

Sistema de medição de potência aplicado ao ciclismo

João Victor Rodrigues Galvão



CENTRO DE INFORMÁTICA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

João Pessoa, 2024

João Victor Rodrigues Galvão

Sistema de medição de potência aplicado ao ciclismo

Monografia apresentada ao curso Engenharia de computação
do Centro de Informática, da Universidade Federal da Paraíba,
como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de computação

Orientador: Ewerton Monteiro Salvador

Maio de 2024

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

G182s Galvão, Joao Victor Rodrigues.
Sistema de medição de potência aplicado ao ciclismo
/ Joao Victor Rodrigues Galvão. - João Pessoa, 2024.
55 f. : il.

Orientação: Ewerton Monteiro Salvador.
TCC (Graduação) - UFPB/CI.

1. Ciclismo. 2. Potência. 3. Extensometria. 4.
Sistemas embarcados. I. Salvador, Ewerton Monteiro. II.
Título.

UFPB/CI

CDU 004:796.6

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todas as pessoas que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

Primeiramente a Deus, por me dar forças para superar os obstáculos ao longo da graduação.

À minha querida noiva, Zahara, sua paciência, incentivo e apoio foram inspiradores. Obrigado por estar ao meu lado em cada desafio e por ser minha fonte constante de motivação.

À minha família pelo constante apoio, amor e compreensão ao longo dessa jornada acadêmica.

Ao meu amigo Mateus Antônio, que compartilhando suas experiências no curso, me motivou a cursar.

Não posso deixar de expressar minha gratidão aos amigos que compartilharam a sala de aula comigo, em especial Egídio Neto, Isaac Marinho, Joelder Victor, Miguel Elias e Yvson Nunes. A companhia de vocês durante as disciplinas, trabalhos, provas e projetos foi essencial para superar todos os desafios encontrados.

Ao meu orientador Ewerton Salvador, por sua orientação, apoio, dedicação, paciência e compreensão durante a realização desse trabalho.

Agradeço também a Joalison Silva, proprietário da oficina Jojo Bike Workshop, por todo auxílio durante este trabalho.

Por fim, agradeço a todos professores que contribuíram com seus conhecimentos para meu aprendizado durante a graduação.

RESUMO

O ciclismo no Brasil tem crescido rapidamente, impulsionado pelo sucesso de atletas como Henrique Avancini e pelo aumento de praticantes recreativos, sendo o esporte mais praticado no Brasil, de acordo com relatórios do Strava. Apesar disso, o mercado nacional ainda depende da importação de acessórios, como os medidores de potência. Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um protótipo de baixo custo de um medidor de potência, utilizando ESP-32 e extensometria para medir a potência e a cadência durante o exercício e enviar dados para um dispositivo móvel via Bluetooth Low Energy. A validação do dispositivo foi realizada em testes internos e externos, experimentando condições reais de uso e obtendo medições de potência e cadência de acordo com o esperado para um ciclista amador. Este projeto multidisciplinar integra conceitos da Engenharia de Computação para propor uma solução acessível aos ciclistas brasileiros.

Palavras-chave: <Ciclismo>, <potência>, <extensometria>, <sistemas embarcados>.

ABSTRACT

Cycling in Brazil has been growing rapidly, driven by the success of athletes like Henrique Avancini and the increase in recreational practitioners, making it the most practiced sport in Brazil, according to Strava reports. However, the national market still relies on the importation of accessories, such as power meters. This work aims to develop a low-cost prototype of a power meter, using ESP-32 and strain gauges to measure power and cadence during exercise and send data to a mobile device via Bluetooth Low Energy. Validation of the device was performed in internal and external tests, experiencing real conditions of use and obtaining power and cadence measurements as expected for an amateur cyclist. This multidisciplinary project integrates concepts from Computer Engineering to propose an affordable solution for Brazilian cyclists.

Keywords: <Cycling>, <power>, <strain gauges>, <embedded systems>.

LISTA DE FIGURAS

1	Locais de instalação de sensores de potência.	16
2	Medidor de potência de coroa Quark.	17
3	Medidor de potência de pedivela u2e.	17
4	Medidor de potência de pedal Garmin.	18
5	Medidor de potência de cubo PowerTap.	19
6	Variação das métricas durante um trecho de treino	21
7	Escala de percepção subjetiva de esforço.	23
8	Extensômetro.	24
9	Extensômetro em uso.	25
10	Ponte de Wheatstone	26
11	1/4 de ponte de Wheatstone	27
12	1/2 ponte de Wheatstone	27
13	Ponte de Wheatstone completa	28
14	Diferenças entre microprocessador e microcontrolador.	30
15	Placa de desenvolvimento ESP32.	30
16	Pedivela Shimano MT210/MT300.	32
17	ESP32-C3-Supermini.	33
18	Extensômetro BF350.	33
19	BMI160.	34
20	Amplificador HX711.	34
21	Sistema de alimentação.	35
22	Diagrama do protótipo.	36
23	Esforço normal ao eixo longitudinal.	37
24	Extensômetros fixados de ambos os lados do pedivela esquerdo.	38
25	Montagem final.	38
26	Fluxo de dados no programa.	39
27	Curva de calibração dos extensômetros	41
28	Dados recebidos em aplicativo	42

29	Bicicleta posicionada no rolo de treino para teste	43
30	Teste registrado no aplicativo Strava	44
31	Cadência x Tempo - Teste interno	45
32	Cadência x Tempo - Teste externo	46
33	Potência x Tempo - Teste interno	47
34	Potência x Tempo - Teste externo	48
35	Cadência e Potência x Tempo - Teste interno	49
36	Cadência e Potência x Tempo - Teste externo	49

LISTA DE TABELAS

1	Medidores de potência disponíveis no brasil	19
2	Tabela de calibração	40
3	Tabela de materiais e preços	50

LISTA DE ABREVIATURAS

BLE	- <i>Bluetooth Low Energy</i>
CPU	- <i>Central Process Unit</i>
GPS	- <i>Global Positioning System</i>
IDE	- <i>Integrated Development Environment</i>
I2C	- <i>Inter-Integrated Circuit</i>
I/O	- <i>Input/Output</i>
IMU	- <i>Inertial Measurement Unit</i>
LED	- <i>Light Emitting Diode</i>
Li-PO	- <i>Lithium Polymer</i>
MEMS	- <i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i>
NuS	- <i>Nordic UART Service</i>
RPM	- <i>Rotações Por Minuto</i>
SPI	- <i>Serial Peripheral Interface</i>
SRM	- <i>Schoberer Rad Messtechnik</i>
TXT	- <i>Plain Text File</i>
UART	- <i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Definição do problema	15
1.1.1	Objetivo geral	19
1.1.2	Objetivos específicos	19
1.2	Estrutura da monografia	20
2	CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1	Parâmetros de medição em treinos de ciclismo	21
2.1.1	Frequência cardíaca	22
2.1.2	Velocidade	22
2.1.3	Percepção subjetiva de esforço	22
2.1.4	Potência	23
2.2	Extensometria	24
2.3	Condicionamento do sinal	25
2.4	Sensores Inerciais	28
2.4.1	Giroscópio	28
2.5	Sistemas embarcados	29
2.6	Trabalhos relacionados	31
3	METODOLOGIA	32
3.1	Ambiente de desenvolvimento	32
3.2	Materiais utilizados	32
3.2.1	ESP-32-C3 super mini	33
3.2.2	Extensômetro BF350	33
3.2.3	IMU BMI160	34
3.2.4	Amplificador HX711	34
3.2.5	Alimentação	35
3.3	Implementação do dispositivo	35
3.3.1	Montagem do protótipo	36

3.4	Desenvolvimento do software	39
3.4.1	Tratamento de dados e calibração	39
3.4.2	Transmissão de dados	41
3.5	Testes de validação	42
3.5.1	Teste interno	43
3.5.2	Teste externo	43
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	45
4.1	Resultados	45
4.2	Custos do protótipo	50
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS	51
	REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

O ciclismo no Brasil tem aumentado sua popularidade nos últimos anos. Relatórios da Confederação Brasileira de Ciclismo apontam que o número de ciclistas filiados aumentou, saltando de 8074 filiados em 2014, para 12.217 atletas filiados em 2022 (CONFEDERAÇÃO BRASILEIRA DE CILISMO, 2024). Esse "boom" no ciclismo brasileiro provavelmente possui relação com o atleta brasileiro mais vitorioso do esporte, Henrique Avancini, bicampeão mundial de Mountain Bike, vencedor de cinco etapas de copa do mundo, medalhista pan-americano, campeão sul-americano, 23 vezes campeão brasileiro e foi o ciclista número um do mundo ao fim da temporada 2020. Além de diversos títulos, Avancini também ajudou a impulsionar o ciclismo no Brasil. Em 2022 ele ajudou a organizar a etapa local da Copa do Mundo de Mountain Bike em sua cidade natal, Petrópolis. A América do Sul não recebia uma etapa de copa do mundo desde 2006, entretanto, com o sucesso em 2022, mais dois eventos de Copa do Mundo foram realizados no Brasil em 2024, recolocando o país de volta ao calendário internacional (OLYMPICS, 2023).

Além do crescimento de competidores, os ciclistas recreativos e cicloturistas também aumentaram. O Strava, a maior comunidade digital voltada aos esportes com, mais de 120 milhões de usuários, divulgou em seu relatório anual, que o ciclismo foi o esporte mais praticado no Brasil, correspondendo a 36% das atividades praticadas (STRAVA, 2024). Apesar do grande aumento da popularidade do esporte, o mercado brasileiro ainda não produz acessórios específicos, dependendo da importação de tecnologia estrangeira. Um dos exemplos disso são os medidores de potência.

O medidor de potência é um equipamento capaz de medir o torque aplicado nos pedais para medir o esforço aplicado durante um treino. É muito útil, pois a potência é uma medida consistente que não é influenciada pelo clima ou terreno. Os medidores de potência combinam circuitos analógicos com microcontroladores e filtragem digital, fazendo com que esse seja um trabalho que combina diversos conceitos associados à área de Engenharia de Computação.

Este trabalho tem o objetivo de apresentar um protótipo de baixo custo capaz de medir a potência e a cadência durante o exercício e enviar para um dispositivo móvel por comunicação sem fio. Para validar o dispositivo foram realizados testes internos com um rolo de treino e externos pedalando na rua.

1.1 Definição do problema

Para ciclistas amadores, a métrica mais utilizada para medir o desempenho é a velocidade média para percorrer determinada distância. Esse parâmetro é utilizado com

a lógica de, "se eu percorri a mesma distância em um menor tempo, então estou melhor condicionado". Porém, essa é uma métrica que não traduz com muita precisão o real condicionamento físico.

Sem os valores de potência, o desempenho só pode ser estimado com base nas condições enfrentadas pelo percurso. Porém, sabendo esses valores, é possível replicar condições específicas de treinamento para atingir objetivos físicos mais claros. Além de melhorar o desempenho, um medidor de potência oferece outras vantagens, como por exemplo: melhorar a eficiência, gerenciar a fadiga e facilitar o estabelecimento de metas. Em comparação com outras métricas que serão apresentadas posteriormente, os medidores de potência oferecem mais precisão e objetividade (FRIEL, 2012).

Atualmente estão disponíveis no mercado diversos tipos de medidores de potência, a maioria possui o sensoramento baseado em extensômetros, mas o hardware varia de acordo com a fabricante. Os locais de instalação mais comuns estão demonstrados na figura abaixo, são eles: a coroa, o pedivela, os pedais e o cubo traseiro (ALLEN, COGGAN, MCGREGOR, 2019).



Figura 1: Locais de instalação de sensores de potência.

Fonte: Adaptado de (CALOI, 2021)

Medidores de potência de coroa: É o local mais comum para a medição da potência, pois fica próximo de onde a energia está sendo produzida. Esse tipo de sensor mede a deformação gerada na coroa da bicicleta e mede a força aplicada pelas duas pernas do atleta, mas não de forma independente. Esse modelo é facilmente integrado à bicicleta,

desde que seja compatível, trazendo algumas limitações caso mude de quadro futuramente (ALLEN, COGGAN, MCGREGOR, 2019).



Figura 2: Medidor de potência de coroa Quark.

