



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Ricardo Schmidt Gonçalves

**Rolo de treinamento *indoor* para ciclismo**

Florianópolis  
2023

Ricardo Schmidt Gonçalves

**Rolo de treinamento *indoor* para ciclismo**

Relatório final da disciplina DAS5511 (Projeto de Fim de Curso) como Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Santa Catarina em Florianópolis.

Orientador: Prof. Rodolfo César Costa Flesch, Dr.

Florianópolis  
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Gonçalves, Ricardo Schmidt

Rolo de treinamento indoor para ciclismo / Ricardo  
Schmidt Gonçalves ; orientador, Rodolfo César Costa Flesch,  
2023.

67 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,  
Graduação em Engenharia de Controle e Automação,  
Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia de Controle e Automação. 2. ciclismo. 3.  
instrumentação. 4. sensores. 5. potência. I. Flesch,  
Rodolfo César Costa. II. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Graduação em Engenharia de Controle e Automação.  
III. Título.

Ricardo Schmidt Gonçalves

**Rolo de treinamento *indoor* para ciclismo**

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina DAS5511 (Projeto de Fim de Curso) e aprovada em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

Florianópolis, 30 de junho de 2023.

Prof. Hector Bessa Silveira, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

Prof. Rodolfo César Costa Flesch, Dr.  
Orientador e Supervisor  
UFSC/CTC/DAS

Prof. Hector Bessa Silveira, Dr.  
Avaliador  
UFSC/CTC/DAS

Prof. Eduardo Camponogara, Dr.  
Presidente da Banca  
UFSC/CTC/DAS

“Wyrð bið ful āræd - O destino é inexorável” - Uhtred de  
Bebbanburg em As Crônicas Saxônicas

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente ao meu pai, mãe e avós por proverem a estrutura necessária para que eu possa me empenhar somente nos estudos e conseqüentemente em um profissional com curso superior. Aos meus amigos e colegas de curso pelo apoio e paciência nessa jornada longa e árdua, em especial ao Willian, Mariana e Nicolas que me ajudaram muito com conselhos, ensinamentos e mais do que amigos, são como irmãos para mim. E obrigado também ao ciclismo, um esporte com o qual me identifiquei profundamente, funcionando como uma válvula de escape das rotinas e que acabou motivando o tema desta monografia.

## DECLARAÇÃO DE PUBLICIDADE

Florianópolis, 30 de junho de 2023.

Na condição de representante da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) na qual o presente trabalho foi realizado, declaro não haver ressalvas quanto ao aspecto de sigilo ou propriedade intelectual sobre as informações contidas neste documento, que impeçam a sua publicação por parte da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) para acesso pelo público em geral, incluindo a sua disponibilização *online* no Repositório Institucional da Biblioteca Universitária da UFSC. Além disso, declaro ciência de que o autor, na condição de estudante da UFSC, é obrigado a depositar este documento, por se tratar de um Trabalho de Conclusão de Curso, no referido Repositório Institucional, em atendimento à Resolução Normativa n° 126/2019/CUn.

Por estar de acordo com esses termos, subscrevo-me abaixo.

---

Prof. Rodolfo César Costa Flesch, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

## RESUMO

Rolos de treinamento para ciclismo têm papel importante nos treinamentos de atletas amadores e profissionais, pois propiciam um meio controlado e seguro para a prática esportiva. A chegada dos rolos dotados de instrumentação e que apresentam os dados do desempenho para o usuário de forma on-line por meio de interface gráfica em computadores ou *smartphones* (chamados comumente de rolos *smart*) forneceu ao ciclista informações valiosas durante a prática esportiva. Além disso, a conexão com aplicativos de simulação tornou a prática mais divertida e competitiva, pois os dados podem ser comparados com os de outros ciclistas. No Brasil, o preço de rolos *smart* é elevado, principalmente pela dependência de fornecedores estrangeiros. Este trabalho propõe uma arquitetura de mais baixo custo que as alternativas comerciais, mas capaz de proporcionar ao ciclista dados confiáveis de seu treino controlado e interação com os principais aplicativos empregados para treinos de ciclismo. Um protótipo da arquitetura foi construído empregando comunicação via *Bluetooth Low Energy* com um simulador e fornecendo dados de cadência (rotações por minuto), velocidade, potência e outras informações pertinentes ao treino. O protótipo obteve resultados satisfatórios na apresentação dos dados e na comunicação com um simulador, proporcionando dados reais que podem ser usados para estudos de desempenho e uma experiência mais agradável para os treinos. Por fim, o valor investido na construção do protótipo se mostrou relativamente baixo e promissor em comparação com rolos de treinamento que possuem as mesmas funções, com um valor estimado da ordem de 40% do custo de um produto comercial.

**Palavras-chave:** Rolo de treinamento. Cadência. Velocidade. Potência. Simuladores. Comunicação Bluetooth Low Energy (BLE). Ciclismo.



## ABSTRACT

Training rollers for cycling play an important role in the training of amateur and professional athletes, as they provide a controlled and safe means for sports practice. The arrival of instrumented rollers that display performance data to the user in real-time through a graphical interface on computers or smartphones (commonly referred to as smart rollers) has provided cyclists with valuable information during their sports practice. Additionally, the integration with simulation applications has made the practice more enjoyable and competitive, as the data can be compared with that of other cyclists. In Brazil, the price of smart rollers is high, mainly due to dependence on foreign suppliers. This work proposes a lower-cost architecture compared to commercial alternatives, capable of providing reliable data to the cyclist during controlled training and interaction with the main cycling training applications. A prototype of the architecture was built, employing communication via Bluetooth Low Energy with a simulator and providing data such as cadence, speed, power, and other relevant training information. The prototype achieved satisfactory results in data presentation and communication with a simulator, providing real data that can be used for performance studies and a more enjoyable training experience. Finally, the investment in the construction of the prototype proved to be relatively low and promising compared to training rollers with the same functions, with an estimate building cost which is 40% of that from commercial off-the-shelf products.

**Keywords:** Cycling Trainer. Cadence. Speed sensor. Power meter. Simulators. BLE communication. Cycling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Rolo de treinamento smart do tipo <i>Direct Drive</i> . . . . .	19
Figura 2 – Electronic Speed Controller (ESC) e sua função entre a fonte de energia e o motor. . . . .	22
Figura 3 – Diagrama de um <i>reed switch</i> . . . . .	24
Figura 4 – Sensor infravermelho utilizado em projetos com microcontroladores. . . . .	24
Figura 5 – Arduino UNO. . . . .	28
Figura 6 – ESP32 modelo padrão. . . . .	29
Figura 7 – Tabela comparativa entre placas de desenvolvimento. . . . .	30
Figura 8 – Apresentação dos dados no simulador Bkool. . . . .	32
Figura 9 – Apresentação dos dados no simulador Zwift. . . . .	33
Figura 10 – Modelo conceitual do protótipo. . . . .	34
Figura 11 – Tipos de bicicletas que podem ser utilizadas no rolo de treinamento. . . . .	35
Figura 12 – Estrutura de um rolo simples utilizado como base para o rolo <i>smart</i> . . . . .	35
Figura 13 – Exemplo de <i>hoverboard</i> . . . . .	36
Figura 14 – Motor <i>brushless</i> de 36 V de tensão e 250 W de potência. . . . .	36
Figura 15 – Motor aberto para identificação da quantidade de polos. . . . .	37
Figura 16 – Mancal instalado para posicionar corretamente o motor. . . . .	38
Figura 17 – Vedder Electronic Speed Controller (VESC) modelo Mini FSESC4.20 da empresa FlipSky para motores de corrente contínua sem escovas trifásicos. . . . .	38
Figura 18 – Sensor infravermelho utilizado para as medições de cadência. . . . .	39
Figura 19 – Sensor infravermelho instalado na bicicleta. . . . .	40
Figura 20 – Fonte de bancada de 30 V e 10 A. . . . .	40
Figura 21 – 10 células de 3,7 V e 100 Ah conectadas em série. . . . .	41
Figura 22 – Equipamento responsável por balancear, carregar e medir a resistência interna das células. . . . .	42
Figura 23 – Tela de abertura de pareamento dos sensores do Zwift. . . . .	43
Figura 24 – Tabela do bit de definição das características de <i>bike indoor</i> . . . . .	47
Figura 25 – Rolo de treinamento construído com bicicleta acoplada. . . . .	49
Figura 26 – Envio dos dados via Fitness Machine Service (FTMS) para o simulador através do ESP32. . . . .	50
Figura 27 – Dados fixos de potência e cadência enviados via FTMS para o simulador. . . . .	51
Figura 28 – Sensor de cadência e velocidade da Magene utilizado para validação. . . . .	51
Figura 29 – Sensor de potência da empresa Fávero Assioma, modelo UNO. . . . .	52
Figura 30 – Ciclocomputador da empresa Garmin, modelo 830 Edge, utilizado para a validação dos dados. . . . .	52

Figura 31 – Sensor de cadência da Magene instalado na bicicleta. . . . .	53
Figura 32 – Aplicativo da empresa Magene para configuração dos sensores de cadência e velocidade. . . . .	53
Figura 33 – Garmin configurado para medições de velocidade e de cadência. . .	54
Figura 34 – Comparação de resultados entre os sensores utilizando o Garmin Edge 830. . . . .	54
Figura 35 – Comparação de resultados da cadência entre o sensor da Magene e o sensor do rolo de treinamento. . . . .	55
Figura 36 – Pedal com medidor de potência da Fávero Assioma. . . . .	56
Figura 37 – Configuração do comprimento do pedivela onde está anexado o pedal medidor de potência no aplicativo. . . . .	56
Figura 38 – Configuração do comprimento do pedivela onde está anexado o pedal medidor de potência no Garmin. . . . .	57
Figura 39 – Comparação de potência do sensor Fávero Assioma com o do rolo de treinamento. . . . .	58
Figura 40 – Ajuste de curva para cálculo da potência esperada. . . . .	58
Figura 41 – Medidas de roda e pneus informados para o ciclocomputador para cálculo da velocidade. . . . .	59
Figura 42 – Velocidade informada no Zwift. . . . .	60
Figura 43 – Relação entre medições de velocidade no Garmin e no rolo de treinamento. . . . .	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores das resistências elétricas internas de cada célula do banco de baterias. . . . .	43
Tabela 2 – Preços de custo dos componentes do projeto. . . . .	48

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	Conversor Analógico para Digital
ANT+	Advanced and Adaptive Network Technology
BLDC	Brushless Direct Current
BLE	Bluetooth Low Energy
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DAC	Conversor Digital para Analógico
ESC	Electronic Speed Controller
FTMS	Fitness Machine Service
GPIO	General Purpose Input/Output
I2C	Inter-Integrated Circuit
LED	Light Emitting Diode
MTB	Mountain Bike
PWM	Pulse Width Modulation
RAM	Random Access Memory
RPM	Rotações por Minuto
SPI	Serial Peripheral Interface
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
USB	Universal Serial Bus
VESC	Vedder Electronic Speed Controller

## LISTA DE SÍMBOLOS

$V$	Velocidade
$\pi$	Número pi
$r$	Raio do motor
$N$	Rotação por minuto do motor
$\eta$	Número de par de polos do motor
$P_m$	Potência do motor
$\omega_1$	Velocidade angular do motor
$P'_m$	Potência do motor mais ciclista
$\omega_2$	Velocidade angular do motor mais ciclista
$\Delta P$	Potência aplicada pelo ciclista no sistema

