- ARDUINO®. **Arduino IDE**. 2023. Disponível em: <https://docs.arduino.cc/software/ide-v2/tutorials/getting-started-ide-v2>. Acesso em: 2023-11-21T00:00:00+00:00.
- ARDUINO®. **Datasheet: Arduino® Nano**. [S.l.], 2023.
- AVIA SEMICONDUTOR. **HX711 - 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales**. [S.l.], 2023.
- BINI, R. R.; HUME, P. A.; CERVIRI, A. A comparison of cycling SRM crank and strain gauge instrumented pedal measures of peak torque, crank angle at peak torque and power output. In: . [S.l.: s.n.], 2011. v. 13, p. 56 – 61.
- CANDOTTI, C. T. **CARACTERÍSTICAS BIOMECÂNICAS E FISIOLÓGICAS DA TÉCNICA DE PEDALADA DE CICLISTAS E TRIATLETAS**. 2003. 142 p. Tese (Programa de pós graduação em ciências do movimento humano) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- CARLOS NETO, D. *et al.* Desenvolvimento de uma plataforma de força em pedal de ciclismo. **Revista Brasileira de Biomecânica**, n. 3, p. 39 – 44, Jan 2001.
- EARNEST, C. P. *et al.* Reliability of the lode excalibur sport ergometer and applicability to computrainer electromagnetically braked cycling training device. v. 19, n. 2, p. 344 – 348, 5 2005.
- ELIAS, M. *et al.* **MEDIDOR DE POTÊNCIA FISIOLÓGICA PARA CICLISTAS**. [S.l.], 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/281587468>.
- FEDOROV, D. S. *et al.* **Using of Measuring System MPU6050 for the Determination of the Angular Velocities and Linear Accelerations**. [S.l.], 2015.
- FIGLIOLA, R. S.; BEASLEY, D. E. **Teoria e Projeto para Medicao Mecanica**. 4. ed. [S.l.]: LTC - Livros técnicos e Científicos S.A., 2006.
- GHARGHAN, S. K.; NORDIN, R.; ISMAIL, M. Development and validation of a track bicycle instrument for torque measurement using the zigbee wireless sensor network. v. 10, n. 1, p. 124 – 145, 2017.
- GROOT, G. D. *et al.* Power, muscular work, and external forces in cycling. **Ergonomics**, v. 37, n. 1, p. 31 – 42, Jan 1994.
- HIBBELER, R. C. **Estática: Mecânica para engenharia**. 12. ed. [S.l.]: Pearson Universidades, 2010.
- I2CBUS. **PROTOCOLO I2C**. [S.l.], 2023.
- INSTRUMENTS, N. **Measuring Strain With Strain Gages**. 2023.
- INVENSENSE. **MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.3**. [S.l.], 2012.

ITEADSTUDIOS. **HC-05-Bluetooth to Serial Port Module**. [S.l.], 2010.

MAIER, T. *et al.* Accuracy of Cycling Power Meters against a Mathematical Model of Treadmill Cycling. v. 38, n. 6, p. 456 – 461, 6 2017.

OLYMPICS CHANNEL. **História de: Ciclismo de Pista**. 2023. Disponível em: <https://olympics.com/pt/esportes/ciclismo-de-pista/>. Acesso em: 2023-11-19.

SINGH, T.; AMBEDKAR, B. R. **Microelectromechanical System**. [S.l.], 2020. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/344489700>.

SRAM®. **SRAM Force Crankset**. 2023. Disponível em: <https://www.sram.com/en/sram/road/series/force-axs-d2/force-axs?filters=&sort=Relevancy&page=1>. Acesso em: 2023-11-27.

VIEIRA, M. E. M.; GONÇALVES, V. C. **MEDIDOR DE POTÊNCIA FISIOLÓGICA PARA CICLISTAS: DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO**. 2015. Tese (Doutorado).

Anexos

ANEXO A – Programação do Arduino

O código a seguir foi utilizado para receber os dados dos sensores, processá-los para determinar a potência do ciclista, e transmitir via bluetooth para o dispositivo de leitura.

```
#include <MPU6050_tockn.h>
#include <Wire.h>
#include "HX711.h"
#include <SoftwareSerial.h>

MPU6050 mpu6050(Wire, 0.01, 0.99);

// Pinos para o HX711
uint8_t dataPin = 6;
uint8_t clockPin = 7;

uint32_t start, stop;
HX711 scale;

// Pinos para o módulo Bluetooth HC-05
SoftwareSerial bluetooth(8,9); // RX, TX
//esse comando permite que qualquer porta digital se
comporte como portas de comunicação Serial

void setup() {

  Serial.begin(9600);
  Wire.begin();
  mpu6050.begin();
  mpu6050.calcGyroOffsets(true); //offset do giroscópio

  // Inicialização do HX711
  scale.begin(dataPin, clockPin);
  // load cell factor 20 KG
  scale.set_scale(25.904748);
  // reset the scale to zero = 0
  scale.tare();
  // Inicialização Bluetooth
  bluetooth.begin(9600);
}

void loop() {
  mpu6050.update();

  int i;
  int n=10;
  int tempo=3000;

  float angular_velocity[2];
  float leitura_strain[2];
```

```
float media_angular;
float media_strain;

angular_velocity[0] =
sqrt(pow(mpu6050.getGyroX(),2)+pow(mpu6050.getGyroY(),2)+
pow(mpu6050.getGyroZ(),2)); // módulo da velocidade
angular [ graus/s ]
//filtro
if(angular_velocity[0] < 0)
{
    angular_velocity[0]=0;
}
//Leitura de deformação com a amplificação do HX711
leitura_strain[0] = scale.get_units();

//Loop para fazer a média das leituras
for(i=0;i<n;i++)
{
    delay(tempo/n); //gera uma espera de "tempo/n" para
ler o próximo comando
    mpu6050.update();//atualiza o MPU6050

    //Soma das velocidades angular
    angular_velocity[1] =
sqrt(pow(mpu6050.getGyroX(),2)+pow(mpu6050.getGyroY(),2)+
pow(mpu6050.getGyroZ(),2)); // dps
    angular_velocity[0] =
angular_velocity[0]+angular_velocity[1];//dps

    //Soma das deformações
    leitura_strain[1] = scale.get_units();
    leitura_strain[0] = leitura_strain[0] +
leitura_strain[1];
}

//Cálculo da média da velocidade angular
media_angular = angular_velocity[0]/i; // dps
//mudanças de unidade
float media_angular_rad_s = media_angular * (2*PI/360);
//rad/s
float media_cadencia = media_angular * PI/30; // rpm

//Cálculo da média deformação
media_strain = leitura_strain[0]/i; //miliV
```

```
//torque - curva de calibração
float torque = 0.0017*media_strain - 2.0795;

//potencia
float potencia = torque * media_angular_rad_s;
//filtro
if(potencia <0)
{
    potencia = 0;
}

// Comunicação Bluetooth
sendBluetoothData(media_cadencia,media_angular,
potencia);
}

void sendBluetoothData(float media_cadencia,float
media_angular,float potencia) {
    // Envio das informações via Bluetooth
    bluetooth.print("cadencia :");
    bluetooth.println(media_cadencia);
    bluetooth.print("Potencia :");
    bluetooth.println(potencia);
    bluetooth.println();
}
```