Fonte: (THE BIKERS SHOP, 2024)

Medidores de potência de pedivela: Os medidores no braço da pedivela podem ser instalados internamente durante sua fabricação, dessa forma são muito precisos, pois podem medir toda a deflexão dentro da peça. Eles também podem ser acoplados externamente, que é uma abordagem mais barata e popular. Esses medidores podem ser instalados em um ou nos dois braços da pedivela, então é possível medir com muita precisão a potência aplicada por cada perna. Outra possibilidade é instalar apenas no lado esquerdo e estimar a potência total, entretanto, essa estimativa pode não ser vantajosa, uma vez que existe uma discrepância entre a força das pernas em cerca de 5% para maioria dos adultos (ALLEN, COGGAN, MCGREGOR, 2019).



Figura 3: Medidor de potência de pedivela u2e.

Fonte: (U2E, 2024)

Medidores de potência de pedais: Esse modelo mede a potência no local exato onde ela é transferida do atleta para a bicicleta. Sua maior vantagem é a portabilidade,

pois para mudar o sensor de bicicleta, basta utilizar uma chave. Eles também são capazes de realizarem métricas como forças tangenciais e radiais e mostrar se a pedalada ocorre pronada ou supinada. Assim como os modelos de pedivela, eles podem medir a potência das duas pernas ou de apenas uma delas. Como desvantagem, esse modelo pode ser danificado em curvas técnicas e também possui manutenção em seus rolamentos para bom funcionamento (ALLEN, COGGAN, MCGREGOR, 2019).



Figura 4: Medidor de potência de pedal Garmin.

Fonte: (GARMINSTORE, 2024)

Medidores de potência de cubo: Para realizar as medições, esse tipo de sensor usa um "tubo de torque" no cubo da roda traseira da bicicleta. Esse tubo mede a torção interna à medida em que ele gira devido a carga da pedalada. Uma das vantagens é que ele mede a potência que chega ao chão, normalmente a potência medida no cubo é de cerca de 5 a 10 watts menor que a medida nos pedais ou pedivela, pois parte da potência é dissipada na transmissão. A desvantagem é que o ciclista fica preso a um modelo de roda que seja compatível com o cubo para medições (ALLEN, COGGAN, MCGREGOR, 2019).



Figura 5: Medidor de potência de cubo PowerTap.

Fonte: (SRAM, 2024)

No mercado brasileiro, o medidor de potência ainda não é acessível para a grande maioria dos ciclistas pelo seu elevado custo. Na tabela abaixo podemos visualizar alguns modelos disponíveis no Brasil em maio de 2024.

Marca	Modelo	Posição de instalação	Valor
Garmin	Rally XC200	Pedal	R\$ 10.699,00 (GARMINSTORE, 2024)
U2e	V4	Pedivela	R\$ 2.500,00 (U2E, 2024)
Cerveló	Assioma Duo	Pedal	R\$ 6.399,00 (CERVELÓa, 2024)
Cerveló	Sigeyi	Coroa	R\$ 3.999,00 (CERVELÓb, 2024)
ROTOR	INPOWER	Pedivela	R\$ 3.992,00 (SPOKES, 2024)
Quarq	Spider	Coroa	R\$ 3.999,00 (THE BIKERS SHOP, 2024)

Tabela 1: Medidores de potência disponíveis no brasil

Portanto, se observa a relevância do protótipo de baixo custo proposto nesse trabalho, que busca encontrar soluções que possam ajudar a democratizar cada vez mais o acesso a esse equipamento.

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um dispositivo capaz de mensurar a potência e a cadência aplicada por um ciclista durante um treino ou passeio.

1.1.2 Objetivos específicos

Foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos para este trabalho:

1. Desenvolver um dispositivo de baixo custo, baseado na placa de desenvolvimento ESP32.
2. Integrar ao dispositivo sensores de cadência e extensômetros.
3. Fixar o protótipo do lado esquerdo do pedivela da bicicleta.
4. Enviar os dados para serem exibidos e analisados via Bluetooth.

1.2 Estrutura da monografia

Esse trabalho está dividido nos seguintes capítulos: Capítulo 2 que tem como objetivo fornecer os conceitos básicos para o melhor entendimento do que foi proposto e executado; Capítulo 3 que descreve o passo à passo da construção do protótipo, desde a seleção dos componentes, passando pela montagem e finalizando com a implementação do software; Capítulo 4 que apresenta os resultados obtidos, e o Capítulo 5 que é dedicado às considerações finais e trabalhos futuros.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo tem como objetivo apresentar os conceitos chave para o melhor entendimento do trabalho, assim como expor um pouco à respeito dos trabalhos já feitos com objetivos semelhantes.

2.1 Parâmetros de medição em treinos de ciclismo

Os parâmetros de medição de treinos de ciclismo incluem uma variedade de métricas que os ciclistas podem usar para monitorar e melhorar seu desempenho. Isso pode ser feito com o uso de dispositivos capazes de fornecer informações sobre a potência, a frequência cardíaca, a velocidade, a distância percorrida e até mesmo a altitude. Ao analisar esses dados, os ciclistas podem ajustar seus treinos para otimizar sua preparação física e melhorar seu desempenho em competições.

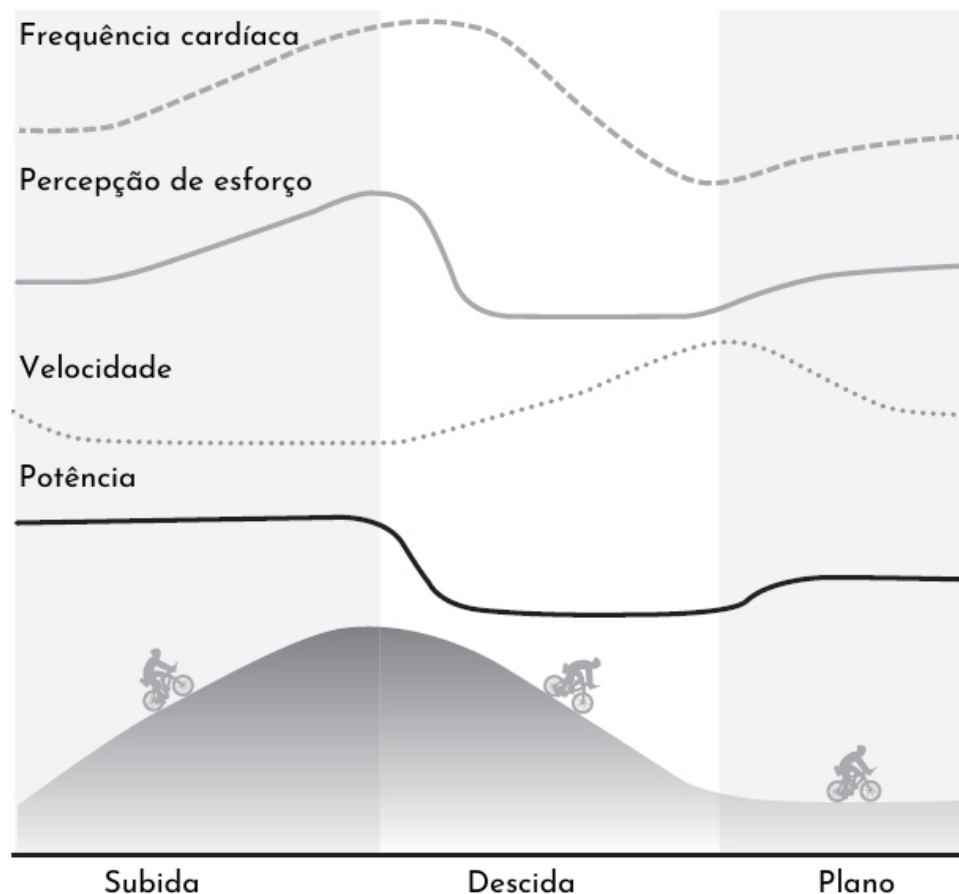


Figura 6: Variação das métricas durante um trecho de treino

Fonte: Adaptado de (FRIEL, 2012)

2.1.1 Frequência cardíaca

A frequência cardíaca é reativa, não proativa, ela responde ao esforço muscular em vez de causá-lo. Pode se fazer uma analogia entre a frequência cardíaca e uma bomba de combustível, assim como a bomba fornece combustível para o motor, o coração fornece sangue aos músculos, mas não determina o desempenho. O treinamento baseado apenas na frequência cardíaca é limitado, pois a frequência é influenciada por fatores externos como a dieta, estresse e excitação, por isso pode não refletir a intensidade real do esforço, por exemplo, um atleta que ingeriu cafeína e açúcar pode ter sua frequência cardíaca aumentada. Embora os monitores cardíacos sejam muito úteis, é importante considerar outras métricas, para um treinamento mais eficiente (FRIEL, 2012).

2.1.2 Velocidade

A avaliação do condicionamento físico com base na velocidade também é afetada por influências externas. O vento e a topografia do terreno têm um impacto direto na velocidade alcançada pelo atleta, tornando essa medida menos precisa. Esse impacto é muito claro nas subidas, onde o ciclista precisa aplicar muito esforço para manter a velocidade, e nas descidas, onde pode ganhar velocidade sem pedalar. Além disso, o vento também influencia significativamente a velocidade do ciclista. Em condições de vento contrário, é necessário aplicar mais potência para manter uma determinada velocidade, enquanto em caso de vento favorável, a velocidade pode aumentar sem um aumento proporcional no esforço (FRIEL, 2012).

2.1.3 Percepção subjetiva de esforço

A percepção subjetiva de esforço se baseia em como o atleta se sente após uma sessão de treino, sem o auxílio de nenhum equipamento. Para tal estimativa, é utilizada uma escala de 0 até 10 que classifica o esforço, um problema dessa métrica é que pode variar muito de um indivíduo para outro, pedalar de acordo com a sensação exige uma abordagem calma e focada no treino, comumente iniciamos rápido pelo entusiasmo e no decorrer da atividade acontece uma desaceleração em decorrência da fadiga causada pela explosão inicial (FRIEL, 2012).

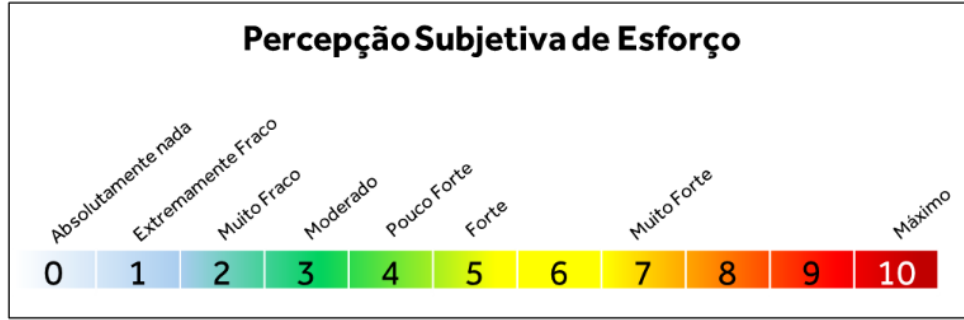


Figura 7: Escala de percepção subjetiva de esforço.

Fonte: (COMITÊ OLÍMPICO DO BRASIL, 2024)

2.1.4 Potência

Conforme já apresentado, algumas métricas no ciclismo podem sofrer muita interferência externa, mas a potência está relacionada com a energia que o ciclista está produzindo e aplicando aos pedais. Na física a potência é definida como o trabalho dividido pelo tempo decorrido:

$$P = \frac{W}{t} \quad (1)$$

O trabalho é a força multiplicada pela distância, logo:

$$W = F \times d \quad (2)$$

Sabendo disso, podemos realizar uma substituição na fórmula do trabalho e chegar na seguinte equação:

$$P = F \times \frac{d}{t} \quad (3)$$

Ou seja, a potência é o resultado da força multiplicada pela distância do movimento dividida pelo tempo para realizar o movimento. Sabendo que a distância dividida pelo tempo resulta na velocidade, podemos simplificar mais ainda e teremos que a potência pode ser descrita como:

$$P = F \times v \quad (4)$$

Quando ocorre a pedalada a força e a velocidade determinam a potência gerada, ao pressionar o pedal aplicando força, ele gira gerando torque. Já a velocidade nesta equação é a velocidade em que o pedal é girado, também chamado de cadência, medido em RPM (Rotações por minuto). Quanto maior a cadência numa mesma marcha maior

é a potência (FRIEL, 2012).