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
1.1	OBJETIVOS	17
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo Geral</b>	<b>17</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>17</b>
1.2	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	17
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>19</b>
2.1	ROLO DE TREINAMENTO <i>SMART</i>	19
2.2	CADÊNCIA, VELOCIDADE E POTÊNCIA	20
2.3	HARDWARE	21
<b>2.3.1</b>	<b>Motor Elétrico</b>	<b>21</b>
2.3.1.1	Controlador Eletrônico de Velocidade	22
<b>2.3.2</b>	<b>Transdutores</b>	<b>23</b>
2.3.2.1	<i>Reed Switch</i>	23
2.3.2.2	Sensor Infravermelho	24
2.4	COMUNICAÇÃO	25
<b>2.4.1</b>	<b><i>Advanced and Adaptive Network Technology (ANT+)</i></b>	<b>25</b>
<b>2.4.2</b>	<b><i>Bluetooth Low Energy (BLE)</i></b>	<b>26</b>
<b>2.4.3</b>	<b><i>Fitness Machine Service (FTMS)</i></b>	<b>27</b>
2.5	PROCESSAMENTO	27
<b>2.5.1</b>	<b>Arduino</b>	<b>28</b>
<b>2.5.2</b>	<b>ESP32</b>	<b>28</b>
2.6	SIMULADORES	29
<b>2.6.1</b>	<b>Bkool</b>	<b>31</b>
<b>2.6.2</b>	<b>Zwift</b>	<b>32</b>
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO</b>	<b>34</b>
3.1	ESTRUTURA FÍSICA	34
<b>3.1.1</b>	<b>Motor e Controlador</b>	<b>36</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Instalação do Sensor de Cadência</b>	<b>39</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Alimentação</b>	<b>39</b>
3.2	AQUISIÇÃO DE DADOS	43
<b>3.2.1</b>	<b>Cadência</b>	<b>44</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Velocidade</b>	<b>44</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Potência do Ciclista</b>	<b>45</b>
3.3	COMUNICAÇÃO COM O SIMULADOR ZWIFT	46
3.4	ORÇAMENTO E PREÇO FINAL DO PROTÓTIPO	48
<b>4</b>	<b>VALIDAÇÃO</b>	<b>49</b>
4.1	COMUNICAÇÃO ENTRE ROLO DE TREINAMENTO E SIMULADOR	49

4.2	VERIFICAÇÃO DO ENVIO DE DADOS PARA O SIMULADOR . . . .	50
4.3	VALIDAÇÃO DOS DADOS DE CADÊNCIA, POTÊNCIA E VELOCIDADE	51
4.3.1	<b>Cadência</b> . . . . .	<b>52</b>
4.3.2	<b>Potência</b> . . . . .	<b>55</b>
4.3.3	<b>Velocidade</b> . . . . .	<b>58</b>
5	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> . . . . .	<b>62</b>
5.1	CONCLUSÕES . . . . .	62
5.2	PERSPECTIVAS FUTURAS . . . . .	62
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>64</b>



## 1 INTRODUÇÃO

O treinamento de atletas amadores e profissionais de ciclismo, de modo independente da modalidade, geralmente utiliza o espaço externo, ou seja, as ruas, estradas, montanhas, trilhas, velódromos e outros, para medir o desempenho e colher dados de desempenho. Por se tratar de um esporte praticado predominantemente em espaços externos, as variáveis climáticas não têm como ser desprezadas e acabam influenciando no desempenho e nos dados adquiridos ao longo do treino. Pode-se citar como exemplo um dia chuvoso, com muito vento ou tráfego intenso de veículos, o qual irá alterar diretamente os dados de cadência, velocidade, potência e frequência cardíaca que o ciclista precisa desempenhar para manter o planejamento do treino. Essas variáveis ambientais pode acabar mascarando as informações e resultando em dados distorcidos de rendimento do atleta.

As informações de desempenho tipicamente são baseadas em medições de dados como cadência, que é as rotações por minuto que o ciclista realiza, velocidade média e instantânea, potência e frequência cardíaca Langeani (2018). Os sensores e transdutores necessários para obtenção desses dados são acoplados à bicicleta e ao ciclista e os dados são adquiridos por meio de mini computadores, usualmente chamados de ciclocomputadores, em que o atleta pode acompanhar seus dados durante o treino. Apesar de essa abordagem baseada em ciclocomputadores permitir o acompanhamento on-line das medições, ela não resolve a questão das influências do ambiente nos resultados medidos. É importante reforçar que os treinos em ambiente externo, ou *outdoor*, ainda são os mais representativos das condições reais de prova, pois não existe ciclismo em condições ideais de clima. Entretanto, a possibilidade de ter dados coletados em ambiente controlado é uma importante aliada no desenvolvimento do atleta, pois permite um acompanhamento mais fiel das variáveis de interesse.

Como forma de permitir avaliar o desempenho de atletas sem o efeito de condições ambientais e permitir o treino em condições mais favoráveis e seguras, surgiu uma nova modalidade de equipamentos para uso em um ambiente controlado sendo um complemento aos treinos em ambiente *outdoor*. Esses equipamentos, chamados de rolo de treinamento *smart*, são a evolução dos rolos de treinamento comuns em que o ciclista simplesmente pedalava em uma estrutura física que mantinha a bicicleta imóvel apenas girando a roda, sem obter muitas das informações relevantes sobre o seu desempenho. Os rolos *smart* agregam as funcionalidades de duas tecnologias bem consolidadas: o treinamento *indoor* sem aquisição de dados e o treinamento *outdoor* provido de sensores. Assim, com essa tecnologia, o atleta passa a ter um treino em ambiente controlado e informações relevantes para avaliar seu desempenho.

## 1.1 OBJETIVOS

O projeto consiste na construção de um rolo de treinamento funcional com foco em atletas amadores e entusiastas de ciclismo, que gostariam de visualizar seus dados de maneira online e que não necessitam de uma precisão tão alta em comparação com atletas profissionais, e dentre os objetivos que se pretende alcançar são comunicação com simuladores existentes no mercado e o desenvolvimento de sistemas de medição para as variáveis de interesse.

### 1.1.1 Objetivo Geral

Construir e validar o protótipo de um rolo de treinamento *smart* que se comunique com um dos simuladores existentes no mercado. O protótipo compreenderá software para a comunicação com o simulador e *hardware* para a estrutura física, na qual estarão acoplados o motor e os sensores.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Conceber um protótipo funcional de um rolo de treinamento *smart*;
- Utilizar um software para comunicação do rolo de treinamento com o simulador;
- Desenvolver sistemas de medição e de condicionamento de cadência, velocidade e potência do ciclista, apresentando os dados de modo on-line;
- Validar os dados adquiridos em condições representativas de treino.

## 1.2 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

O presente documento está dividido em cinco capítulos. O capítulo 2 busca prover a fundamentação teórica necessária para o entendimento do trabalho como um todo, detalhando as tecnologias que podem ser utilizadas para o desenvolvimento do projeto. Por exemplo o estudo de sensores, do tipo de comunicação, do simulador, do motor e de seus componentes, além da estrutura física ao qual serão acoplados todos os elementos.

O capítulo 3 apresenta o detalhamento da construção do protótipo proposto, detalhando o processo de acoplamento do motor e dos sensores à estrutura, a implementação dos protocolos de comunicação e a integração do protótipo com o simulador.

O capítulo 4 apresenta os resultados de avaliação do protótipo proposto, que contempla a comparação das medições com aquelas feitas por equipamentos já validados e a validação por meio do emprego de modelos matemáticos e físicos detalhados no capítulo 2.

O capítulo 5 discorre sobre os resultados e fornece uma análise crítica dos mesmos, provendo também sugestões de melhorias para o equipamento.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Ao longo deste capítulo serão apresentados alguns conceitos teóricos necessários para o entendimento do projeto, como o equacionamento matemático e conceitos físicos associados às principais grandezas de interesse, opções comerciais de transdutores para medição dessas grandezas e uma descrição das ferramentas utilizadas.

### 2.1 ROLO DE TREINAMENTO *SMART*

Um rolo de treinamento *smart*, também conhecido como rolo de treinamento interativo ou rolo de treinamento conectado, é um dispositivo usado para transformar uma bicicleta comum em uma bicicleta estacionária. Ele oferece recursos avançados de interatividade, medição de desempenho e conectividade com aplicativos e plataformas de treinamento virtual. Pode-se citar algumas características principais dos rolos de treinamento *smart*:

- Rolo de treinamento direto (*Direct Drive*): Esses rolos de treinamento permitem que você remova a roda traseira da bicicleta e conecte diretamente o cassete da bicicleta ao rolo, como visto na Figura 1. Eles oferecem uma conexão direta e eficiente entre a bicicleta e o rolo, proporcionando uma experiência mais realista e precisa. Geralmente são mais estáveis e silenciosos.



Figura 1 – Rolo de treinamento smart do tipo *Direct Drive*.

- Rolo de treinamento com sensor de potência integrado: Alguns rolos de treinamento smart possuem um sensor de potência integrado, permitindo a medição

direta da potência gerada pelo ciclista. Isso elimina a necessidade de um medidor de potência externo e fornece leituras precisas para acompanhamento e treinamento.

- Rolo de treinamento com ajuste automático de resistência: Esses rolos de treinamento *smart* podem ajustar automaticamente a resistência com base em diferentes perfis de treinamento ou em aplicativos e plataformas de treinamento virtual. Eles simulam gradientes de subida e descida, tornando a experiência de treinamento mais imersiva e realista.
- Conectividade com aplicativos e plataformas de treinamento virtual: Os rolos de treinamento *smart* são projetados para se conectarem a aplicativos e plataformas de treinamento virtual, como Zwift, TrainerRoad, Rouvy, entre outros. Isso permite que os ciclistas participem de treinamentos interativos, competições virtuais, simulações de percursos e até mesmo treinem com outras pessoas online.
- Monitoramento e análise de dados: Os rolos de treinamento *smart* registram e exibem uma variedade de dados relacionados ao desempenho do ciclista, como potência, cadência, velocidade, distância percorrida e calorias queimadas. Essas informações podem ser usadas para análise, acompanhamento do progresso e ajuste do treinamento.
- Integração com dispositivos e sensores externos: Muitos rolos de treinamento *smart* possuem conectividade *Bluetooth* e *Advanced and Adaptive Network Technology (ANT+)* para se comunicarem com dispositivos externos, como monitores cardíacos, medidores de potência externos, sensores de cadência, entre outros. Isso permite uma análise mais detalhada do desempenho e uma personalização ainda maior do treinamento.
- *Feedback* visual e sonoro: Alguns rolos de treinamento *smart* oferecem *feedback* visual e sonoro durante o treinamento, como gráficos de perfil de percurso, instruções de treinador virtual, simulação de terrenos e até mesmo efeitos sonoros imersivos para uma experiência mais envolvente.

## 2.2 CADÊNCIA, VELOCIDADE E POTÊNCIA

Para calcular a cadência, a velocidade e a potência do ciclista há a necessidade de entender como o simulador utiliza esses dados e os provê para o usuário. Além disso, há necessidade de avaliar alternativas de como essas informações podem ser repassadas pelo protótipo do rolo de treinamento para o simulador.

A cadência no ciclismo é a quantidade de voltas que o pedivela completa em um minuto, ou seja, quantas Rotações por Minuto (RPM) o ciclista executou. A forma de

calcular essa grandeza é simples, utilizando algum dispositivo que consiga identificar que houve uma rotação completa e o tempo que levou para essa rotação completa ocorrer, não dependendo do tamanho da roda, da potência do motor, ou da relação de engrenagens selecionada. A cadência calculada pelo dispositivo é tipicamente disponibilizada por rolos de treinamento para algum simulador.

A velocidade dos rolos de treinamento não são calculadas utilizando sensores de velocidade, de acordo com (HECTOR, 2021). São medidas a partir de outras variáveis como altura e peso do ciclista, inclinação do circuito em que o ciclista se encontra e potência exercida nos pedais. Essas variáveis estão constantemente mudando de acordo com o cenário virtual do simulador, fazendo com o que o ciclista aumente ou diminua sua velocidade.

Ainda de acordo com (HECTOR, 2021) a maioria dos rolos de treinamento *smart* incorporam um motor eletrônico controlado por computador em seus projetos, eles podem calcular a potência gerada pelo ciclista lendo a quantidade de resistência aplicada ao volante de inércia, a velocidade do volante de inércia e algumas outras variáveis para estimar com precisão a potência gerada pelo ciclista com uma margem de erro de  $\pm 2\%$ .

## 2.3 HARDWARE

Para o desenvolvimento do rolo de treinamento *smart*, o hardware deve ser bem selecionado para que cumpra seu objetivo da forma correta. Dentre os equipamentos que devem ser escolhidos estão: o motor elétrico, que interagirá com a bicicleta; o controlador eletrônico de velocidade, responsável pela aquisição e controle dos dados do motor; e os sensores, que serão utilizados para medir as variáveis de interesse.

### 2.3.1 Motor Elétrico

Nos rolos de treinamento *smart* para ciclismo, são comumente utilizados motores elétricos de Corrente Contínua (CC) ou motores de Corrente Alternada (CA), para gerar o torque resistente necessário durante o treinamento. A escolha do tipo de motor varia entre os diferentes modelos e marcas de rolos de treinamento.