2.2 Extensometria

A extensometria é uma técnica para medir tensões e deformações em corpos. Ela se baseia no uso de extensômetros ou *Strain Gauges* (ANDOLFATO, 2004).

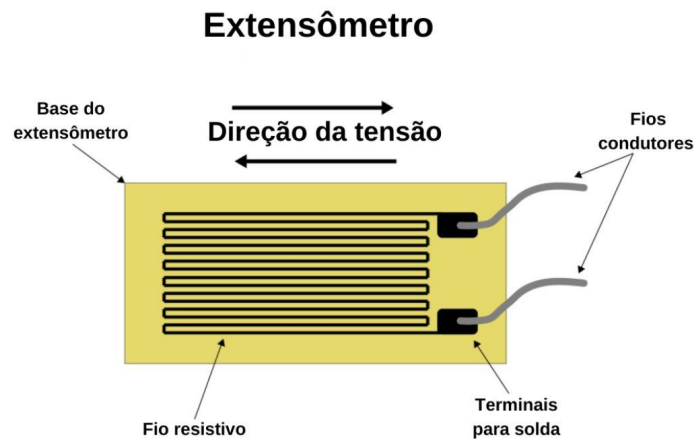


Figura 8: Extensômetro.

Fonte: Adaptado de (MICHIGAN SCIENTIFIC CORPORATION, 2020)

O extensômetro é um elemento sensível que transforma pequenas variações de dimensão em variações de resistência. Por isso podemos utilizá-lo como um medidor de deformação, ou seja, converter um movimento mecânico em um sinal elétrico, que pode ser medido (SELLI, 2015). Algumas características importantes de se destacar são:

- Alta precisão;
- Baixo custo;
- Pequeno tamanho e pouco peso;
- Linearidade;
- Fácil instalação.

A variação da resistência elétrica de um extensômetro é dada pela seguinte equação:

$$\Delta R = k \cdot \varepsilon \cdot R \quad (5)$$

Onde:

ΔR é a variação da resistência elétrica do fio em Ω ;

k é uma constante característica;

ε é a deformação específica em m/m;

R é a resistência do fio em Ω .

Quando uma força é aplicada em um corpo, ele se deforma, por exemplo, se um fio é submetido a tensão ou compressão e se torna mais longo ou mais curto, sua área transversal varia, fazendo com que sua resistência também varie e possa ser medida e, com base nessa variação, é possível medir a deformação do corpo. Esse é o princípio de funcionamento do extensômetro e é ilustrado na Figura 9, que mostra o alongamento do extensômetro #1 e a compressão do extensômetro #2:

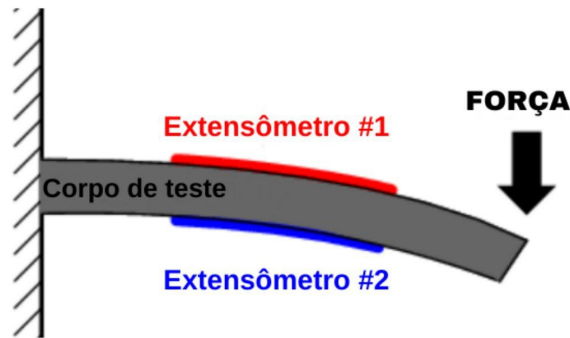


Figura 9: Extensômetro em uso.

Fonte: Adaptado de (MCGUAN, 2018)

2.3 Condicionamento do sinal

Um dos circuitos mais utilizados na medição de variação de resistência é a ponte de Wheatstone. Esse circuito consiste em quatro braços com resistências, uma fonte de alimentação e uma saída de tensão. A ponte pode ser montada de forma a ter uma, duas ou quatro resistências variáveis (COELHO, MORILLA, 2014).

Além de medir as variações, a ponte de Wheatstone também compensa resistores. O diagrama da Figura 10 mostra a ponte formada pelos resistores R_1 , R_2 , R_3 e R_4 alimentados por uma tensão V_{EX} nos terminais A e B e com a medição nos terminais C e D resultando em V_0 , a saída da ponte.

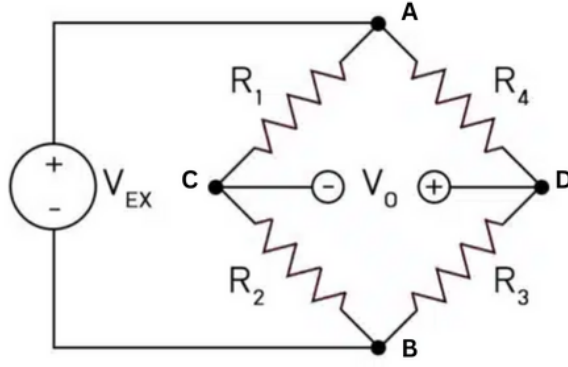


Figura 10: Ponte de Wheatstone

Fonte: Adaptado de (BESTECH, 2020)

Esse esquema forma dois pares independentes: um par compara e o outro mede as variações (WEBER, 2009).

$$V_0 = \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2)(R_4 + R_3)} \cdot V_{EX} \quad (6)$$

Se a ponte estiver em balanço, temos que

$$V_0 = \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2)(R_4 + R_3)} \cdot V_{EX} = 0 \quad (7)$$

Esse balanço depende de como as resistências estão dispostas, elas devem ser iguais em cada braço da ponte, podendo ser dispostas em algumas configurações apresentadas à seguir. É possível operar com um quarto de ponte, onde três resistores são fixos e um é variável, porém essa configuração necessita de cuidados adicionais pois sofre efeito da temperatura e tende a apresentar uma não-linearidade mais expressiva que as outras combinações (WEBER, 2009). Comumente é usada quando se deseja medir a deformação em um dado sentido.

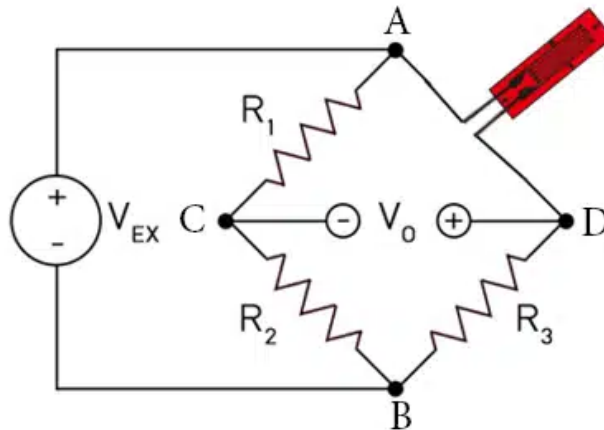


Figura 11: 1/4 de ponte de Wheatstone

Fonte: Adaptado de (BESTECH, 2020)

Também pode-se usar a ponte de Wheatstone juntamente com os extensômetros na configuração de meia ponte. Com apenas um dos braços do circuito ativado, é possível utilizar técnicas de meia ponte pra adquirir as componentes de flexão de um corpo de prova. Fixando os sensores em faces opostas, possibilitando a leitura dos sinais que apresentam a mesma deformação e valor, mas com sinais opostos.

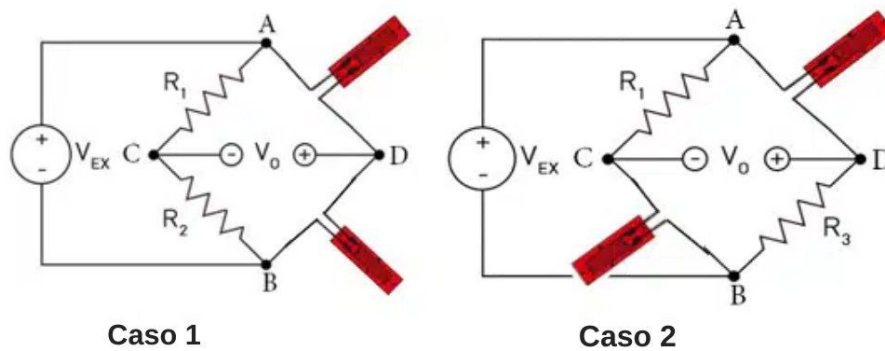


Figura 12: 1/2 ponte de Wheatstone

Fonte: Adaptado de (BESTECH, 2020)

Por último, a combinação mais sensível é a de ponte completa, utilizando quatro sensores. Possibilitando a medição da deformação em mais de um eixo e com a melhor compensação da temperatura, o sinal de saída é uma tensão na ordem de milivolts, que posteriormente é amplificada por outro circuito para melhor leitura.

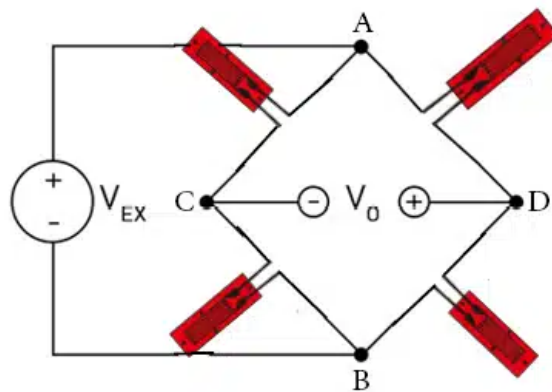


Figura 13: Ponte de Wheatstone completa

Fonte: Adaptado de (BESTECH, 2020)

2.4 Sensores Inerciais

Os sensores inerciais são baseados em uma estrutura MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*), que pode ser conceituada como um sistema eletromecânico projetado em uma escala micrométrica. Ela é composta por três componentes essenciais: o sensor e/ou atuador responsável por detectar ou provocar mudanças físicas ou ambientais; a interface analógica encarregada de adquirir, transmitir e amplificar o sinal proveniente do sensor e/ou atuador; e a seção de controle digital e processamento numérico, que processa e interpreta os dados coletados pelo sensor e/ou atuador (FORHAN, SENNA, 2010). Essa estrutura compacta e integrada permite a criação de dispositivos altamente eficientes e precisos, com uma vasta gama de aplicações em diversas áreas como automação, medicina, eletrônica de consumo e sistemas de comunicação.

2.4.1 Giroscópio

Um giroscópio é um dispositivo que possibilita a medição da velocidade de rotação de um objeto em torno do seu centro de rotação. Ele avalia quão rapidamente o objeto está girando em relação a um sistema de referência inercial, que é denominado velocidade angular. Essa velocidade angular pode ser integrada ao longo do tempo para determinar a posição angular do objeto (FORHAN, SENNA, 2010).

O giroscópio MEMS utiliza uma estrutura que mede a variação de capacitância. Ele detecta a velocidade angular por meio da força de Coriolis e tem como vantagens o custo reduzido de produção, tamanho compacto, baixo peso e consumo de energia, rápida inicialização, alta confiabilidade e baixa necessidade de manutenção (STUHLER, 2022).

2.5 Sistemas embarcados

Um sistema embarcado é um sistema computacional especializado em uma aplicação específica, desenvolvido sob restrições do projeto para atender um determinado objetivo (BARROS, CAVALCANTE, 2010). Esses sistemas possuem algumas características específicas:

1. **Funcionalidade única:** normalmente um sistema embarcado executa apenas uma rotina de programa repetidamente para atender seu propósito, podendo utilizar hardware de propósito geral ou desenvolvendo o hardware específico para aquela tarefa.
2. **Restrições de projeto:** assim como todo projeto computacional, restrições devem ser seguidas. Nos sistemas embarcados é comum que as restrições estejam relacionadas ao custo do sistema, tempo de resposta e autonomia da bateria.
3. **Processamento de sinais:** dependendo da aplicação, o sistema deve ser capaz de reagir a mudanças no ambiente e fornecer resultados em tempo real. A informação deve ser processada e os sinais tratados e digitalizados para que possam ser transmitidos.

A tecnologia aplicada no projeto do sistema varia de acordo com a necessidade. Num sistema customizado, toda a arquitetura pode ser feita para uma aplicação particular, por exemplo, todo dimensionamento de transistores e roteamento do circuito pode ser projetado para obter um excelente desempenho, com tamanho reduzido e baixo consumo de energia. Mas também podem ser utilizadas placas programáveis com o objetivo de baratear a prototipagem e diminuir o tempo de projeto. Nessa direção, existe a possibilidade de se fazer uso de componentes diferentes, podendo se utilizar de microprocessadores ou de microcontroladores.