Os motores de corrente contínua CC, em especial os sem escovas, são amplamente utilizados nesses dispositivos devido à facilidade para controlar de forma adequada tanto a velocidade quanto o torque (MATTEDE, 2019). Os motores sem escovas podem ser controlados por meio de um controlador ESC ou outro sistema de controle eletrônico, permitindo ajustes precisos do torque resistente. Esses motores são comumente encontrados em rolos de treinamento *smart* de baixo e médio custo.

Já os motores CA são encontrados em alguns modelos de rolos de treinamento de alto desempenho. Eles oferecem uma resposta rápida e potência elevada, tornando-

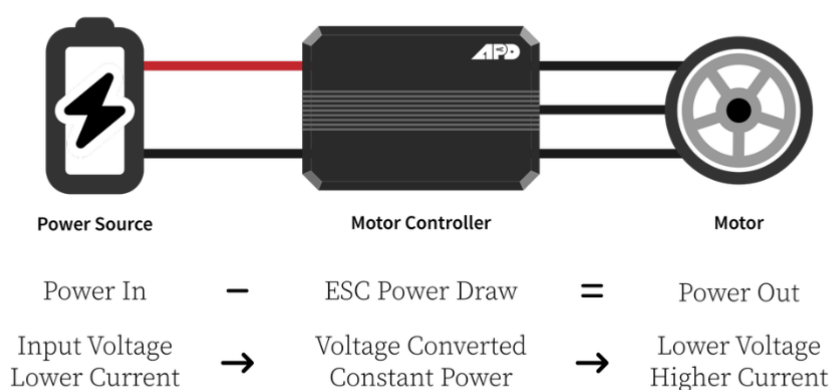
os ideais para simular condições de alta resistência, como subidas íngremes. Esses motores normalmente exigem um controlador eletrônico mais sofisticado para gerenciar o controle de velocidade e o torque resistente.

### 2.3.1.1 Controlador Eletrônico de Velocidade

Um ESC é um dispositivo projetado para controlar a velocidade de um motor elétrico de corrente contínua sem escovas. Utilizando uma combinação especializada de hardware e *firmware*, os ESCs acionam os motores para uma velocidade comandada (POWERDRIVES, 2022).

O ESC é um intermediário entre uma fonte de energia (como uma bateria) e um motor elétrico de corrente contínua sem escovas, como apresentado na Figura 2. Ele recebe sinais de um sistema de controle, geralmente um microcontrolador, e os traduz em um controle preciso da velocidade e direção do motor. O ESC ajusta a potência fornecida ao motor com base no comando enviado em sua entrada (DEFENSEBRIDGE, 2023).

Figura 2 – ESC e sua função entre a fonte de energia e o motor.



Fonte: (POWERDRIVES, 2022).

As funções típicas de um ESC incluem:

- Controle de velocidade angular: o ESC mede a tensão induzida nos enrolamentos do motor e, com base nessa informação, estima a velocidade angular. Com base nessa estimativa, ele fecha uma malha de controle de velocidade ajustando o padrão de chaveamento (tipicamente a razão cíclica de um sinal do tipo Pulse Width Modulation (PWM)), que se traduz em variação da tensão aplicada nos terminais do motor.
- Controle de direção: ao inverter a polaridade ou alterar a fase da energia fornecida ao motor, o ESC pode mudar a direção de rotação.

- Proteção da bateria: os ESCs frequentemente incluem recursos para proteger a bateria contra sobrecarga, descarga excessiva e consumo excessivo de corrente, garantindo uma operação segura e prolongando a vida útil da bateria.
- Proteção do Motor: os ESCs podem ter funções para proteger o motor contra superaquecimento, sobrecarga ou danos devido a picos de corrente ou sobretenção.

Vale ressaltar que os ESCs são específicos para motores elétricos de corrente contínua sem escovas e diferem dos controladores para outros tipos de motor, como motores de corrente contínua escovados ou motores de passo.

### 2.3.2 Transdutores

De acordo com a (VIM, 2012), o termo transdutor é definido da seguinte forma: Dispositivo que converte uma grandeza física em outra grandeza física ou em um sinal elétrico, em geral, com uma relação funcional conhecida.

Em termos mais simples, um transdutor é um dispositivo ou sensor que converte uma forma de energia ou grandeza física (como temperatura, pressão, tensão, corrente, etc.) em outro formato ou grandeza física, geralmente em um sinal elétrico mensurável ou processável. Ele atua como uma interface entre o mundo físico e o sistema de medição, permitindo a obtenção de informações sobre a grandeza em questão.

A escolha do transdutor apropriado depende de uma série de características que devem ser levadas em consideração, como tipo de saída, linearidade, faixa de medição, incerteza de medição, tempo de assentamento e objetivo primário (DRIEMEIER, 2012).

Os sinais gerados pelos sensores podem ser processados e utilizados para controle, monitoramento, tomada de decisões, automação e uma variedade de outras finalidades. Com o avanço da tecnologia, os sensores têm se tornado cada vez mais sofisticados, precisos e integrados a sistemas complexos, como os encontrados em veículos autônomos, dispositivos de Internet das Coisas (IoT) e aplicações de robótica (DRIEMEIER, 2012).

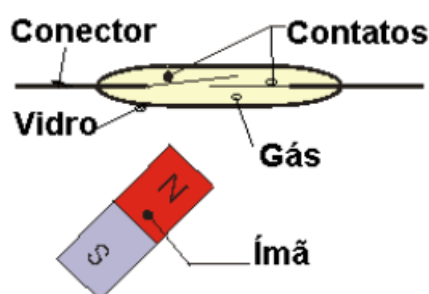
#### 2.3.2.1 Reed Switch

Os *reed switches* são dispositivos que funcionam como interruptores (função liga ou desliga) acionados por campos magnéticos produzidos por ímãs ou eletroímãs aproximados. Construtivamente, são compostos de uma cápsula de vidro e de duas lâminas de algum tipo de material ferromagnético (liga de níquel e ferro, por exemplo), como pode ser visto no esquema da Figura 3. As lâminas são colocadas bem próximas uma da outra sem que haja contato entre elas, com uma extremidade afixada no vidro e com ambas mergulhadas em um gás inerte para não sofrerem oxidação ou deformação mecânica (PPGENFIS, 2009). Quando não há um campo



magnético próximo, as lâminas permanecem separadas uma da outra. No entanto, quando um campo magnético é aplicado próximo ao sensor, as lâminas são atraídas uma em direção à outra e se conectam criando uma conexão elétrica entre os contatos internos do *reed switch*. Ao afastar o ímã, o contato elétrico volta a se abrir.

Figura 3 – Diagrama de um *reed switch*.



Fonte: (PPGENFIS, 2009).

#### 2.3.2.2 Sensor Infravermelho

Os sensores de obstáculo infravermelhos são dispositivos eletrônicos utilizados para detectar a presença de objetos ou obstáculos em determinada área por meio da emissão e recepção de feixes de luz infravermelha. Esses sensores são amplamente utilizados em diversas aplicações, como sistemas de segurança, robótica, automação industrial e veículos autônomos (MATTEDE, 2018).

Os sensores de obstáculo infravermelhos são compostos por um emissor e um receptor de luz infravermelha, como ilustrado na Figura 4. No caso do exemplo, o emissor emite um feixe de luz infravermelha e o receptor detecta a luz refletida de volta pelo objeto ou obstáculo. Também há modelos nos quais a incidência é direta entre o emissor e o receptor é identificado quando um obstáculo é posicionado entre o emissor e o receptor, dado que cessa a incidência de luz no receptor.



Figura 4 – Sensor infravermelho utilizado em projetos com microcontroladores.

Dentre suas principais vantagens, os sensores de obstáculo infravermelhos podem detectar objetos que não sejam metálicos, possuem alta velocidade de resposta e possuem custo bastante reduzido quando comparado a outras alternativas. Sua construção é simples, tipicamente baseada em um emissor de luz e um fototransistor sensível ao comprimento de onda da luz gerada pelo emissor. Além disso, geralmente consomem baixa quantidade de energia durante a operação. Isso os torna adequados para aplicações em que a eficiência energética é importante, como em dispositivos alimentados por baterias.

Em contrapartida, esses dispositivos possuem algumas desvantagens, tais como limitação de alcance em comparação com outros sensores, como os ultrassônicos ou de radar. O alcance efetivo dos sensores de obstáculo infravermelhos depende de fatores como a potência do emissor e a sensibilidade do receptor. Outra desvantagem é que podem ser afetados pela presença de luz ambiente intensa, como luz solar direta ou iluminação artificial intensa, que podem ocasionar falsos disparos. É necessário tomar precauções para minimizar a interferência da luz ambiente durante a instalação e operação dos sensores. Além disso, superfícies altamente refletivas, como espelhos ou objetos metálicos polidos, e superfícies muito difusas podem afetar a precisão dos sensores de obstáculo infravermelhos, dado que o feixe pode ser totalmente refletido para alguma direção que não a de interesse ou poder refletido de forma difusa, resultando em detecções imprecisas ou falsos negativos.

## 2.4 COMUNICAÇÃO

Para um melhor entendimento dos protocolos de comunicação utilizados no desenvolvimento do rolo de treinamento, são apresentadas algumas opções disponíveis no mercado e suas principais características.

### 2.4.1 *Advanced and Adaptive Network Technology (ANT+)*

O protocolo de comunicação ANT+, em português Tecnologia de Rede Avançada e Adaptativa, é um padrão de comunicação sem fio desenvolvido pela empresa Garmin, projetado para permitir a transmissão de dados entre dispositivos eletrônicos, como sensores, monitores eletrocardiográficos, relógios esportivos, ciclocomputadores, rastreadores de atividades físicas e outros dispositivos relacionados à saúde e ao esporte (NEHR, 2022).

O ANT+ utiliza a tecnologia de rede sem fio de curto alcance e baixo consumo de energia, operando na frequência de 2,4 GHz. Ele permite a comunicação bidirecional entre os dispositivos, permitindo a troca de informações e o controle de dispositivos remotos. O protocolo ANT+ baseia-se no conceito de redes em malha (*mesh networks*), no qual vários dispositivos podem se comunicar uns com os outros.

Cada dispositivo possui um identificador exclusivo conhecido como "ANT ID", que é usado para identificar e diferenciar os dispositivos em uma rede.

O protocolo ANT+ suporta uma ampla gama de perfis de comunicação, cada um projetado para um tipo específico de dispositivo ou aplicação. Alguns exemplos de perfis ANT+ estão listados abaixo:

- Perfil de cadência: permite a comunicação entre sensores de cadência (medidores de velocidade) em bicicletas e dispositivos receptores.
- Perfil de velocidade: permite a comunicação entre sensores de velocidade em bicicletas e dispositivos receptores.
- Perfil de potência: permite a comunicação entre medidores de potência em bicicletas e dispositivos receptores.
- Perfil de monitoramento de frequência cardíaca: permite a comunicação entre monitores de frequência cardíaca e dispositivos receptores, como relógios esportivos ou ciclocomputadores.

Esses são apenas alguns exemplos dos muitos perfis disponíveis no protocolo ANT+. Cada perfil define as especificações e os comandos de comunicação necessários para a troca de dados específicos entre os dispositivos.

O ANT+ é amplamente utilizado na indústria de esportes e *fitness*, permitindo a integração e a interoperabilidade entre diferentes dispositivos de diferentes fabricantes. Ele oferece uma maneira conveniente e confiável de transmitir dados entre dispositivos sem fio, facilitando o monitoramento de atividades físicas, treinamentos e análise de desempenho.

#### **2.4.2 Bluetooth Low Energy (BLE)**

*Bluetooth Low Energy* (BLE), comumente chamado de *Bluetooth Smart*, é um protocolo de comunicação semelhante ao Bluetooth convencional, com a vantagem de operar utilizando baixos níveis de consumo de energia. Ele é utilizado principalmente em aparelhos e dispositivos que não precisam transmitir grandes quantidades de dados, podendo apresentar um gasto energético da ordem de um décimo do apresentado pela implementação convencional de Bluetooth (ARAUJO; VASCONCELLOS, 2012).