Os microprocessadores são componentes que se dedicam ao processamento de informações e possuem capacidade de realizar cálculos matemáticos. Utilizam barramentos de dados e de controle para fazer acesso aos periféricos de entrada e saída, dependem de circuitos integrados externos como memórias, conversores analógicos/digitais. Esses componentes costumam ser utilizados em soluções mais complexas. Já os microcontroladores são pequenos sistemas computacionais em um único chip, possui todas as interfaces e periféricos já integrados, bastando apenas escrever os programas e gravar no chip. O microcontrolador é capaz de absorver novas funções com a integração de drivers a placa (CUNHA, 2007).

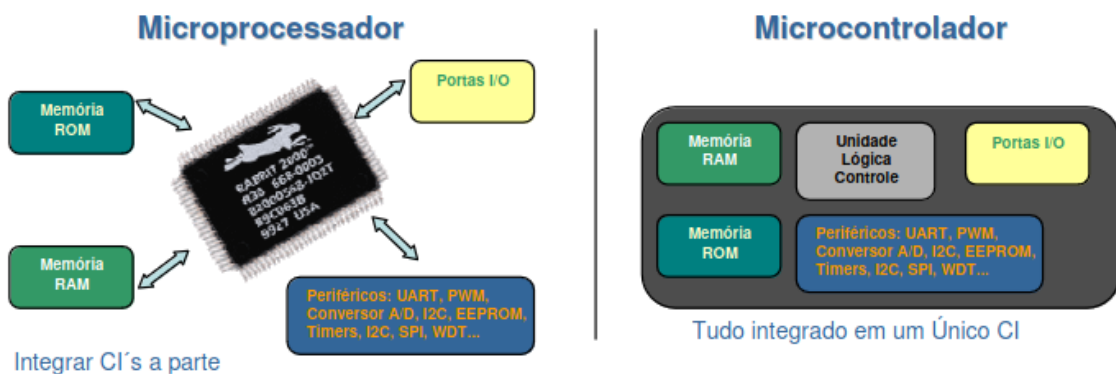


Figura 14: Diferenças entre microprocessador e microcontrolador.

Fonte: (CUNHA, 2007)

Dentro do universo dos microcontroladores, o que será utilizado nesse trabalho é o ESP32. Um chip que combina Wi-Fi e Bluetooth de 2,4Ghz, projetado para alcançar o melhor desempenho, com robustez, versatilidade e confiabilidade em uma ampla gama de aplicações e cenários. Ela é composta de uma CPU (*Central Process Unit*) de dois núcleos com frequência de 240MHz. No quesito de gerenciamento de energia, ela possui cinco modos de consumo: *Active*, onde todas as funcionalidades estão ativas; *Modem-Sleep*, onde o Bluetooth e o Wi-Fi são desligados, mas são religados periodicamente; *Light-Sleep*, além de desligar o Wi-Fi e o Bluetooth, reduz o clock do processador; *Deep-Sleep*, neste modo, diversos periféricos são desligados e parte da memória ram é desativada, proporcionando muita economia de energia; *Hibernation*, com essa configuração apenas um timer e algumas portas ficam ativas, todo o resto é desligado (ESPRESSIFa, 2024).



Figura 15: Placa de desenvolvimento ESP32.

Fonte: Autoria própria

2.6 Trabalhos relacionados

Durante as buscas preliminares para estudar a viabilidade do protótipo, três trabalhos se destacaram por possuir o mesmo objetivo, mas utilizando equipamentos e métodos diferentes.

O trabalho proposto por Vieira e Gonçalves (2015), desenvolveu um protótipo de medidor de potência utilizando extensômetros na configuração de meia ponte, como sensor de inércia foi selecionado o IMU (*Inertial Measurement Unit*) MPU-6050, como amplificador foi utilizado o INA122, como microcontrolador a escolha foi o Arduino Nano, acompanhado de um módulo Bluetooth para realizar a transmissão de dados para um dispositivo móvel. Os resultados incluem análises angular e quantitativa para potência e validação da cadência por análise de vídeo. Além dos resultados práticos, o trabalho gerou uma patente registrada.

Já o estudo de Ghargan, Nordin e Ismail (2017), teve o objetivo de desenvolver um medidor de potência também utilizando extensômetros, mas configurados como ponte completa, associado a um sensor magnético para registrar a velocidade angular, para amplificar o sinal foi utilizado o AD623, este trabalho também utilizou a plataforma Arduino Nano, mas optou por transmitir os dados pelo protocolo ZigBee. Foi realizada uma comparação do modelo proposto com um sistema SRM (*Schoberer Rad Messtechnik*) comercial, os resultados indicaram que os valores medidos possuíam 95% de semelhança que os gerados com o medidor da SRM.

A pesquisa de McGuan (2018), envolveu o desenvolvimento de um protótipo de medidor de potência baseado em extensômetros, montados em ponte completa, para amplificar o sinal foi utilizado um módulo HX771, o sensor de inércia foi o MPU-6050, para alimentação ele utilizou uma bateria de 3.7V e 500mAh associada com um carregador e regulador de tensão, para elevar a tensão para 5V, para executar o programa, a plataforma utilizada foi a Arduino Beetle BLE, para comunicação foi utilizado o protocolo BLE (*Bluetooth Low Energy*) e os dados foram enviados para um computador. Diferente dos outros já citados, foi construído uma caixa para acomodar e proteger o dispositivo. Esse trabalho também cita o valor total do projeto, já que o baixo custo era um dos objetivos.

3 METODOLOGIA

Este capítulo tem como objetivo descrever como foi desenvolvido o dispositivo proposto.

3.1 Ambiente de desenvolvimento

O dispositivo proposto foi desenvolvido sobre o pedivela FC-MT210/MT300, o firmware que irá controlar o dispositivo foi desenvolvido na linguagem C utilizando a Arduino IDE (*Integrated Development Environment*). O motivo da escolha da IDE do Arduino foi a maior disponibilidade de drivers para os sensores utilizados.



Figura 16: Pedivela Shimano MT210/MT300.

Fonte: Autoria própria

3.2 Materiais utilizados

A seleção de sensores se deu priorizando o custo e o tamanho. Por ser um dispositivo que deve ficar acoplado no pedivela da bicicleta, o tamanho deve ser o menor possível para não atrapalhar a pedalada. Com esses dois parâmetros definidos a busca se iniciou pelo microcontrolador, em seguida pelos extensômetros, giroscópio, amplificador, bateria e carregador de bateria.

3.2.1 ESP-32-C3 super mini

Esse modelo específico de placa de desenvolvimento foi selecionado principalmente pelo seu tamanho reduzido, com dimensões de 22.52x18mm. Apesar do pouco tamanho, ela conta com uma CPU single-core de 32-bits rodando à 160Mhz, 400 KB SRAM, 384KB ROM, 4MB flash. Em suas conexões sem fio conta com: Wi-Fi 2.4Ghz e Bluetooth 5 (Low Energy), também possui 11 pinos de I/O *Input/Output* digitais, 4 pinos analógicos e tem suporte a I2C *Inter-Integrated Circuit*, SPI *Serial Peripheral Interface* e UART *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter* (ESPRESSIFb, 2022). Combinando todas essas características, essa placa se mostra ideal para o projeto, com alta performance, baixo consumo e baixo custo.

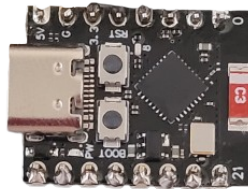


Figura 17: ESP32-C3-Supermini.

Fonte: Autoria própria

3.2.2 Extensômetro BF350

Existem diversos modelos de extensômetros no mercado, geralmente são vendidos em 120, 350 e 1000 Ω . Para medir a deformação, o extensômetro selecionado para este projeto foi o BF350, com 350 Ω de resistência e de medição em apenas um eixo. Ele mede 7.1x4.5mm, sendo muito pequeno e ideal para fixar no pedivela.



Figura 18: Extensômetro BF350.

Fonte: (SARAVATI, 2024)

3.2.3 IMU BMI160

O BMI160 é uma IMU (*Inertial measurement unit*) de baixo consumo de energia que oferece medições precisas de aceleração e velocidade angular. É composto por um acelerômetro digital de três eixos de 16bits e um giroscópio digital de três eixos de 16bits. Com seus dois sensores ativos seu consumo médio é de $925\mu A$ e pode ser alimentado com uma ampla faixa de tensão, variando de 1,7V até 3,6V (BOSCH SENSORTECH, 2020). Este componente foi selecionado por seu tamanho, consumo e precisão.

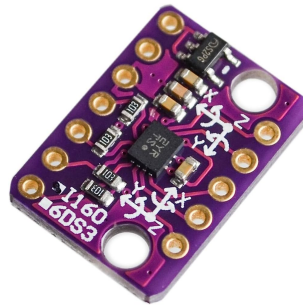


Figura 19: BMI160.

Fonte: (ESPHOME, 2024)

3.2.4 Amplificador HX711

O HX711 é um conversor analógico-digital de precisão de 24 bits desenvolvido pela Avia Semiconductor para aplicações em balanças e controle industrial. Baseado na tecnologia patenteada da Avia Semiconductor, o HX711 é projetado para interfacear diretamente com um sensor de ponte (SPARKFUN, 2024). A escolha desse amplificador se deu pois ele é projetado para o uso com células de cargas e ponte de Wheatstone, além de possuir baixo custo e tamanho reduzido.

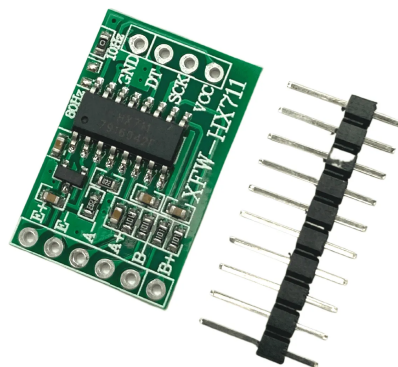


Figura 20: Amplificador HX711.

Fonte: (CASA DA ROBOTICA, 2024)

3.2.5 Alimentação

A alimentação do protótipo é composta de dois componentes, uma bateria do tipo Li-PO (*Lithium Polymer*) de 3.7V e 1000mAh e um carregador de bateria TP4056. A bateria foi escolhida por possuir dimensão compatível com o projeto com 6,5x33,7x40,5mm, além de ser recarregável, fornecer tensão adequada e possuir boa capacidade de carga. Juntamente da bateria, um carregador foi necessário, o modelo TP4056 que pode fazer isso com eficiência e segurança. Ele possui LEDs (*Light Emitting Diode*) de indicação de carregamento e resistor de ajuste de corrente, seu carregamento ocorre em duas fases: de corrente constante, onde o carregador fornece uma corrente até que a bateria atinja a tensão de carga máxima e a fase de tensão constante, onde após atingir a tensão máxima, o circuito reduz a corrente gradualmente até que a bateria esteja completamente carregada (MAKER HERO, 2023).



Figura 21: Sistema de alimentação.

Fonte: Autoria própria

3.3 Implementação do dispositivo

Após a seleção de componentes, se deu o início da implementação do protótipo. O primeiro passo para a montagem foi definir a sua arquitetura, para a aquisição dos dados através da extensometria, foi adotada a configuração de ponte completa com 4 extensômetros ligados em ponte de Wheatstone. A saída da ponte é uma tensão na ordem de miliVolt, então o módulo HX711 é o responsável por fornecer a tensão de excitação para a ponte e também amplificar e converter o sinal analógico para digital. A ESP32-C3

foi posicionada com o objetivo de coletar e transmitir os dados, além de alimentar com uma tensão estável de 3.3V o módulo amplificador HX711 e a IMU BMI-160. Já a bateria foi ligada ao carregador TP-4056 que fornece a alimentação para a ESP32 distribuir para o resto do sistema. Uma representação desse sistema pode ser visto no diagrama abaixo.

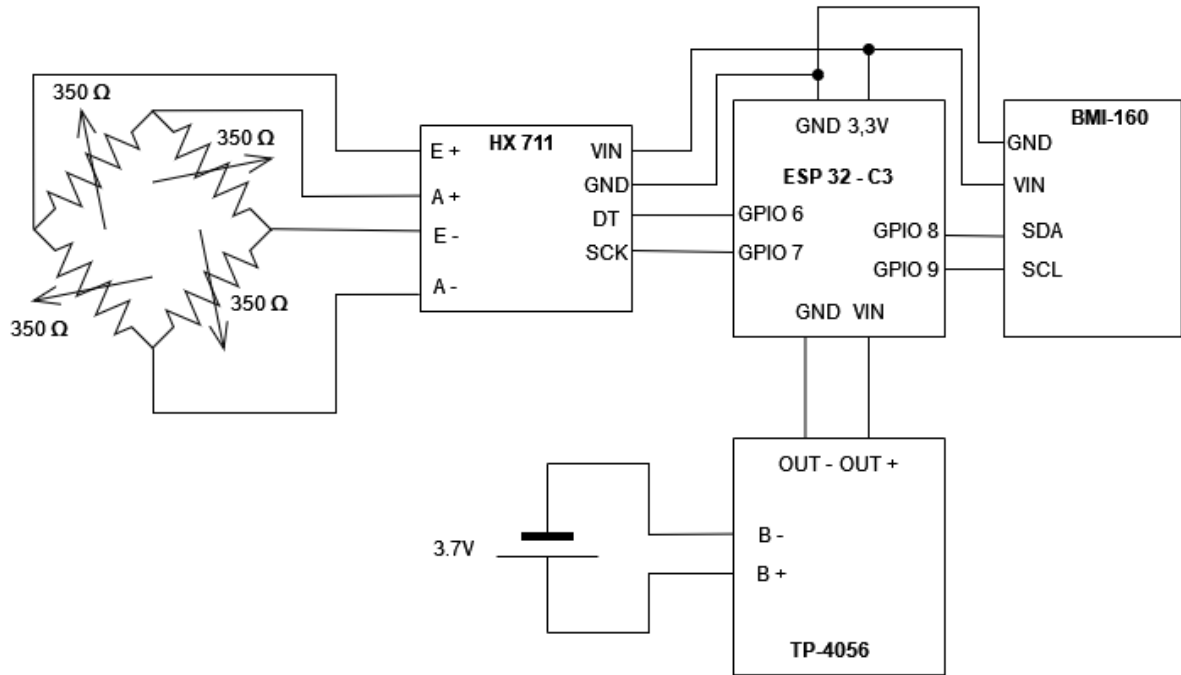


Figura 22: Diagrama do protótipo.

Fonte: Autoria própria

3.3.1 Montagem do protótipo

Como já descrito anteriormente, os extensômetros foram fixados em formato de ponte completa, pois essa topologia minimiza o ruído térmico, auxilia na compensação do efeito de expansão, minimiza ruídos externos e compensa algumas deformações não lineares (LAZZARI, 2010).

O local de instalação foi definido com a ajuda de um estudo da deformação do pedivela com a aplicação de força no sentido da pedalada, os resultados indicaram que a área de maior deformação (destacada em vermelho) fica aproximadamente acima da metade do corpo da peça, de acordo com a Figura 23.

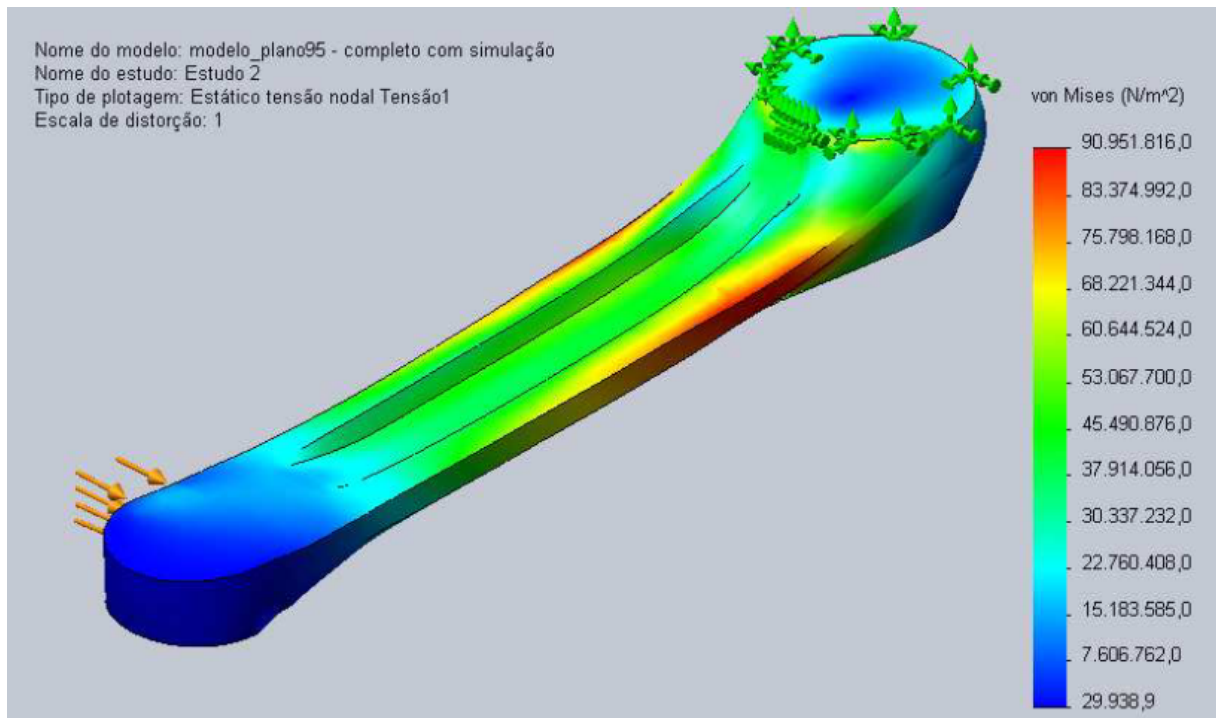


Figura 23: Esforço normal ao eixo longitudinal.

Fonte: (LAZZARI, 2010)

Com o local definido, a fixação dos extensômetros seguiu as seguintes recomendações:

- Limpeza mecânica da superfície utilizando uma lixa para remover a pintura da peça e as impurezas presentes nela, seguida por uma limpeza química utilizando uma gaze com álcool isopropílico para a remoção de poeira e gordura;
- Posicionamento dos extensômetros em um ângulo de 90° entre si, para que as deformações possam ser medidas em dois eixos;
- Colagem dos extensômetros com adesivo instantâneo a base de cianoacrilato (Tek-Bond 793) e o auxílio de fita adesiva para manter o posicionamento durante a colagem;
- Cura do adesivo por aproximadamente 10 minutos, seguida da retirada da fita adesiva.

Os extensômetros foram fixados no pedivela esquerdo, de ambos os lados. O resultado dessa etapa é ilustrado na Figura 24.



Figura 24: Extensômetros fixados de ambos os lados do pedivela esquerdo.

Fonte: Autoria própria

Em seguida, seguindo o proposto no diagrama apresentado anteriormente, foi montada a ponte de Wheatstone junto do amplificador, IMU, ESP32 e bateria. A montagem teve o objetivo de encontrar a melhor disposição dos componentes sem atrapalhar a pedalada. Todo o sistema embarcado adicionou 50g de peso ao pedivela esquerdo, elevando seu peso de 440g para 490g. O resultado final é apresentado a seguir.



Figura 25: Montagem final.

Fonte: Autoria própria

3.4 Desenvolvimento do software

O programa que controla o dispositivo foi escrito na linguagem C, na Arduino IDE. As seguintes bibliotecas foram utilizadas:

- HX711_ADC - Para facilitar o uso do módulo HX711 essa biblioteca realiza a filtragem e a suavização das leituras utilizando o método de média móvel combinado com a remoção de valores discrepantes (OLKAL, 2024).
- FASTIMU - Essa possui suporte para diversas IMU, realizando a calibração e retornando os resultados em um objeto com três eixos (LIQUIDCGS, 2024).
- NuS NimBLE Serial - O BLE não possui nenhum protocolo padrão para realizar a comunicação serial, para isso foi utilizado o NuS (*Nordic UART Service*), essa biblioteca foi utilizada para realizar o envio dos dados para o dispositivo móvel (AFPINEDA, 2024).

O programa que é executado continuamente no microcontrolador segue o fluxo ilustrado na figura seguinte.

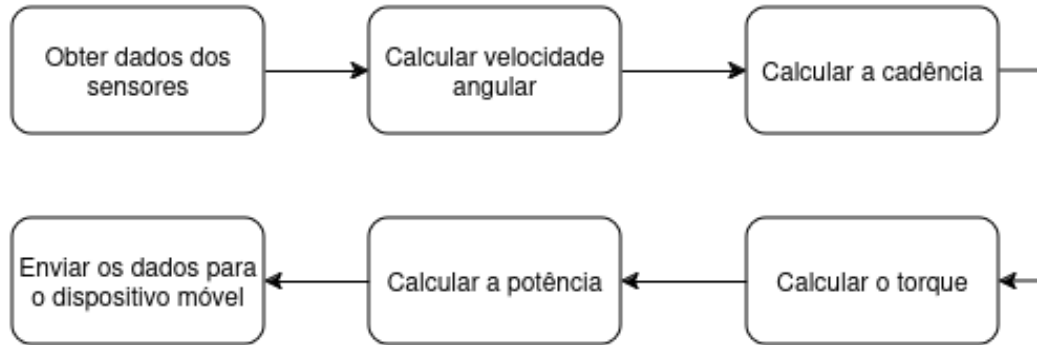


Figura 26: Fluxo de dados no programa.

Fonte: Autoria própria

3.4.1 Tratamento de dados e calibração

A coleta foi realizada com uma frequência de 10Hz, retornando a média das amostras a cada segundo. Antes de serem utilizados os dados precisaram ser tratados. O módulo BMI-160 retorna as informações do giroscópio para cada eixo em graus/segundo, então para obter o módulo da velocidade angular é necessário somar os módulos das velocidades em cada eixo seguindo a seguinte equação:

$$|\omega| = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2} \quad (8)$$

Com o módulo da velocidade angular podemos calcular a cadência, convertendo ela de graus/segundo para RPM com a equação:

$$\omega_{rpm} = \omega_{graus/s} \times \frac{2\pi}{60} \quad (9)$$

Para calcular a potência é necessário calcular a velocidade angular em radianos/segundo:

$$\omega_{rad/s} = \omega_{graus/s} \times \frac{2\pi}{360} \quad (10)$$

A ponte de Wheatstone retorna um valor de pequena amplitude, por isso o sinal é amplificado pelo módulo HX711. O valor de tensão obtido é relacionado com a força aplicada. O processo de calibração do sistema foi feito de modo estático, posicionando o pedivela perpendicular ao chão e acoplado pesos conhecidos ao pedal para o cálculo do torque desenvolvido pela pedalada. A massa dos pesos foi aferida com uma balança de precisão, para o cálculo do peso foi utilizada a relação $1000g = 9,8N$ e o torque foi obtido multiplicando o peso pelo tamanho do pedivela em metros $0,175m$.