Dado que a característica principal do protocolo é economia de energia, um dispositivo operando nesse protocolo permanece geralmente em um *sleep mode* a maior parte do tempo, ativando-se somente para realizar conexões que duram pouco tempo (em torno de milissegundos). O protocolo utiliza a mesma frequência do Bluetooth convencional, que é de 2,4 GHz (ABI RESEARCH, 2015), sendo a mesma frequência de operação do protocolo ANT+.

O protocolo geralmente é utilizado em dispositivos de tamanhos reduzidos, como *smartwatches* e pulseiras *fitness*, pois esses dispositivos possuem baterias menores e não exigem uma troca de dados intensa (KLEINA, 2023), além de serem utilizados por sensores (para medições de cadência, velocidade, frequência cardíaca e outros), conectados a ciclocomputadores que disponibilizam esses dados de forma on-line para o usuário.

### 2.4.3 Fitness Machine Service (FTMS)

O protocolo FTMS, é o mais recente padrão Bluetooth utilizado para controlar equipamentos de *fitness*, incluindo esteiras, bicicletas de treinamento e máquinas de remo, (SVB, 2020). O protocolo FTMS é um protocolo de comunicação padronizado usado em equipamentos na área *fitness* para permitir a interoperabilidade entre equipamentos e dispositivos externos, como *smartphones*, *tablets* e dispositivos de monitoramento de atividades físicas. Ele é baseado na tecnologia BLE, mas tem algumas particularidades para facilitar a troca de dados relacionados à atividade física.

O protocolo FTMS define um conjunto de comandos e formatos de dados que permitem que as máquinas voltadas a atividades físicas (por exemplo, esteiras, rolos de treinamento, bicicletas ergométricas, máquinas de remo) se comuniquem com dispositivos clientes compatíveis. Ele permite a comunicação bidirecional, de forma que o dispositivo cliente controle e monitore os equipamentos e receba dados em tempo real das máquinas.

Ao implementar o protocolo FTMS, os fabricantes dos equipamentos podem garantir a compatibilidade com uma ampla variedade de aplicativos e dispositivos, oferecendo aos usuários a flexibilidade de acompanhar seus treinos, estabelecer metas e analisar seus dados de condicionamento físico usando seus aplicativos preferidos. O protocolo suporta vários tipos de dados, como velocidade, distância, frequência cardíaca, cadência, potência e outros, permitindo um monitoramento abrangente dos treinos.

## 2.5 PROCESSAMENTO

Para que o protótipo efetue os devidos processamentos e leituras dos sensores e escritas nos atuadores, é necessário ter um microcontrolador acoplado ao sistema. No mercado, existem diversas opções para as mais variadas funções, cabendo a escolha baseada nas funções que o microcontrolador deve exercer, além da relação custo/benefício e de outros requisitos da aplicação.

Os mais comuns e de fácil acesso no Brasil que poderiam desempenhar essa função são o Arduino e o ESP32. Além dessas opções, existem outras que tendem a serem mais robustas, como os microcontroladores da empresa *Texas Instruments*, por

exemplo.

### 2.5.1 Arduino

Arduino é uma empresa que produz hardware e software de arquitetura aberta (*open-source*), podendo ser utilizados por qualquer pessoa interessada. Dentre os equipamentos que eles disponibilizam, existe a linha do Arduino que é uma placa microcontroladora, dotada de um microcontrolador e de todos os demais periféricos necessários para seu funcionamento. Existem diferentes tipos de Arduino, cada qual com suas características. O Arduino NANO, por exemplo, é um microcontrolador de tamanho bem reduzido, utilizado quando não há necessidade de se utilizar muitas portas analógicas e digitais. A versão mais difundida é chamada de Arduino UNO, apresentado na Figura 5 e dotado de 14 entradas/saídas digitais e de 6 entradas analógicas (com resolução de 10 bits cada) (ARDUINO, 2023).

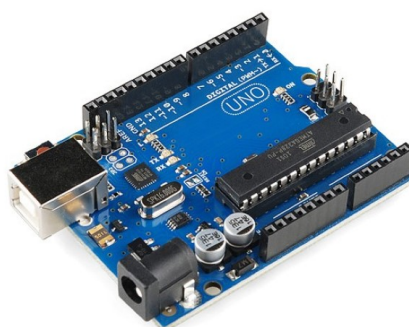


Figura 5 – Arduino UNO.

Outra opção é o Arduino MEGA, que, como o próprio nome diz, possui um tamanho maior que os que foram citados aqui, mas que possui mais entradas e saídas analógicas e digitais, além de ter um processador diferente, sendo ideal para aplicações que demandam maior quantidade de processamento e portas.

Todas essas opções podem ser alimentadas por uma fonte externa de 7 V a 20 V, ou diretamente programadas e alimentadas pela porta Universal Serial Bus (USB) do computador.

### 2.5.2 ESP32

O ESP32, visto na Figura 6 é um microcontrolador criado pela empresa chinesa *Espressif Systems* que consiste de um microprocessador de baixa potência *dual core* com suporte a *Wi-Fi*, Bluetooth 4.2 e memória flash integrada. Dentre as principais características deste dispositivo, podem ser citadas baixo consumo de energia, alto desempenho de potência, robustez, versatilidade e confiabilidade (OLIVEIRA, 2017).

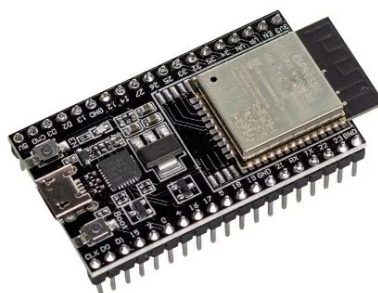


Figura 6 – ESP32 modelo padrão.

Além disso, informações mais detalhadas de suas principais características podem ser vistos na lista abaixo.

- CPU de dois núcleos: o ESP32 possui um processador de duplo núcleo Xtensa LX6, o que permite a execução de várias tarefas simultaneamente.
- Conectividade *Wi-Fi* e Bluetooth: o ESP32 tem suporte nativo para *Wi-Fi* 802.11 b/g/n, permitindo a conexão com redes *Wi-Fi*. Além disso, possui suporte integrado para Bluetooth padrão e BLE, facilitando a comunicação sem fio com outros dispositivos.
- Amplo conjunto de periféricos: o ESP32 possui uma variedade de periféricos, como General Purpose Input/Output (GPIO), interfaces Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART), Inter-Integrated Circuit (I2C), Serial Peripheral Interface (SPI), Conversor Analógico para Digital (ADC), Conversor Digital para Analógico (DAC), entre outros. Esses periféricos facilitam a conexão e a interação com outros dispositivos e sensores.
- Memória: o ESP32 possui uma quantidade generosa de memória, incluindo memória flash para armazenamento de programas e dados, além de memória Random Access Memory (RAM) para execução de código e armazenamento temporário de informações.

Na Figura 7 pode-se ver um comparativo das principais características do ESP32 com outras duas placas de desenvolvimento: a versão anterior do próprio ESP32, que é o ESP8266, e o Arduino UNO.

## 2.6 SIMULADORES

Simuladores de ciclismo comerciais utilizados em conjunto com os rolos de treinamento *smart* são ferramentas poderosas para que o ciclista compreenda seus

Figura 7 – Tabela comparativa entre placas de desenvolvimento.

	ESP32	ESP8266	ARDUINO UNO R3
Cores	2	1	1
Arquitetura	32 bits	32 bits	8 bits
Clock	160MHz	80MHz	16MHz
WiFi	Sim	Sim	Não
Bluetooth	Sim	Não	Não
RAM	512KB	160KB	2KB
FLASH	16Mb	16Mb	32KB
GPIO	36	17	14
Interfaces	SPI / I2C / UART / I2S / CAN	SPI / I2C / UART / I2S	SPI / I2C / UART
ADC	18	1	6
DAC	2	0	0

Fonte: (OLIVEIRA, 2017).

dados de maneira correta e, com isso, entenda melhor sobre seu desempenho. Eles provêm uma experiência virtual imersiva, permitindo aos ciclistas treinarem em ambientes virtuais realistas e interativos. Outra propriedade que os simuladores possuem é a interatividade entre os usuários, pois permitem que ciclistas se conectem e interajam com outros usuários em tempo real, tornando a experiência mais social e competitiva. O ciclista pode participar de passeios em grupo, corridas virtuais ou treinar com outros ciclistas remotamente.

Além de serem uma interface com o usuário provendo dados relevantes, os simuladores também se comunicam com o rolo de treinamento enviando dados do circuito que o ciclista está executando no momento. Por exemplo, se no circuito escolhido há um aclave, o simulador envia um dado para que o motor do rolo exerça uma força no sentido contrário do ciclista, fazendo assim com que o ciclista precise fazer mais força para manter o mesmo ritmo, simulando exatamente uma situação real em que o ciclista estaria subindo uma montanha. Outros tipos de dados, como velocidade do vento, tipo de terreno (asfalto, estrada de chão, paralelepípedos e etc) e declives, também são enviados para o rolo, cada qual com sua forma de interação com o mesmo e o ciclista.

Majoritariamente, os simuladores se comunicam com o rolo de treinamento e sensores como cinta cardíaca e medidores de potência através dos protocolos de comunicação ANT+ e BLE. Por isso, esses protocolos foram estudados previamente para a definição de interação entre simulador e rolo de treinamento.

Alguns exemplos populares de simuladores utilizados em rolos de treinamento *smart* para ciclismo incluem o Zwift, o TrainerRoad, o Rouvy, o RGT Cycling e o BKool. Cada simulador pode ter recursos e funcionalidades específicas, mas de forma geral oferecerem os mesmos recursos de leitura de dados dos sensores e análise de

desempenho. Os dois mais populares, Bkool e Zwift, são detalhados na sequência.

### 2.6.1 Bkool

O Bkool é um popular simulador de ciclismo *indoor* que oferece uma experiência imersiva de treinamento virtual. Ele permite que os ciclistas treinem em ambientes virtuais realistas, participe de desafios e corridas com outros usuários em todo o mundo, além de oferecer recursos avançados de treinamento e análise de desempenho (BKOOOL, 2019). Algumas características do simulador Bkool são:

- Existência de ambientes virtuais realistas: o Bkool oferece uma ampla variedade de rotas virtuais, incluindo estradas, circuitos e trilhas reais. Essas rotas são criadas a partir de dados de mapeamento e podem simular gradientes, curvas, descidas e outros elementos do terreno, proporcionando uma experiência realista.
- Participação em competições e desafios: os usuários do Bkool podem participar de desafios e competições virtuais, nos quais podem enfrentar outros ciclistas em tempo real ou competir contra suas próprias melhores marcas. Isso adiciona um elemento de competição e motivação ao treinamento *indoor*.
- Personalização do treinamento: o Bkool oferece recursos de personalização do treinamento, permitindo que os ciclistas definam seus próprios objetivos, duração e intensidade do treino. Eles podem escolher entre diferentes modos de treinamento, como treinamento intervalado, treinamento de resistência e treinamento em subidas.
- Análise de desempenho: o Bkool fornece análises detalhadas do desempenho após cada treino, incluindo dados como potência, cadência, velocidade média, tempo gasto em diferentes zonas de treinamento e muito mais, como na Figura 8. Isso permite que os ciclistas avaliem seu progresso, identifiquem áreas de melhoria e acompanhem seu desempenho ao longo do tempo.
- Simulação de percursos: além de rotas reais, o Bkool também permite a criação e a simulação de percursos personalizados. Os usuários podem criar suas próprias rotas virtuais usando dados GPS ou importando arquivos de outros serviços, como o Strava.
- Integração com dispositivos e plataformas: o Bkool é compatível com uma variedade de dispositivos, como rolos de treinamento smart, monitores de frequência cardíaca e medidores de potência. Além disso, ele pode ser integrado a outras plataformas e serviços, permitindo que os usuários sincronizem e compartilhem seus treinos e conquistas.



Figura 8 – Apresentação dos dados no simulador Bkool.



Fonte: (COXWORTH, 2015).

O Bkool funciona com rolos de treinamento de outras empresas (existem rolos de treinamento fabricados pela própria Bkool) e os dispositivos se comunicam com o simulador por meio dos protocolos ANT+ e BLE.