Massa [g]	Peso [N]	Torque [N.m]	Média das leituras [μV]
500	4,9	0,8575	8394
750	7,35	1,28625	12430,1
1000	9,8	1,715	16492,2
1250	12,25	2,14375	20675,5
1500	14,7	2,5725	24672,7
2000	19,6	3,43	32175,8
2400	23,52	4,116	39962,5
3550	34,79	6,08825	57708,7

Tabela 2: Tabela de calibração

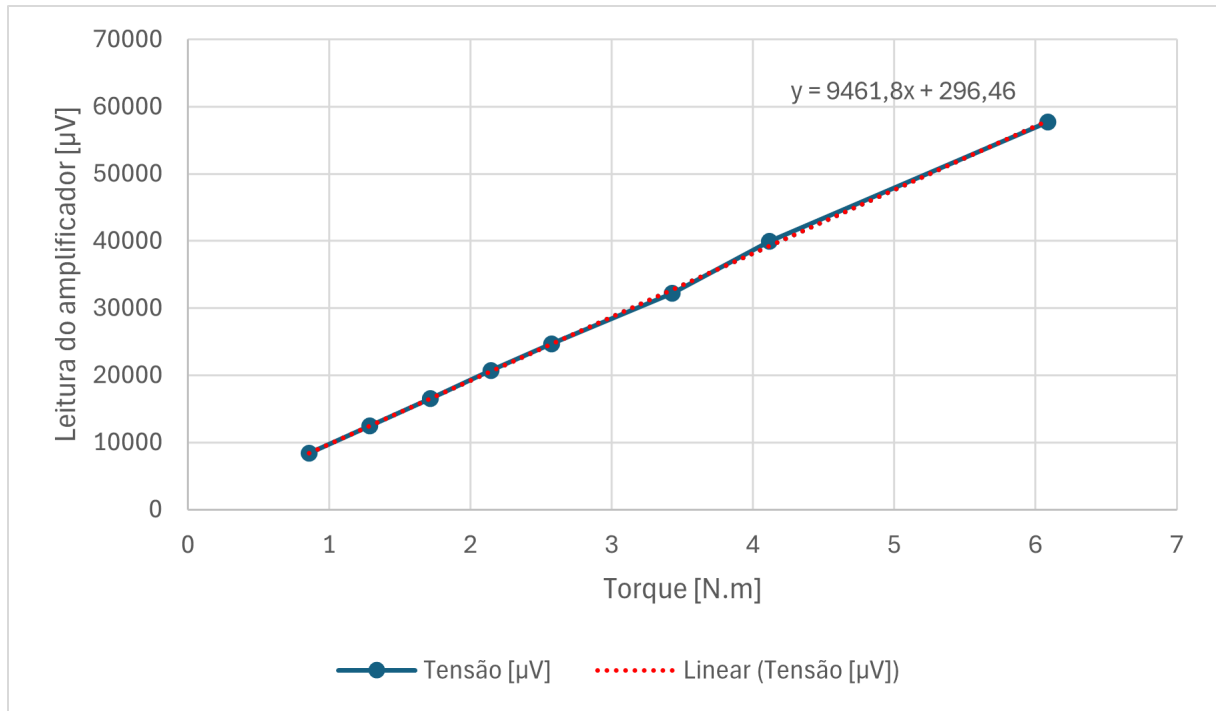


Figura 27: Curva de calibração dos extensômetros

Fonte: Autoria própria

Com esses dados foi possível relacionar o torque aplicado com a leitura do módulo HX711, e calculando a aproximação linear dos resultados foi possível obter a equação que é usada no programa para obter o torque aplicado.

$$y = 9461,8x + 296,46 \quad (11)$$

Para calcular a potência instantânea, é utilizado o torque e a velocidade angular em radianos por segundo, utilizando a seguinte equação:

$$P = \tau \times \omega_{rad/s} \quad (12)$$

3.4.2 Transmissão de dados

Os dados são enviados via BLE, é criado um servidor na ESP32 que após o cálculo dos valores envia um pacote com as seguintes informações: hora de envio, leitura do amplificador, torque, velocidade angular, potência e cadência. Para receber as informações um dispositivo móvel com aplicativo *Serial Bluetooth Terminal* se conecta com a ESP32 e salva os dados em um arquivo no formato TXT (*Plain Text File*) para análise posterior.

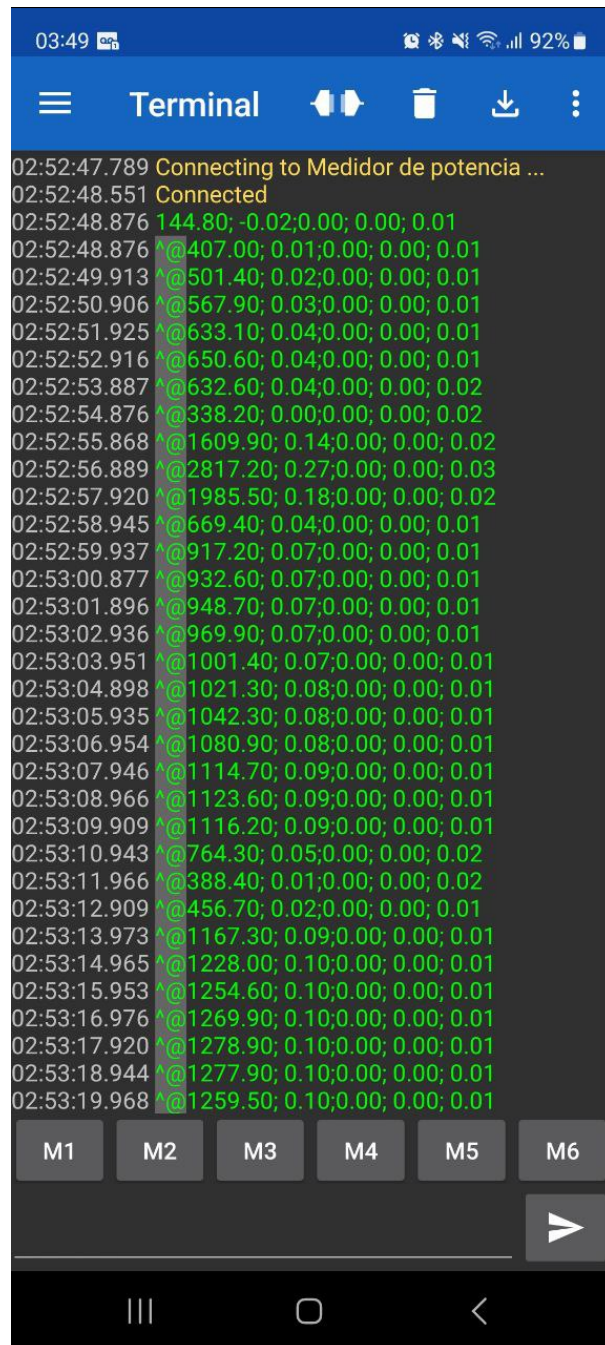


Figura 28: Dados recebidos em aplicativo

Fonte: Autoria própria

3.5 Testes de validação

Para validar as medições do protótipo foram realizados dois tipos de testes, um em ambiente controlado utilizando um rolo de treino e um na rua em uma pedalada real. Os testes foram realizados no dia 07 de maio de 2024 com poucos minutos de intervalo no período da noite, foram utilizadas sapatilhas com clipe para uma melhor fixação do pé no pedal e uma transferência de força mais eficiente para pedalada.

3.5.1 Teste interno

Com a bicicleta fixada em um rolo de treino, foi executada uma sessão de pedalada de aproximadamente 3 minutos, tentando manter o ritmo estável, mas aumentando a força aplicada ao longo do tempo para tentar visualizar a precisão das variações dos valores medidos.



Figura 29: Bicicleta posicionada no rolo de treino para teste

Fonte: Autoria própria

3.5.2 Teste externo

Para esse teste foi realizada uma pedalada de cerca de 9 minutos pelas ruas do bairro com o objetivo de aferir o comportamento do protótipo no mundo real com variações no terreno. A atividade foi registrada por um ciclocomputador com GPS (*Global Positioning System*) e sincronizada no aplicativo Strava para visualização dos dados.



Figura 30: Teste registrado no aplicativo Strava

Fonte: Autoria própria

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste tópico são apresentados os resultados e uma análise dos dados obtidos.

4.1 Resultados

Após os testes, foram exportados os arquivos no formato TXT com os dados coletados na atividade para análise.

Durante o teste interno foi observado pouca variação na cadência, o que era o esperado, pois durante todo o tempo do teste a pedalada foi constante sem pausas. A Figura 31 permite visualizar a cadência média, que foi estimada em 41,84 RPM, este resultado se mostra compatível com o percebido durante o exercício, um ritmo estável e constante.

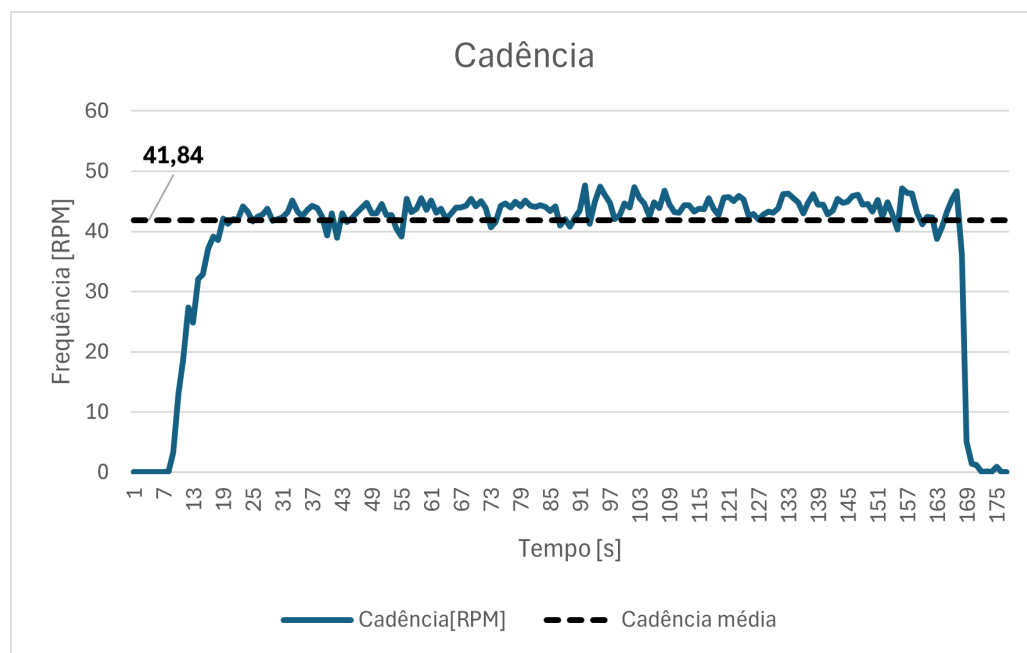


Figura 31: Cadência x Tempo - Teste interno

Fonte: Autoria própria

No teste externo, o objetivo era variar a cadência, parando de pedalar as vezes e aumentando muito o ritmo em outros momentos, esse comportamento foi bem registrado pelo dispositivo, com uma cadência média de 41,18RPM, mas com picos chegando até 96,84RPM, na Figura 32 é possível ver os valores próximos a 0 quando o pedivela não está girando.

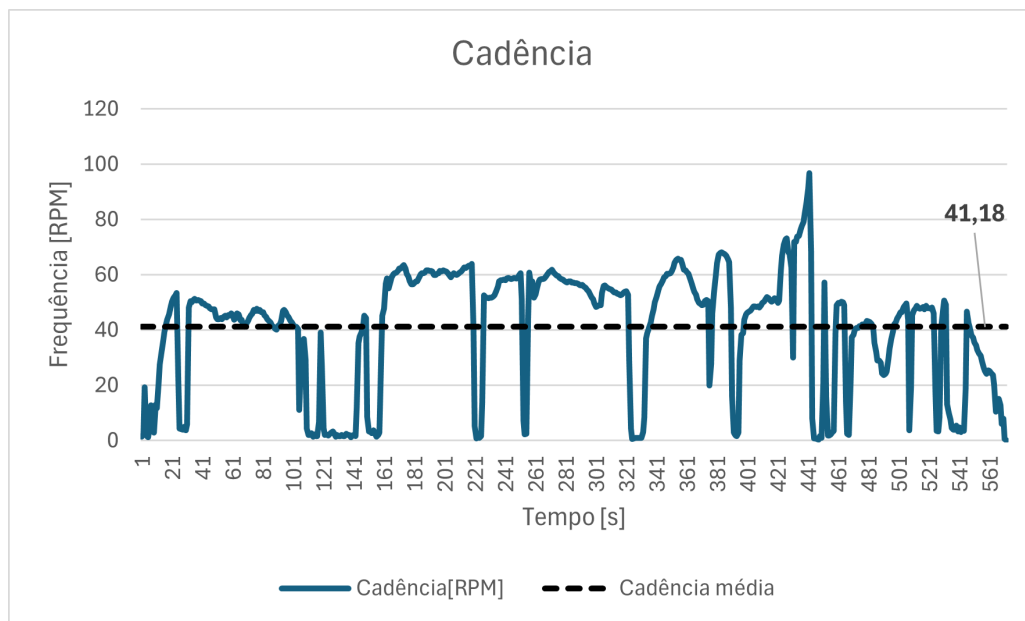


Figura 32: Cadência x Tempo - Teste externo

Fonte: Autoria própria

Os dados de potência também foram consistentes, no teste interno a potência média foi estimada em 121,56 W. A Figura 33 mostra de forma clara o ciclo da pedalada, com a potência aumentando durante a fase de empurrar e diminuindo durante a puxada lembrando que esse valor é o de potência total. Como os dados são coletados apenas em uma perna, o valor da potência total é estimado duplicando os valores obtidos. É possível visualizar o aumento da potência ao longo do tempo, esse era o comportamento esperado para esse teste.