### 2.6.2 Zwift

Assim como o simulador da Bkool, o Zwift também se comunica com os rolos de treinamento *smart* através dos protocolos ANT+ e BLE, sendo compatível com sistemas operacionais Android e iOS nos *smartphones* e plataformas Windows, macOS e Linux em *desktops*. Por essa flexibilidade de plataforma, pelo seu preço de assinatura ter um preço atrativo e por todas as funcionalidades que o simulador oferece para seus usuários, atualmente é um dos simuladores mais utilizados pelos ciclistas (ZWIFT, 2015).

O Zwift, de forma análoga ao Bkool, fornece ambientes virtuais tridimensionais detalhados e realistas, com rotas que simulam estradas reais e percursos de corrida em todo o mundo. Os gráficos e a qualidade visual proporcionam uma sensação de imersão enquanto o ciclista pedala, como pode ser visto na Figura 9. Além disso, permite interação com outros ciclistas de forma remota, seja em desafios de corrida, passeios ou outros modos. Da mesma forma que os outros simuladores, possui integração com os sensores de velocidade, cadência, potência e frequência cardíaca.

Um diferencial do Zwift é a existência de modos de treinamento estruturado,

ou sejam ele oferece uma ampla variedade de programas de treinamento estruturado para atender às diferentes necessidades e metas dos ciclistas. O ciclista pode selecionar treinamentos com base em tempo, intensidade ou objetivos específicos, como resistência, força ou velocidade.

Figura 9 – Apresentação dos dados no simulador Zwift.



Fonte: (ABELLA, 2020).

Outra funcionalidade apresentada para motivar os treinos e o uso do simulador é a existência de conquistas à medida que o usuário vai utilizando o simulador. O Zwift permite que o usuário personalize seu avatar, escolha bicicletas e roupas, além de desbloquear itens virtuais à medida que alcança metas e conquistas. Isso adiciona uma dimensão de progresso e motivação ao treinamento.

### 3 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

Este capítulo descreve o desenvolvimento do protótipo de rolo de treinamento *smart* proposto neste trabalho. Um esquema geral do sistema proposto é apresentado na Figura 10. A bicicleta é acoplada fisicamente ao motor *brushless*. O ESC se comunica com o motor e com o microcontrolador que posteriormente se comunica com o simulador através do BLE. O transdutor de cadência também é acoplado a bicicleta e se comunica diretamente com o microcontrolador, ao qual repassa as informações para o simulador. O sistema de maneira geral foi dividido em três etapas principais: estrutura física do protótipo; aquisição de dados de cadência, velocidade e potência; comunicação do rolo de treinamento com o simulador. Além disso, há uma seção de orçamento, que inclui os preços de custo dos equipamentos e dispositivos que compõem o protótipo.

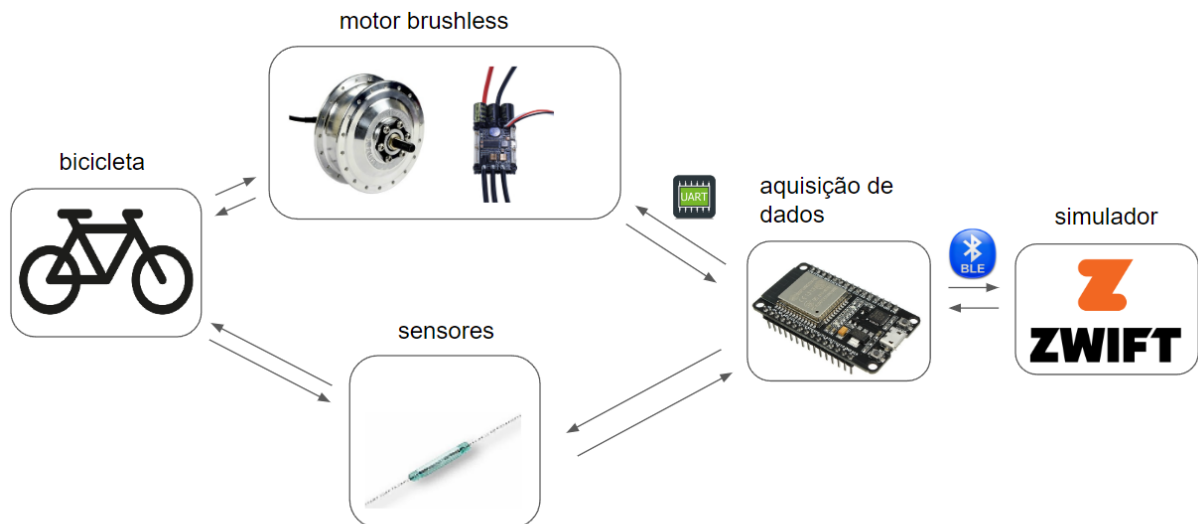


Figura 10 – Modelo conceitual do protótipo.

#### 3.1 ESTRUTURA FÍSICA

A estrutura física do rolo de treinamento é responsável pelo acoplamento do motor de corrente contínua sem escovas com o suporte para a fixação da bicicleta do usuário. Esse suporte funciona para qualquer tipo de bicicleta que o ciclista possua: Mountain Bike (MTB), *road bike*, chamada aqui no Brasil de *speed*, urbana e elétrica, como apresentadas, respectivamente, na Figura 11. Essa estrutura foi adquirida de um rolo de treinamento mais simples encontrado no Brasil, como o apresentado na Figura 12, que possuía somente uma estrutura de plástico em forma de cilindro afixada,

de modo a causar atrito com a roda traseira da bicicleta, simulando para o usuário a percepção de pedalar exercendo força.



Figura 11 – Tipos de bicicletas que podem ser utilizadas no rolo de treinamento.

Por ser um rolo simples, não é dotado de nenhuma instrumentação ou eletrônica embarcada, utilizando somente o cilindro como forma de interação com o ciclista. Esses rolos geralmente são utilizados para aquecimentos antes da realização de provas e são facilmente encontrados nas lojas do ramo e na Internet, por preços bem acessíveis. Para a fixação do motor à estrutura, o cilindro de plástico foi removido e foi adicionado o motor elétrico, descrito na subseção a seguir.



Figura 12 – Estrutura de um rolo simples utilizado como base para o rolo *smart*.

### 3.1.1 Motor e Controlador

O motor selecionado foi um motor *brushless* encontrado a partir do desmonte de um *hoverboard*, como o da Figura 13. Esse motor pode ser controlado por um ESC ao qual já se tinha conhecimento em outros trabalhos desenvolvidos e esse ESC seria responsável pelo controle e leitura de velocidade e corrente.

Figura 13 – Exemplo de *hoverboard*.



Fonte: Copy Supply (2023).

Os *hoverboards* possuem dois desses motores, um acoplado a cada roda, e são responsáveis pelo deslocamento, aumentando ou diminuindo sua velocidade e invertendo o sentido de rotação. Existem vários modelos de motores, com as mais diferentes características, porém pelo fato de ter sido empregado um motor de um *hoverboard* que estava sem utilidade, não se tinha informações detalhadas sobre ele. Buscou-se na internet dados sobre ele através da aparência externa do motor e foi feita uma análise por inspeção visual. O motor é trifásico e possui tensão de alimentação até 36 V e potência de 250 W. O motor utilizado no projeto pode ser visto na Figura 14, logo após ser retirado do *hoverboard*.



Figura 14 – Motor *brushless* de 36 V de tensão e 250 W de potência.

Mesmo com as informações provenientes do VESC e da inspeção visual da

quantidade de fios, ainda não era possível identificar o número de polos do motor. O número de polos é uma informação pertinente para o cálculo posterior da velocidade do ciclista pois o mesmo é utilizado no equacionamento. Por não possuir informações na parte externa do motor o mesmo foi aberto com cuidado para que não sofresse nenhum dano, e após aberto se verificou que o número de polos totalizava 26, sendo o par definido como 13, como pode ser visto na Figura 15.



Figura 15 – Motor aberto para identificação da quantidade de polos.

O motor foi afixado ao rolo de treinamento utilizando uma estrutura de metal para fazer um mancal de suporte, evitando que o motor vibre demais ou se mova durante o funcionamento. A estrutura do rolo e o mancal podem ser vistos na Figura 16. A montagem proposta se mostrou eficiente, sem a necessidade usar de outras ferramentas para anexar o motor ao rolo.

A principal grandeza que se deseja controlar no motor é sua velocidade, que afetará diretamente o desempenho do ciclista. Rotações no mesmo sentido irão auxiliar o usuário e rotações no sentido contrário irão dificultar. Para controlar a velocidade, foi adquirido um ESC modelo Mini FSESC4.20, visto na Figura 17, da empresa FlipSky. Esse ESC atende aos requisitos da aplicação e foi selecionado com base nas características do motor. O ESC permite operar com até 50 A de corrente, com pico máximo de até 150 A, tensão nominal entre 8 V e 60 V, possibilidade de controle por pulsos PWM e possibilidade de ser alimentado por baterias de lítio, o que dota o rolo de treinamento *smart* de autonomia energética para operação longe de uma fonte de energia.

Esse ESC é baseado em um projeto chamado VESC, que ganhou popularidade entre os entusiastas de veículos elétricos, especialmente em projetos de skate elétrico e veículos de propulsão elétrica personalizados.

O Mini FSESC4.20 é projetado para controlar a velocidade e o torque de mo-

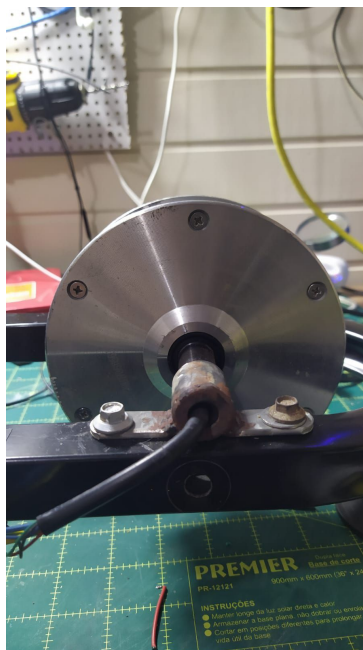


Figura 16 – Mancal instalado para posicionar corretamente o motor.

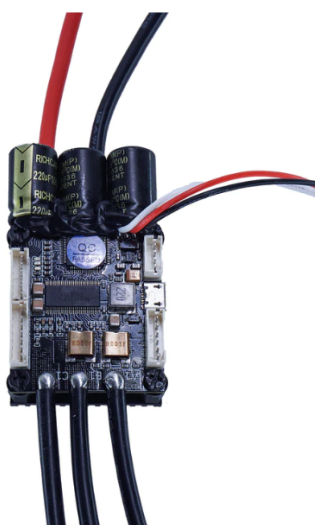


Figura 17 – VESC modelo Mini F5ESC4.20 da empresa FlipSky para motores de corrente contínua sem escovas trifásicos.

tores de corrente contínua de forma eficiente e suave VESC Project (2018). Uma das características notáveis do VESC é a sua flexibilidade para personalização, visto que pode ser facilmente configurado através de uma interface no computador. Além disso, ele utiliza um microcontrolador de alta potência e possui *firmware* de código aberto, o que significa que os usuários podem adaptar e personalizar o controlador de acordo com suas necessidades específicas. Isso permitiu o desenvolvimento de uma comunidade ativa de usuários que compartilham seus aprimoramentos e contribuem para o desenvolvimento contínuo do projeto. O VESC suporta diferentes tipos de motores,

como motores de corrente contínua sem escova (Brushless Direct Current (BLDC)) e motores de corrente contínua com escova (*brushed*).

### 3.1.2 Instalação do Sensor de Cadência

A medição de cadência é realizada com emprego de um sensor infravermelho, como o apresentado na Figura 19. Ele produz um sinal digital que indica a presença de um obstáculo em determinado alcance. Sua instalação foi feita próximo ao pedivela da bicicleta e cada vez que o pedivela passa pelo alcance do sensor, uma rotação completa é computada.

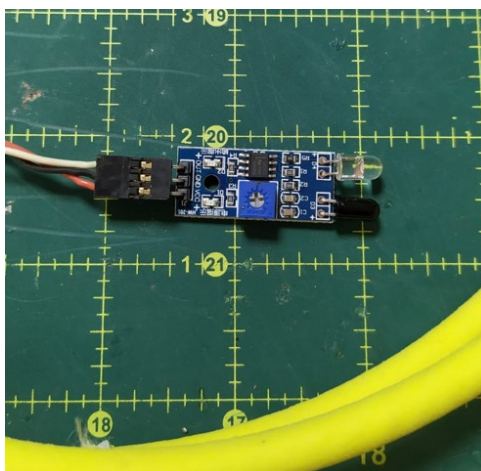


Figura 18 – Sensor infravermelho utilizado para as medições de cadência.

O sensor foi conectado ao ESP32 utilizando o pino GPIO 5 para a leitura do sinal e ao pino de referência (*ground*). Sua alimentação de 5 V foi conectada ao VESC, pois o modelo de ESP32 que está sendo utilizado no projeto não possui terminal de 5 V.

Na Figura 19 pode-se observar a posição onde o sensor está instalado na bicicleta. Uma fita branca foi utilizada no pedivela para melhorar a identificação do obstáculo por parte do sensor infravermelho, evitando assim possíveis efeitos da absorção da fonte luminosa pelo preto fosco do pedivela.

### 3.1.3 Alimentação

Para os testes preliminares, utilizou-se uma fonte de bancada de 30 V de tensão e 10 A de corrente da empresa Longwei modelo LW-K3010D, apresentada na Figura 20, que se mostrou suficiente para alimentação do motor através do VESC e do microcontrolador ESP32 e seus periféricos par testes iniciais. Note que em operação nominal, o motor pode chegar até 36 V, então a fonte não serve para aplicação na versão final do produto se for desejado extrair todo o potencial do motor.





Figura 19 – Sensor infravermelho instalado na bicicleta.

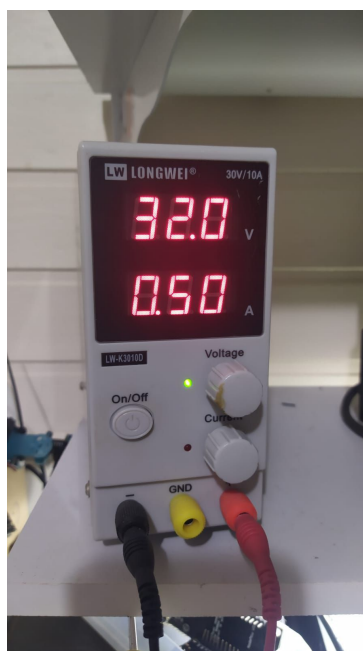


Figura 20 – Fonte de bancada de 30 V e 10 A.

Para que o protótipo funcione sem a utilização da fonte de bancada, um banco de baterias foi adicionado ao projeto, fornecendo energia para alimentar o sistema por tempo suficiente para demonstrações e testes fora do ambiente de laboratório. Cada célula da bateria possui 3,7 V e tem capacidade de 100 Ah. Foram adicionadas 10 dessas células em série, como apresentado na Figura 21. Essas baterias são usualmente utilizadas em projetos que utilizam fornecimento de grandes quantidades de corrente durante um período de tempo, como em *scooters* elétricas.

Realizou-se um processo de medição das resistências internas de cada célula, uma vez que a resistência afeta diretamente o desempenho e a vida útil da bateria. A

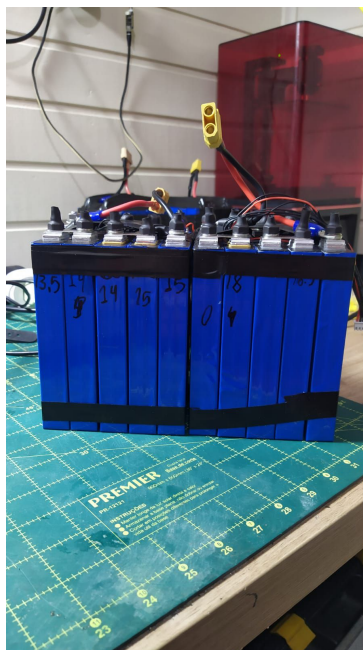


Figura 21 – 10 células de 3,7 V e 100 Ah conectadas em série.

resistência interna de uma célula de bateria representa a oposição ao fluxo de corrente elétrica dentro da própria célula, ou seja, está diretamente ligada às perdas existentes na própria bateria ao ser drenada uma dada corrente.

A resistência interna de uma célula de bateria de lítio pode ser determinada medindo a queda de tensão quando uma corrente conhecida é aplicada à célula. Essa medição é geralmente feita usando um dispositivo de teste especializado, como o medidor de resistência interna de bateria visto na Figura 22. Além de calcular a resistência interna de cada célula, esse aparelho também realiza o carregamento e balanceamento das mesmas.

A seguir, são listadas algumas das vantagens de se realizar o processo de balanceamento das células da bateria e sua importância:

- **Eficiência energética:** a resistência interna da bateria causa uma queda de tensão quando a corrente flui, o que resulta em perdas de energia. Ao conhecer a resistência interna, podem ser projetados sistemas elétricos mais eficientes, levando em consideração essa perda de energia.
- **Desempenho:** a resistência interna influencia diretamente a capacidade da bateria de fornecer corrente de forma eficaz. Quanto menor a resistência interna, menor será a queda de tensão e maior será a capacidade da bateria de fornecer corrente de alta taxa. Isso é especialmente importante em aplicações que exigem altas correntes, como veículos elétricos ou drones.
- **Vida útil da bateria:** a resistência interna também afeta a vida útil da bateria.



Figura 22 – Equipamento responsável por balancear, carregar e medir a resistência interna das células.

Uma resistência interna alta pode levar a altas temperaturas internas durante a operação, o que pode causar degradação acelerada da bateria. Conhecer a resistência interna pode ajudar a monitorar a saúde da bateria e tomar medidas para prolongar sua vida útil.

- **Segurança:** em casos extremos, uma resistência interna anormalmente alta pode levar ao superaquecimento da bateria e até mesmo causar danos, vazamento ou incêndio. Monitorar a resistência interna pode ajudar a identificar problemas potenciais de segurança antes que eles se tornem críticos.

Após a medição da resistência elétrica, as células foram agrupadas em dois blocos de cinco células cada e ordenadas a partir de suas resistências, alinhadas da menor para a maior, a fim de evitar diferenças muito grandes entre uma célula e outra na passagem da corrente, de acordo com STA Eletrônica (2023). Na Tabela 1 estão descritas as resistências internas de cada célula, já alinhadas no sentido da menor para a maior.

Com isso, os dois blocos de 5 células cada foram conectados em série, para totalizar 10 células conectadas em série, de modo a fornecer tensão e corrente por tempo e intensidade suficientes para alimentação do protótipo fora do ambiente de laboratório.

Número da célula	Resistência [ $\Omega$ ]
1	13,5
2	14,0
3	14,0
4	15,0
5	15,0
6	16,5
7	16,5
8	18,0
9	18,0
10	20,0

Tabela 1 – Valores das resistências elétricas internas de cada célula do banco de baterias.

### 3.2 AQUISIÇÃO DE DADOS

A aquisição de dados durante o treinamento permite apresentá-los aos ciclistas, de modo que possam analisar e monitorar seu desempenho e acompanhar o progresso em relação às metas estabelecidas. Com o rolo de treinamento *smart* desenvolvido, os ciclistas têm acesso a três informações importantes, que são medidas de formas diferentes e que estão apresentadas na Figura 23 e fornecidas de maneira on-line para o simulador Zwift.

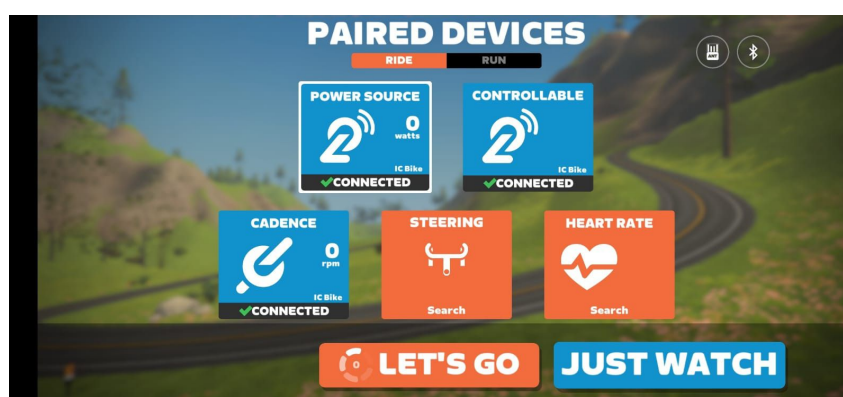


Figura 23 – Tela de abertura de pareamento dos sensores do Zwift.

A primeira informação é a cadência (*cadence* na tela de pareamento do Zwift), que se refere a quantas rotações o ciclista consegue executar no intervalo de um minuto girando o pedivela. O rolo de treinamento é capaz de medir a cadência por meio do sistema descrito na Seção 3.1.2, permitindo que o ciclista monitore sua frequência de pedalada e faça ajustes para otimizar sua eficiência.

A segunda informação relevante é a potência (identificada na Figura 23 como *power source*), que representa a quantidade de energia que o ciclista impõe durante a atividade. Esse valor é obtido diretamente a partir da medição no motor e está

diretamente associado ao gasto energético do ciclista. A medição da potência é um indicador fundamental para avaliar o esforço realizado e acompanhar o progresso ao longo do tempo. O rolo de treinamento registra e transmite esses dados de maneira on-line para o simulador Zwift, fornecendo ao ciclista informações valiosas sobre sua intensidade de treinamento.

Por fim, a terceira informação é a velocidade, que representa a rapidez com que o ciclista está se movendo durante a sessão de treinamento. Essa medição é particularmente importante para simular as condições de um percurso ou rota específica. O ESP32 calcula e transmite a velocidade do ciclista para o simulador através do protocolo FTMS, permitindo que ele vivencie a sensação de pedalar em diferentes terrenos virtuais.

Em todo os casos, os dados são adquiridos pelos sensores são enviados pelo protocolo FTMS para o Zwift. Isso é feito por meio de um conjunto de parâmetros selecionados, que podem ser empregados ou não pelo desenvolvedor do rolo de treinamento, dependendo da aplicação a cada caso. A escolha desses parâmetros é feita atribuindo um bit para a variável que se deseja medir. Por exemplo, na tabela da Figura 24 tem-se informações de diversas variáveis que o desenvolvedor pode decidir utilizar, mas o rolo de treinamento proposto neste projeto emprega três delas: *Instantaneous Cadence*, que se refere à cadência instantânea, *More Data*, que se refere à velocidade instantânea, e *Instantaneous Power*, que se refere à potência instantânea medida do motor, que será utilizada no futuro para o cálculo da potência do ciclista.

### 3.2.1 Cadência

A informação de cadência é medida com emprego de um sensor infravermelho instalado na bicicleta durante o treinamento, como descrito na Seção 3.1.2. Esse sensor está conectado através de um cabo diretamente em um pino GPIO do microcontrolador ESP32. Uma função de interrupção é ativada a cada vez que o sensor detecta que uma volta do pedivela foi completada. Com base no tempo entre identificações consecutivas, um valor de cadência, em RPM, é determinado. Como forma de avaliar a funcionalidade, durante a fase de desenvolvimento, o LED do ESP32 foi programado para ativar e depois desativar a cada vez que a interrupção é ativada e seu valor comparado por meio de leituras da porta serial do ESP32. Esse procedimento serviu somente para verificar o comportamento do sensor, no caso para verificar se ele identificava ou não o obstáculo através do infravermelho.

### 3.2.2 Velocidade

A medida da velocidade poderia ter sido feita por meio da adição de algum sensor diretamente na roda traseira da bicicleta, como um *reed switch*, por exemplo.

Entetanto, optou-se por tornar o rolo de treinamento o mais dinâmico possível para o usuário, evitando, assim, que cada vez que o ciclista for utilizar o rolo tenha que conectar vários sensores para o pleno funcionamento. Na proposta deste trabalho, a velocidade do ciclista é medida por meio da leitura da velocidade angular do motor, utilizando as leituras do sensor Hall presentes no motor e lidos pelo VESC. Como forma de relacionar as comutações com a velocidade angular real, emprega-se o número de polos do motor. Além disso, para transformar a velocidade angular em velocidade linear, que é o dado de interesse para o ciclista, é necessário saber o raio do apoio para a roda (raio do motor). Essa conversão é feita com:

$$V = \frac{2\pi r N}{60\eta}, \quad (1)$$

em que  $V$  é a velocidade linear de interesse,  $r$  é o raio do apoio da roda da bicicleta (raio do motor),  $N$  é o número de voltas medido pelo VESC e  $\eta$  o número de par de polos do motor.  $N$  é o RPM elétrico, que é o numero de ciclos elétricos no controlador. Ele é proporcional ao RPM real (mecânico) multiplicado pelo número de pares de polos.