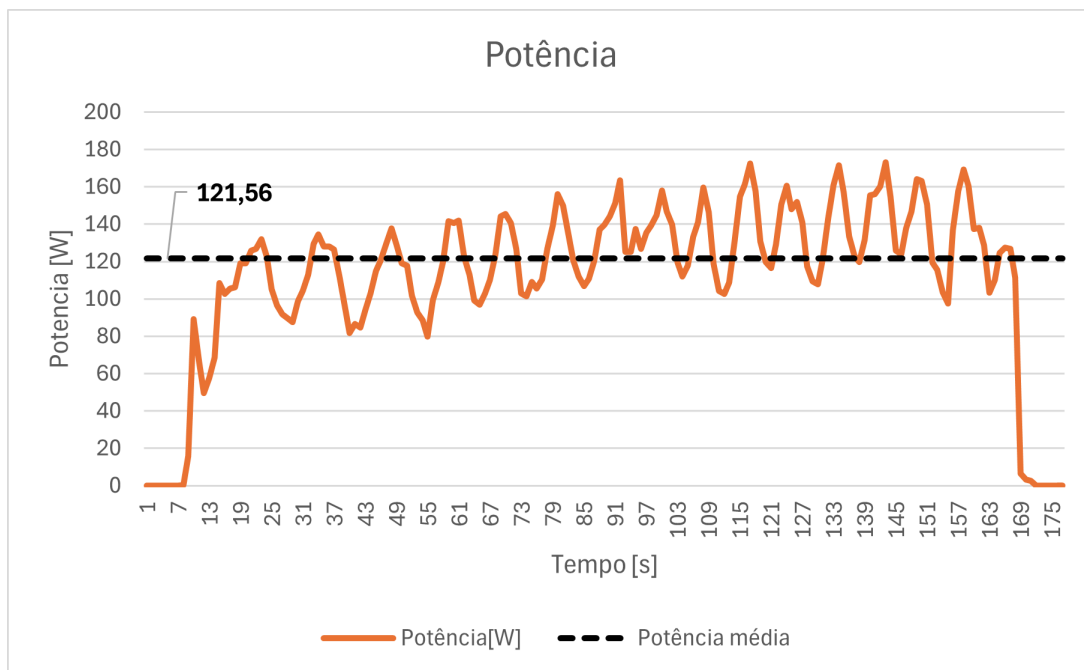


Figura 33: Potência x Tempo - Teste interno

Fonte: Autoria própria

No teste externo, ilustrado na Figura 34 é possível observar uma variação bem maior da potência medida, isso se dá pelas condições do mundo real, com a possibilidade de manter o deslocamento mesmo sem pedalar ou pedalar em pé gerando um valor bem maior de torque. Apesar de ser uma amostra maior a potência média foi menor, cerca de 108,27W, isso ocorre por causa dos momentos sem pedalar, como a potência depende da velocidade angular do pedal, se ele estiver parado mesmo com uma carga aplicada a potência vai ser um valor próximo de zero. Os picos de potência aparecem com mais frequência nessa amostra, alcançando um pico de 582,08W em determinado momento. Devido as variações de terreno, o gráfico demonstra alguns picos e vales. Os picos representam momentos em que foi realizado um *sprint*, passando a pedalar em pé aplicando mais força. Os vales representam os momentos que a pedalada foi cessada e a bicicleta seguiu seu movimento sem a necessidade de girar o pedivela.

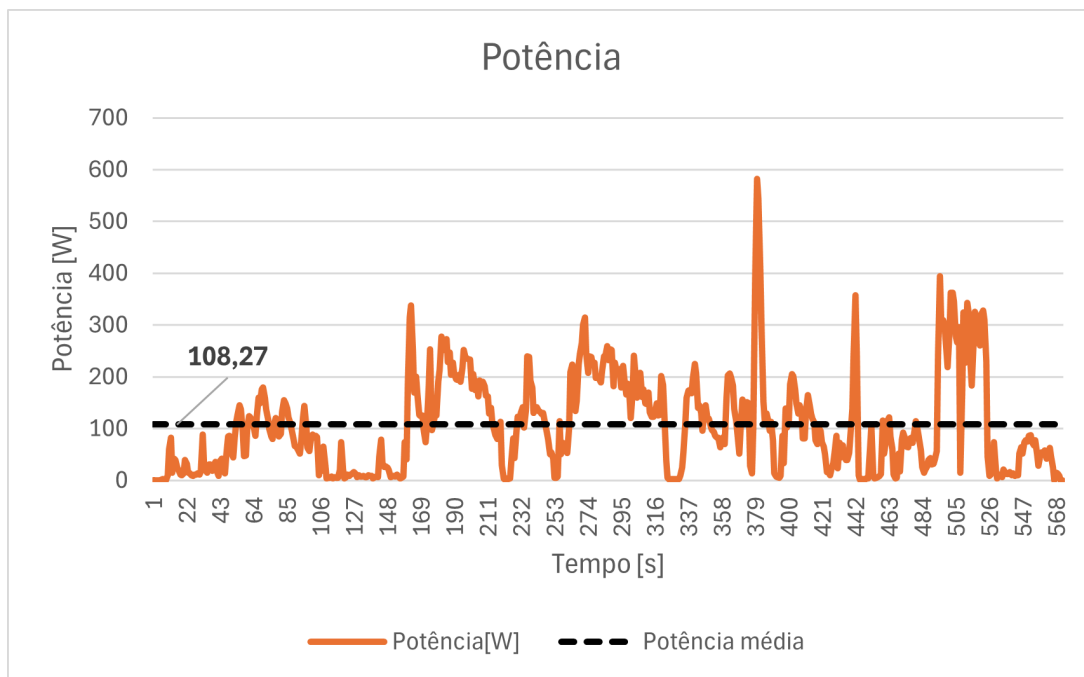


Figura 34: Potência x Tempo - Teste externo

Fonte: Autoria própria

Nos gráficos a seguir, é possível visualizar a relação entre a cadência e a potência, demonstrando a relação entre elas. Apesar de os gráficos quase se sobreporem, eles mostram que mesmo com uma cadência estável a potência aumenta ou diminui com a força aplicada e também mostra que a potência pode aumentar ou diminuir independente do valor da cadência.

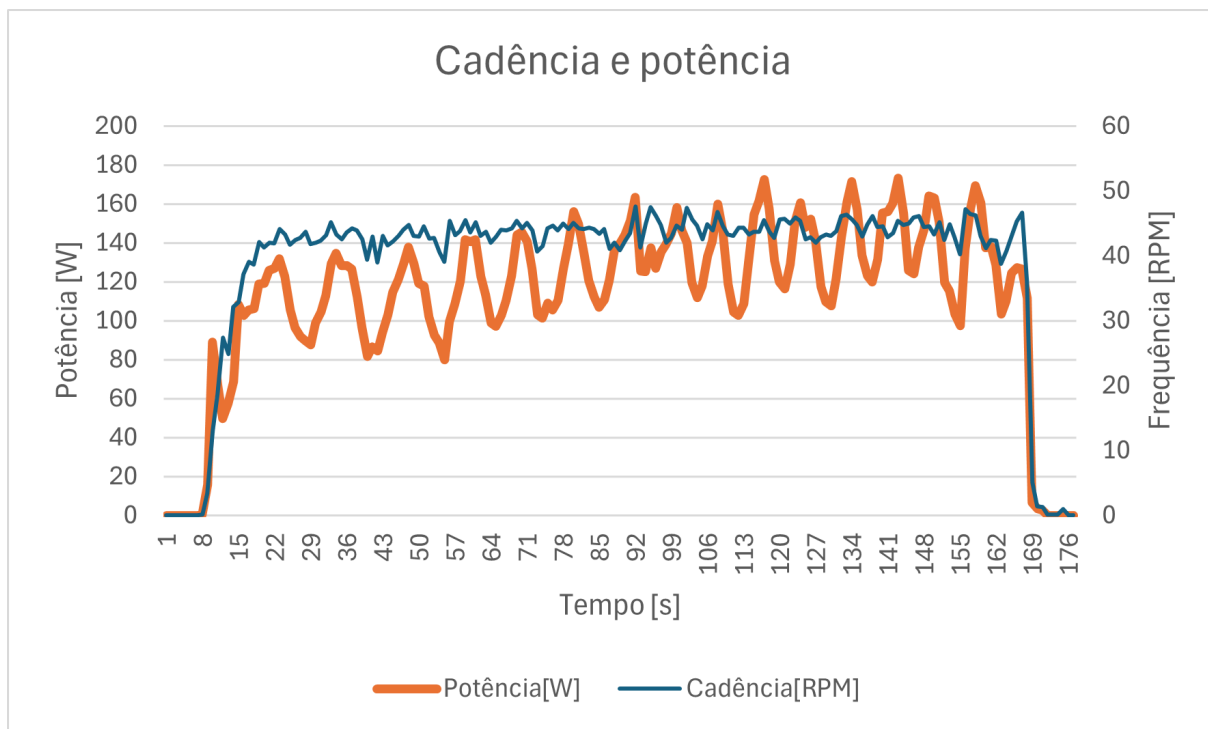


Figura 35: Cadência e Potência x Tempo - Teste interno

Fonte: Autoria própria

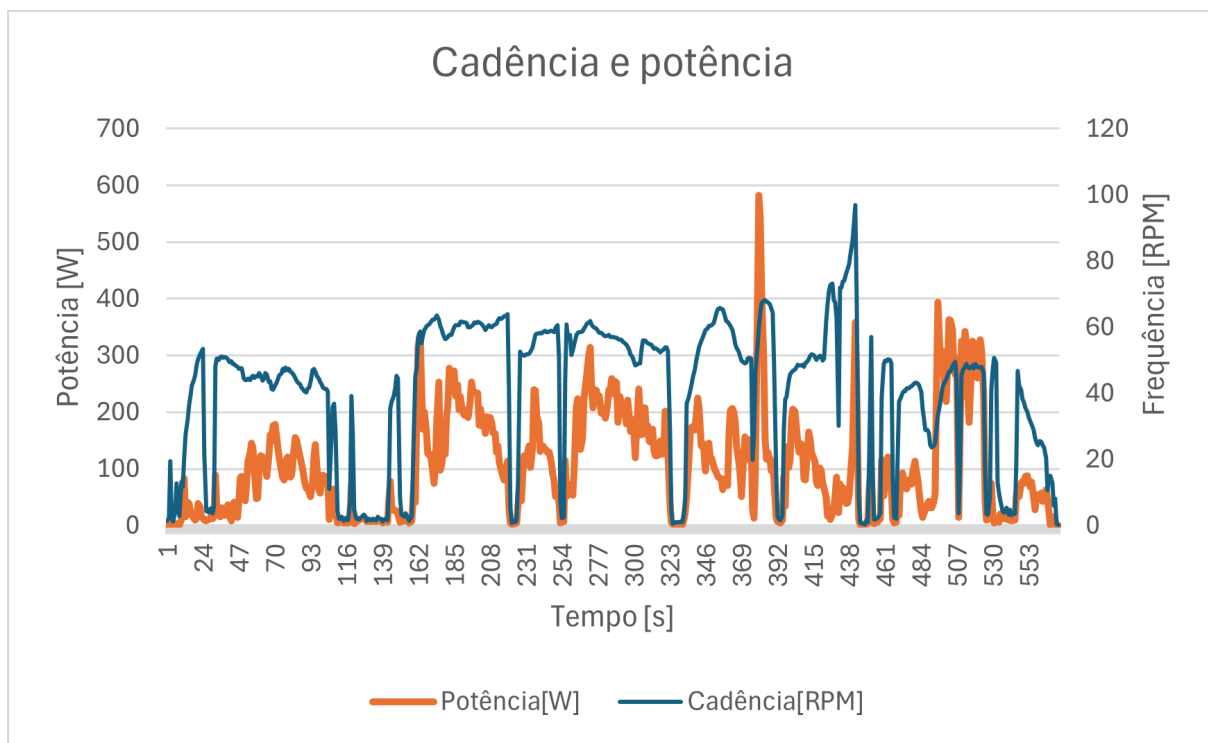


Figura 36: Cadência e Potência x Tempo - Teste externo

Fonte: Autoria própria

Apesar de analisarmos a potência instantânea, para efeitos de treino não é tão interessante conhecer o dado instantâneo. Durante uma pedalada o ciclista quer saber os dados do exercício completo ou de um trecho específico, uma função comum nos medidores de potência comerciais é fornecer esse dado em médias móveis, exibindo a potência média em intervalos de tempo e a média geral. Com isso obtendo uma saída mais suave que a apresentada.