Os dados coletados são enviados por FTMS para o Zwift, que os disponibiliza para o usuário na interface do simulador. Esses dados são enviados indicando bits e *flags* no software que se comunica com o simulador, da mesma forma que os dados de cadência e potência.

### 3.2.3 Potência do Ciclista

Para estimar a potência do ciclista, pode-se usar o procedimento descrito a seguir. Primeiramente, assume-se que o sistema tem dois agentes, primeiro é o motor, no qual pode ser medida a potência elétrica e a velocidade angular; o segundo é o ciclista, que pode adicionar ou subtrair potência do sistema. Além desses agentes, há perdas mecânicas nos sistemas de transmissão (por atrito, por exemplo) e uma parcela de perdas associada à eficiência do motor, já que a potência medida é a elétrica, mas a potência de interesse é a mecânica.

Quando o ciclista não está ativo e apenas o motor elétrico está funcionando, podem ser medidas a entrada de energia elétrica no motor e a velocidade angular resultante ( $\omega_1$ ) do sistema. Como a potência mecânica é definida pelo produto de velocidade angular por torque, a relação entre potência elétrica ( $P_m$ ) e velocidade angular ( $\omega_1$ ) é linear e pode ser definida como:

$$P_m = k\omega_1 \quad (2)$$

em que  $k$  é uma constante de proporcionalidade, que já inclui a eficiência do motor.

Quando o ciclista se movimentar. Isso adicionará potência ao ou subtrairá potência do sistema, o que resultará em uma mudança na velocidade angular para um

novo valor ( $\omega_2$ ). Agora, pode-se medir a nova entrada de energia elétrica no motor. Ela será denotada como  $P'_m$ .

Agora, a relação entre a nova entrada de energia elétrica e a nova velocidade angular é dada por:

$$P'_m = k\omega_2. \quad (3)$$

A mudança de potência ( $\Delta P$ ) necessária para alcançar a nova velocidade angular ( $\omega_2$ ) é, portanto:

$$\Delta P = P'_m - P_m = k\omega_2 - k\omega_1 = k(\omega_2 - \omega_1). \quad (4)$$

O termo  $\Delta P$  representa a potência aplicada pelo ciclista ao sistema. Se  $\Delta P$  é positivo, o ciclista está adicionando potência ao sistema (ajudando o motor). Se  $\Delta P$  é negativo, o ciclista está subtraindo potência do sistema (trabalhando contra o motor).

É importante notar que essa análise assume que o sistema está em estado estacionário, a carga é constante, a eficiência do motor é constante e quaisquer mudanças na potência ou na velocidade angular são devidas exclusivamente à ação do ciclista. Em uma aplicação do mundo real, outros fatores poderiam potencialmente influenciar essas medições como condições climáticas e tráfego por exemplo.

### 3.3 COMUNICAÇÃO COM O SIMULADOR ZWIFT

O ESP32 utiliza a tecnologia BLE para estabelecer a comunicação com o simulador Zwift. Ele é responsável por iniciar a conexão com o simulador Zwift e estabelecer a comunicação bidirecional. Para isso, o ESP32 utiliza um conjunto de comandos e serviços BLE disponíveis em sua biblioteca de desenvolvimento.

O FTMS facilita a troca de dados entre rolos de treinamento e aplicativos de treinamento virtual, como o Zwift. Ele define um conjunto de características e comandos padronizados que permitem a transmissão de informações relevantes, como cadência, potência e velocidade. Como detalhado na Seção 2.4.3, o protocolo é implementado sobre um canal de comunicação BLE.

O ESP32 implementa o perfil FTMS para enviar esses dados ao simulador Zwift. A partir dos dados de cadência e de potência obtidos do sensor de infravermelho e do VESC, respectivamente, e do cálculo da velocidade, há um encapsulamento em pacotes de dados compatíveis com o FTMS. Em seguida, esses pacotes são transmitidos via BLE para o simulador Zwift.

Para garantir a compatibilidade e a interoperabilidade, é necessário seguir as especificações e requisitos do FTMS ao implementar o serviço no ESP32. Isso inclui o uso correto das características e dos formatos de dados definidos pelo FTMS. A inserção de dados em campos errados acarretará em informações erradas ao usuário. Pode-se citar por exemplo que se quiser conectar a cadência fornecida pelo ciclista

Figura 24 – Tabela do bit de definição das características de *bike indoor*.

Flags Bit Name	When Set to 0	When Set to 1	Corresponding Fitness Machine Feature Support bit (see Section 4.3)
More Data (bit 0), see Sections 4.9.1.2 and 4.19.	Instantaneous Speed field present	Instantaneous Speed fields not present	None
Average Speed present (bit 1), see Section 4.9.1.3.	Corresponding field not present	Corresponding field present	Average Speed Supported (bit 0)
Instantaneous Cadence (bit 2), see Section 4.9.1.4.	Corresponding fields present	Corresponding fields not present	Cadence Supported (bit 1)
Average Cadence present (bit 3), see Section 4.9.1.5.	Corresponding field not present	Corresponding field present	Cadence Supported (bit 1)
Total Distance Present (bit 4), see Section 4.9.1.6.	Corresponding field not present	Corresponding field present	Total Distance Supported (bit 2)
Resistance Level Present (bit 5), see Section 4.9.1.7.	Corresponding field not present	Corresponding field present	Resistance Level Supported (bit 7)
Instantaneous Power Present (bit 6), see Section 4.9.1.8.	Corresponding field not present	Corresponding field present	Power Measurement Supported (bit 14)
Average Power Present (bit 7), see Section 4.9.1.9.	Corresponding field not present	Corresponding field present	Power Measurement Supported (bit 14)
Expended Energy Present (bit 8), see Sections 4.9.1.10, 4.9.1.11 and 4.9.1.12.	Corresponding fields not present	Corresponding fields present	Expended Energy Supported (bit 9)
Heart Rate Present (bit 9, see Section 4.9.1.13.	Corresponding field not present	Corresponding field present	Heart Rate Measurement Supported (bit 10)
Metabolic Equivalent Present (bit 10), see Section 4.9.1.14.	Corresponding field not present	Corresponding field present	Metabolic Equivalent Supported (bit 11)
Elapsed Time Present (bit 11), see Section 4.9.1.15.	Corresponding field not present	Corresponding field present	Elapsed Time Supported (bit 12)
Remaining Time Present (bit 12), see Section 4.9.1.16.	Corresponding field not present	Corresponding field present	Remaining Time Supported (bit 13)

Fonte: Documento Fitness Machine Service 1.0, Bluetooth (2017).

com a cadência exibida no simulador o elo entre os dois deve estar correto (que é feito através da indicação correta dos *bits* da tabela, e caso isso esteja incorreto a cadência pode ir para o campo de potência ou outro campo de informação que não corresponde a cadência), observado na Figura 24, bem como o estabelecimento adequado das notificações e indicações BLE para enviar os dados de forma eficiente e confiável ao simulador.

Dessa forma, o ESP32 atua como uma ponte de comunicação entre o rolo de treinamento e o simulador Zwift, utilizando as tecnologias BLE e FTMS. Ele coleta, empacota e transmite os dados de desempenho de forma on-line, permitindo que o usuário visualize e acompanhe essas informações durante o treinamento no simulador.

Deve-se mencionar que a comunicação se comporta de maneira bidirecional, como descrita de maneira sucinta anteriormente neste documento. Dados de condições de rolagem da pista, vento, aclives e declives são parâmetros em que o simulador envia para o microcontrolador, que influenciam no comportamento do motor. Se houver um aclive, o motor irá frear o ciclista e dependendo da inclinação do aclive (quanto maior o aclive, haverá maior torque resistente por parte do motor). O mesmo ocorre



Item	Preço de custo (R\$)
Suporte de alumínio	200,00
Mancal do suporte do motor	50,00
Motor <i>brushless</i> 36 V 250 W	350,00
VESC	450,00
Sensor de obstáculo infravermelho	6,00
ESP32	45,00
Outros	100,00
Total	1201,00

Tabela 2 – Preços de custo dos componentes do projeto.

em um declive, só que no sentido contrário, com o motor funcionando no sentido de rotação do ciclista, auxiliando e aumentando sua velocidade, conseqüentemente. A resistência de rolagem influencia o tipo de bicicleta escolhido no simulador, exatamente como funciona na realidade, em que uma MTB irá desempenhar melhor sua função na estrada de chão do que no asfalto e uma *speed* irá exercer desempenho melhor no asfalto do que em estrada de chão, por exemplo. Por último, o efeito do vento, que pode ser variável, também é simulado como um torque resistente.

### 3.4 ORÇAMENTO E PREÇO FINAL DO PROTÓTIPO

Um dos principais objetivos deste projeto era desenvolver um rolo de treinamento *smart* de baixo custo, tornando essa tecnologia mais acessível para a comunidade de ciclismo, com foco em atletas amadores e entusiastas de ciclismo. A Tabela 2 representa os preços de custo dos componentes utilizados no projeto.

Uma das etapas essenciais para atingir esse objetivo foi utilizar componentes que já se encontravam em posse, e pesquisando seu valor atual de mercado. Enquanto os componentes que se necessitava adquirir foram adquiridos com o decorrer do projeto e por valores comerciais praticados no momento da compra. Portanto, os itens selecionados levaram em consideração a disponibilidade e os preços mais acessíveis encontrados no mercado. Um ponto importante a ser informado é que as baterias não fazem parte do protótipo final. Elas foram adicionadas apenas para fins de apresentação fora de ambiente de laboratório e, portanto, não foram computadas no valor final do custo do produto.

## 4 VALIDAÇÃO

Para validar o rolo de treinamento *smart* construído, o sistema foi dividido em módulos, testados de forma individual. Os seguintes módulos foram definidos: comunicação entre rolo de treinamento e simulador e validação dos dados de cadência, potência e velocidade. O principal objetivo dessa etapa, além de avaliar o funcionamento em si do rolo e a integração com o simulador Zwift, é a validação das medidas de cadência, velocidade e potência. A Figura 25 apresenta o protótipo concluído e os resultados são apresentados e discutidos neste capítulo.



Figura 25 – Rolo de treinamento construído com bicicleta acoplada.

### 4.1 COMUNICAÇÃO ENTRE ROLO DE TREINAMENTO E SIMULADOR

Para comprovar o funcionamento adequado da comunicação entre o rolo de treinamento e o simulador é necessário uma conexão *Bluetooth* e Internet, podendo ser um *smartphone*, um *desktop*, *notebook* ou *tablet* que possuam em suas configurações suporte para ao menos Bluetooth 4.0.

Para este teste foi utilizado um *smartphone* com o aplicativo do Zwift pré-instalado. Após aberto o aplicativo do simulador, deve-se parear os dispositivos com o simulador. Como dito ao longo do desenvolvimento do projeto, os sensores *fitness* utilizam como protocolo de comunicação ANT+ e BLE para se comunicar com o simulador e no caso do rolo de treinamento, esse protocolo é o BLE. Visualizando a Figura 26 pode-se verificar que os sensores de cadência e potência possuem o nome IC\_BIKE.

Esse nome de dispositivo é carregado a partir das configurações do FTMS e todos os sensores possuem a mesma fonte, que é a comunicação entre o ESP32 e o Zwift através do FTMS.