4.2 Custos do protótipo

Um dos principais pontos que norteiam esse trabalho é o custo de um medidor de potência, como já demonstrado é um equipamento muito caro no Brasil e de difícil acesso. Todos os componentes utilizados nesse trabalho foram comprados online com frete e impostos inclusos nos valores. A tabela a seguir mostra todos os componentes utilizados, onde foram adquiridos, seu valor, quantidade, o subtotal e o total gasto.

Vale ressaltar que os valores apresentados são referentes ao custo de materiais para construir um protótipo de medidor de potência, o baixo valor pode indicar a possibilidade da construção de um produto para o mercado.

Componente	Fornecedor	Valor	Quantidade	Subtotal
Microcontrolador ESP32-C3	AliExpress	R\$ 13,10	1	R\$ 13,10
IMU BMI-160	AliExpress	R\$ 7,26	1	R\$ 7,26
Carregador TP-4056	AliExpress	R\$ 1,80	1	R\$ 1,80
Amplificador HX711	AliExpress	R\$ 7,37	1	R\$ 7,37
Extensômetro BF350-3AA	AliExpress	R\$ 1,77	4	R\$ 7,08
Bateria Li-Po 3.7v	Mercado Livre	R\$ 64,54	1	R\$ 64,54
Placa perfurada 2x8cm	Arduino e Eletrônica	R\$ 7,00	1	R\$ 7,00
Protoboard 170 furos	Arduino e Eletrônica	R\$ 8,00	1	R\$ 8,00
Jumper	Arduino e Eletrônica	R\$ 6,50	1	R\$ 6,50
TOTAL				R\$ 122,65

Tabela 3: Tabela de materiais e preços

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

O ciclismo tem se tornado cada vez mais popular no Brasil. No entanto o acesso a dispositivos de medição de parâmetros de desempenho ainda é muito restrito. As soluções tecnológicas são importantes para evolução do atleta e conquista de resultados melhores. O medidor de potência é uma ferramenta muito útil para mensurar o desempenho do ciclista, sendo muito importante para guiar a metodologia de treino, mas que tem um custo de aquisição muito alto.

Esse trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um protótipo de um medidor de potência de baixo custo e com materiais que possam ser comprados online. O dispositivo foi projetado de forma que não atrapalhe a pedalada e montado no braço esquerdo do pedivela, medindo a flexão e calculando a potência aplicada, além de também registrar a cadência do ciclista. Foram utilizados os seguintes componentes: quatro extensômetros utilizados como sensores de deformação, montados na configuração de ponte de Wheatstone completa; um módulo HX711 como amplificador; um módulo BMI-160 utilizado como giroscópio; um módulo carregador TP4056; uma bateria Li-Po capaz de fornecer 3.7V e com capacidade de 1000mAh; e um módulo ESP32-C3-super-mini como o microcontrolador responsável pelos cálculos e transmissão dos dados. O software foi escrito na linguagem C com o auxílio da Arduino IDE e bibliotecas para auxiliar na leitura dos sensores e no envio de dados via BLE.

Após a construção do protótipo, foi realizada a calibração dos sensores utilizando um método estático. Em seguida foram executados testes internos e externos para avaliar o comportamento do dispositivo nas diferentes situações. Os dados foram coletados por um aplicativo em um dispositivo móvel e salvos em formato de arquivo de texto para posterior análise. O teste interno foi realizado com o auxílio de um rolo de treino, já o externo consistiu em um passeio na rua. Os resultados são compatíveis com os esperados de um ciclista amador, o que comprova o correto funcionamento do protótipo desenvolvido.

Como este trabalho produziu um protótipo inicial, vários aspectos podem ser melhorados em oportunidades futuras. O circuito pode ser impresso em uma placa com o objetivo de eliminar os fios e diminuir mais o tamanho do dispositivo. Outra melhoria física seria projetar uma caixa para que os componentes ficassem protegidos da água e da poeira. Uma melhoria significativa seria integrar um módulo GPS para aquisição da velocidade, do deslocamento e da altimetria, para conseguir calcular métricas mais precisas. Também é importante realizar uma validação com os medidores de potência que estão disponíveis no mercado para garantir a confiabilidade da informação em face do que já está consolidado.

REFERÊNCIAS

AFPINEDA. **NuS-NimBLE-Serial**. Disponível em: <<https://github.com/afpineda/NuS-NimBLE-Serial>>. Acesso em: 7 Mai. 2024.

ALLEN, Hunter; COGGAN, Andrew R.; MCGREGOR, Stephen. **Training and racing with a power meter**. VeloPress, 2019.

ANDOLFATO, Rodrigo Piernas; CAMACHO, Jefferson Sidney; BRITO, GA de. Extensometria básica: **Ilha**, 2004.

BARROS, Edna; CAVALCANTE, Sérgio. Introdução aos sistemas embarcados. **Artigo apresentado na Universidade Federal de Pernambuco-UFPE**, p. 36, 2010.

BESTECH. **Understanding a Wheatstone Bridge Strain Gauge Circuit**. Disponível em: <<https://www.bestech.com.au/blogs/understanding-a-wheatstone-bridge-strain-gauge-circuit/>>. Acesso em: 25 Abr. 2024.

BOSCH SENSORTEC. **BMI160**. Disponível em: <<https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bmi160-ds000.pdf>>. Acesso em: 2 Mai. 2024.

CALOI. **MOAB**. Disponível em: <<https://caloi.com/produto/moab/>>. Acesso em: 23 Abr. 2024.

CASA DA ROBÓTICA. **Modulo Hx711 ADC 24 Bits Célula de Carga / Peso** . Disponível em: <<https://www.casadarobotica.com/modulo-hx711-adc-24-bits-celula-de-carga-peso-arduino-pic-pi>>. Acesso em: 2 Mai. 2024.

CERVELÓa. **Favero Assioma Duo** . Disponível em: <<https://cervelobr.com/produtos/favero-assioma-duo-pedal-com-medidor-de-potencia-duplo/>>. Acesso em: 23 Abr. 2024.

CERVELÓb. **SIGEYI SPIDER** . Disponível em: <<https://cervelobr.com/produtos/sigeyi-spider-axo-mtb-shimano-4-parafusos-104bcd/>>. Acesso em: 23 Abr. 2024.

COELHO, M. S.; MORILLA, J. C. Efeito da não linearidade na medição de extensômetros com ponte de wheatstone. **ANAIS DO TERCEIRO ENCONTRO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO DA UNISANTA**, p. 28, 2014.

COMITÊ OLÍMPICO DO BRASIL. **Orientações para monitoramento da carga interna, recuperação e bem-estar**. Disponível em: <<https://www.cob.org.br/pt/documentos/download/33d2e22fa4d4b>>. Acesso em: 25 Abr. 2024.

CONFEDERAÇÃO BRASILEIRA DE CICLISMO. **Relatório de atividades**. Disponível em: <<https://transparenciaconf.cob.org.br/cbc/relatorio-de-atividades/>>. Acesso em: 23 Abr. 2024.

CUNHA, Alessandro F. O que são sistemas embarcados. **Saber Eletrônica**, v. 43, n. 414, p. 1-6, 2007.

ESPHOME. **BMI160 Accelerometer/Gyroscope Sensor**. Disponível em: <<https://esphome.io/components/sensor/bmi160.html>>. Acesso em: 2 Mai. 2024.

ESPRESSIFa. **ESP32 Series Datasheet**. Disponível em: <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf>. Acesso em: 2 Mai. 2024.

ESPRESSIFb. **ESP32-C3-MINI-1 ESP32-C3-MINI-1U Datasheet**. Disponível em: <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c3-mini-1_datasheet_en.pdf>. Acesso em: 2 Mai. 2024.

FRIEL, Joe. **The power meter handbook: a user's guide for cyclists and triathletes**. VeloPress, 2012.

FORHAN, Neisy Amparo Escobar; SENNA, José Roberto Sbragia. Giroscópios mems. **mems. urlib. net/sid. inpe. br/mtc-m19**, v. 80, p. 01.25, 2010.

GARMINSTORE. **Garmin Rally XC**. Disponível em: <<https://www.garminstore.com.br/pedal-com-medidor-de-potencia-garmin-rally-xc/p?skuId=53831>>. Acesso em: 23 Abr. 2024.

GHARGHAN, Sadik Kamel; NORDIN, Rosdiadee; ISMAIL, Mahamod. Development and validation of a track bicycle instrument for torque measurement using the zigbee wireless sensor network. **International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems**, v. 10, n. 1, p. 1-22, 2017.

LAZZARI, Caetano Decian. **Desenvolvimento e estudo de uma plataforma biomecânica 2D aplicada ao ciclismo**. 2010.

LIQUIDCGS. **FastIMU**. Disponível em: <<https://github.com/LiquidCGS/FastIMU>>. Acesso em: 7 Mai. 2024.

MAKER HERO. **Saiba como funciona o carregador de bateria TP4056**. Disponível em: <<https://www.makerhero.com/blog/saiba-como-funciona-o-modulo-tp4056/>>. Acesso em: 2 Mai. 2024.

MCGUAN, Andrew. **Bicycle Power Meter**. 2018.

Michigan Scientific Corporation. **What is a Strain Gauge and How Does it Work?**. Disponível em: <<https://www.michsci.com/what-is-a-strain-gauge/>>. Acesso em: 25 Abr. 2024.

OLKAL. **HX711_ADC**. Disponível em: <https://github.com/olkal/HX711_ADC>. Acesso em: 7 Mai. 2024.

OLYMPICS. **O legado de Henrique Avancini para o mountain bike presente no Pan 2023**. Disponível em: <<https://olympics.com/pt/noticias/legado-henrique-avancini-mountain-bike-brasil>>. Acesso em: 23 Abr. 2024.

SARAVATI. **Strain Gauge BF350-3AA**. Disponível em: <<https://www.saravati.com.br/strain-gauge-bf350-3aa-extensometro-transdutor-fio.html>>. Acesso em: 2 Mai. 2024.

SELLI, Romar. **Análise experimental de estruturas utilizando extensômetros elétricos**. 2015. Monografia, Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2015.

SPARKFUN. **24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales**. Disponível em: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711_english.pdf>. Acesso em: 2 Mai. 2024.

SPOKES. **MEDIDOR DE POTÊNCIA MTB ROTOR INPOWER**. Disponível em: <<https://www.spokes.com.br/componentes/medidor-potencia-rotor-inpower-mtb>>. Acesso em: 23 Abr. 2024.

SRAM. **Quarq PowerTap G3 Hub**. Disponível em: <<https://www.sram.com/en/service/models/hu-pwtp-g3r-a1/>>. Acesso em: 23 Abr. 2024.

STRAVA. **Strava publica o Ano Esportivo 2023: um relatório de tendências que revela o que motiva e o que desanima as diferentes gerações**. Disponível em: <<https://press.strava.com/pb/articles/strava-releases-year-in-sport-trend-report>>. Acesso em: 23 Abr. 2024.

STUHLER, Jackson. Utilização de MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems–sistemas microeletromecânico) para aplicações de circuitos de baixo custo de movimentação e sensoramento. **Metodologias e Aprendizado**, v. 5, p. 82-91, 2022.

THE BIKERS SHOP. **Medidor de Potencia Quarq Spider Dzero DUB 110 BCD**. Disponível em: <<https://thebikersshop.com.br/produtos/medidor-de-potencia-quarq-spider-dzero-dub-110-bcd/>>. Acesso em: 23 Abr. 2024.

U2E. **V4 Instalação de fábrica**. Disponível em: <<https://u2e.com.br/loja/sp1-instalacao-de-fabrica/v3-instalacao-de-fabrica-shimano-mtb-slx-xt-xtr/>>. Acesso em: 23 Abr. 2024.

VIEIRA, Mário Elias Marinho; GONÇALVES, Victor Camargo. **Medidor de potência fisiológica para ciclistas: desenvolvimento do protótipo**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.

VOELZ, Arthur Augusto. **Estudo sobre a utilização de extensômetros elétricos para a análise experimental de estruturas de concreto armado**. 2019. Monografia, Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2019.

WEBER, Albano Luiz. **Metrologia e instrumentação–Extensometria. Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul**, 2009.