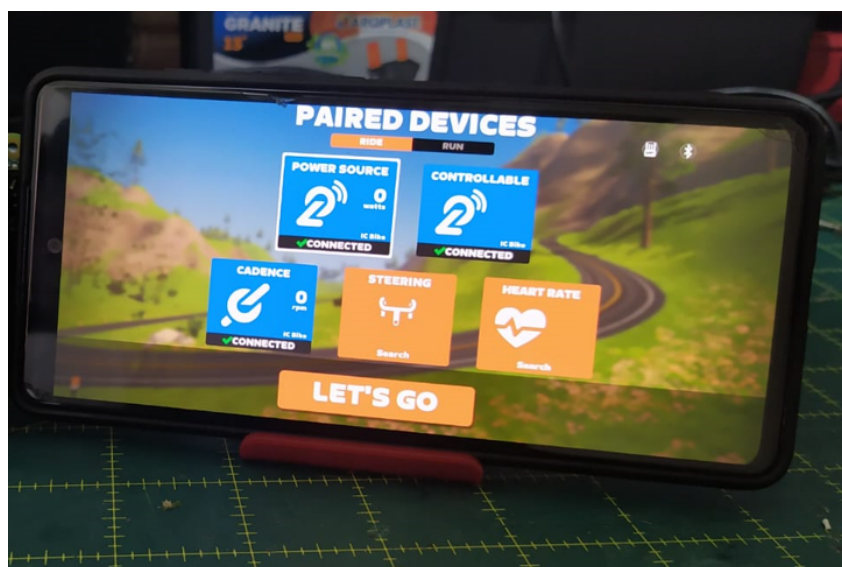


Figura 26 – Envio dos dados via FTMS para o simulador através do ESP32.

Verificadas as conexões BLE e o acesso à *internet*, a partir da observação do Zwift, contatou-se o pareamento completo entre os dispositivos do rolo de treinamento e o simulador. Um teste realizado foi desconectar o Bluetooth e como resultados os sensores pararam de responder, aparecendo a mensagem de *NO SIGNAL* nas caixas de cadência, potência e motor (*controllable*). A velocidade é calculada internamente e disponibilizada apenas dentro do circuito ao qual o ciclista irá executar seu treino e por não aparece nessa tela.

## 4.2 VERIFICAÇÃO DO ENVIO DE DADOS PARA O SIMULADOR

Após a verificação da correta comunicação entre o rolo de treinamento e o simulador, foi necessário averiguar se os dados que estavam sendo coletados e enviados para o simulador de fato eram a cadência, potência e velocidade que deseja-se. Após configurados os *bits* correspondentes de acordo com a 24, enviou-se valores fixos das medidas de interesse. Foram enviados os seguintes valores, 200W para potência, 30 r.p.m para cadência e 20km/h para a velocidade e o resultado que espera-se receber nas *boxes* da tela de pareamento do simulador são os mesmos 200W, 30 r.p.m e 20km/h, como visto na Figura 27. Nota-se que o valor da velocidade não apareceu na tela de pareamento, o que significa que o valor não está sendo enviado para o simulador. Para a cadência e potência os valores se mostraram corretos e que a configuração de *bits* e *flags* foram feitas corretamente.

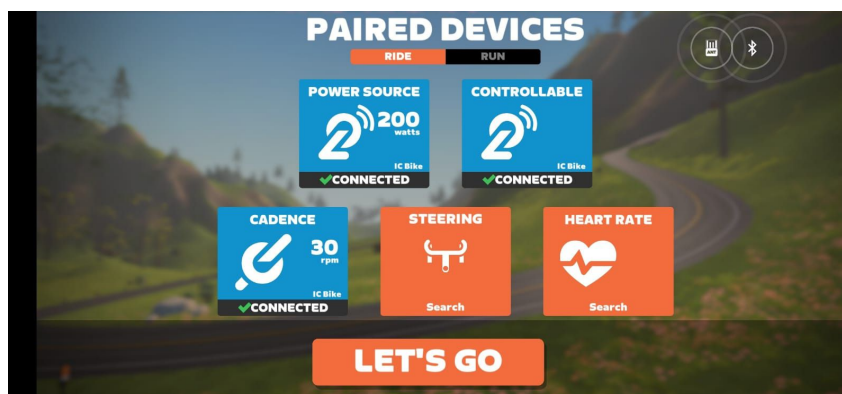


Figura 27 – Dados fixos de potência e cadência enviados via FTMS para o simulador.

### 4.3 VALIDAÇÃO DOS DADOS DE CADÊNCIA, POTÊNCIA E VELOCIDADE

Para a validação dos dados de cadência, velocidade e potência utilizaram-se sensores comerciais de empresas de destaque no ramo. Para cadência e velocidade foram utilizados sensores da empresa Magene, vistos na Figura 28, que se comunicam pelos mesmos protocolos utilizados no desenvolvimento do projeto (ANT+ e Bluetooth).



Figura 28 – Sensor de cadência e velocidade da Magene utilizado para validação.

Para a potência, foi utilizado um medidor de potência da empresa Fávero Assioma, modelo UNO, visto na Figura 29. Esse medidor mede a potência através de um único pedal, diferente de outros tipos de sensores, que costumam utilizar dois pedais, ou do sensor integrado ao pedivela da bicicleta. A empresa disponibiliza os dois pedais para venda, mas somente um deles possui o medidor de potência, sendo o outro apenas um pedal comum. Ele se comunica através do protocolo ANT+.

Todos os dados podem ser visualizados em seus respectivos aplicativos no *smartphone*, mas esses aplicativos geralmente possuem limitações, pois não permitem fácil visualização dos dados de forma on-line, enquanto o ciclista utiliza a bicicleta. Para contornar essa limitação, foi utilizado um ciclocomputador da empresa Garmin, modelo 830 Edge, apresentado na Figura 30. Esse equipamento é capaz de se comunicar com



Figura 29 – Sensor de potência da empresa Favero Assioma, modelo UNO.

qualquer dispositivo através dos protocolos ANT+ e Bluetooth, além de disponibilizar os dados através de telas customizadas para o usuário.



Figura 30 – Ciclocomputador da empresa Garmin, modelo 830 Edge, utilizado para a validação dos dados.

#### 4.3.1 Cadência

Esse sensor é simples de instalar e de configurar, utilizando para fixação apenas um prendedor de borracha para ser anexado ao pedivela da bicicleta, como na Figura 31.

Sua configuração pode ser feita diretamente no aplicativo disponibilizado pela empresa no *smartphone*, visto na Figura 32. O aplicativo utiliza Bluetooth para conectar-se ao sensor e, quando pareados, há a informação se será utilizado para medição de cadência ou de velocidade. Para definir o modo de operação, remove-se a bateria do dispositivo, reiniciando, assim, no outro modo, de maneira automática. Um Light



Figura 31 – Sensor de cadência da Magene instalado na bicicleta.

Emitting Diode (LED) vermelho indica que o sensor está na configuração cadência e um LED verde indica configuração para medição de velocidade.

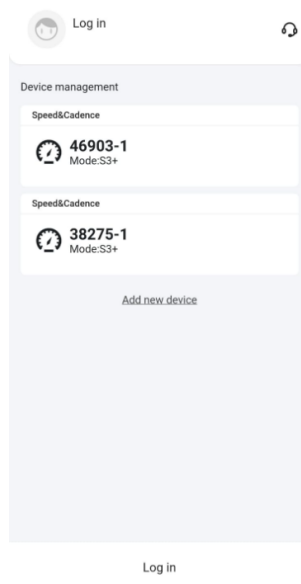


Figura 32 – Aplicativo da empresa Magene para configuração dos sensores de cadência e velocidade.

O aplicativo no *smartphone* apenas consegue disponibilizar os dados de cada sensor de forma individual, portanto não é possível utilizar os dois sensores simultaneamente. Uma solução para visualizar os dados simultaneamente é utilizar o ciclocomputador Garmin, Figura 33, em que é possível disponibilizar diversas informações de forma on-line para o ciclista.



Figura 33 – Garmin configurado para medições de velocidade e de cadência.

O ensaio para validação da cadência consistiu em utilizar o Garmin em conjunto com o sensor de cadência da Magene como referência e comparar os resultados com o sensor implementado no rolo de treinamento. Nenhum ajuste adicional foi necessário no sensor de cadência, pois o mesmo não depende de nenhum parâmetro externo e configurável da bicicleta, dado que mede apenas quantas voltas são efetuadas por período de tempo. Na Figura 34, pode-se verificar como o ensaio foi realizado, com o Garmin e o Zwift conectados ao rolo de treinamento e seus dados comparados ponto a ponto.



Figura 34 – Comparação de resultados entre os sensores utilizando o Garmin Edge 830.

Um gráfico foi elaborado, na Figura 35, para avaliação de resultados. Pode-se perceber que a cadência com o instrumento adicionado no rolo de treinamento se comporta de modo muito parecido com a cadência medida pelo sensor da Magene, para

diferentes condições de operação. As pequenas diferenças nos resultados podem ser explicadas pelo fato de a condição de operação não ser constante e de os dispositivos empregarem intervalos de tempo diferentes para cálculo da cadência instantânea.

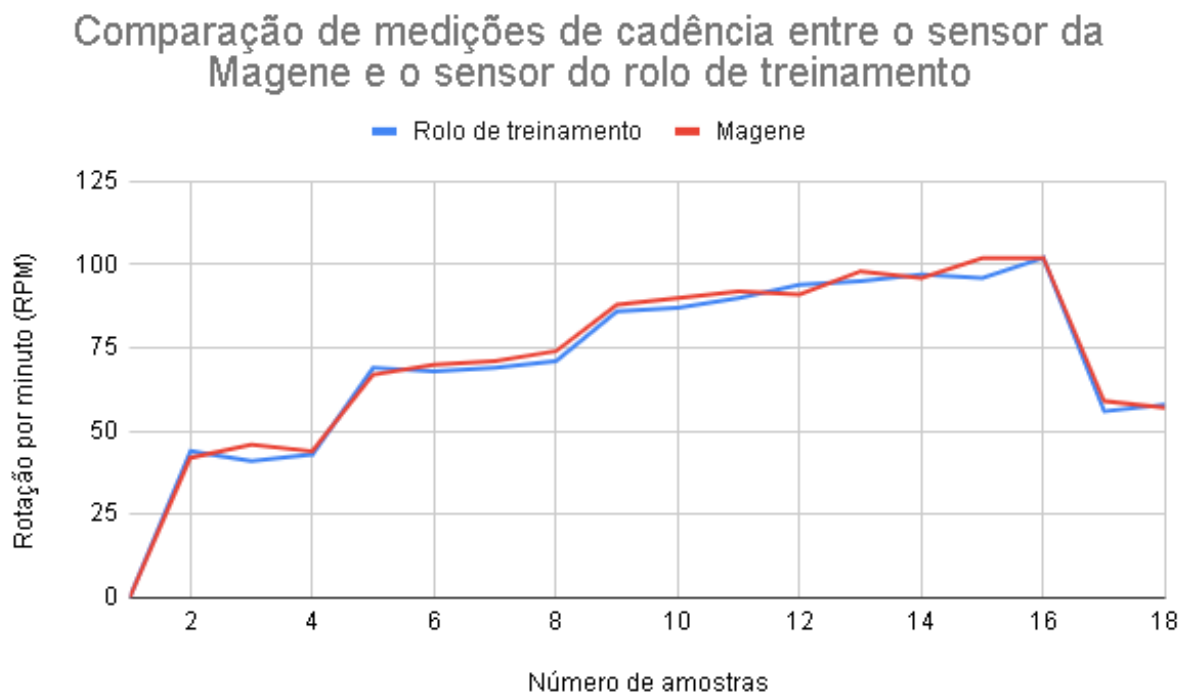


Figura 35 – Comparação de resultados da cadência entre o sensor da Magene e o sensor do rolo de treinamento.

### 4.3.2 Potência

A validação da potência exigiu um pouco de esforço, pois o sensor possui um preço elevado e foi difícil de adquirir. Foi utilizada uma outra bicicleta para os testes porque os pedais já estavam pré-instalados nela, como apresentado na Figura 36. Tomou-se a decisão de não retirar os mesmos para adicionar na bicicleta utilizada em todos os testes até agora. O fato de a bicicleta ter sido trocada não invalida nenhum tipo dos ensaios realizados até o momento.

O primeiro passo foi utilizar o aplicativo da Fávero Assioma para identificar o sensor via ANT+ e realizar o ajuste dos parâmetros necessários. Para isso, inicializa-se o aplicativo via ANT+ no *smartphone*. Para identificar o sensor, deve-se movimentar o pedal sem estar pisando em cima dele, o que faz com que o sensor saia do *sleep mode* e comece a se comunicar.

O processo de ajuste é feito com a bicicleta na posição vertical e o processo é totalmente automático pelo aplicativo, sem a necessidade do usuário intervir em algo. Com o sensor ajustado, deve-se informar também o comprimento do pedivela, pois





Figura 36 – Pedal com medidor de potência da Fávero Assioma.

isso influencia no cálculo da potência. A configuração é simples, como demonstrada na Figura 37.

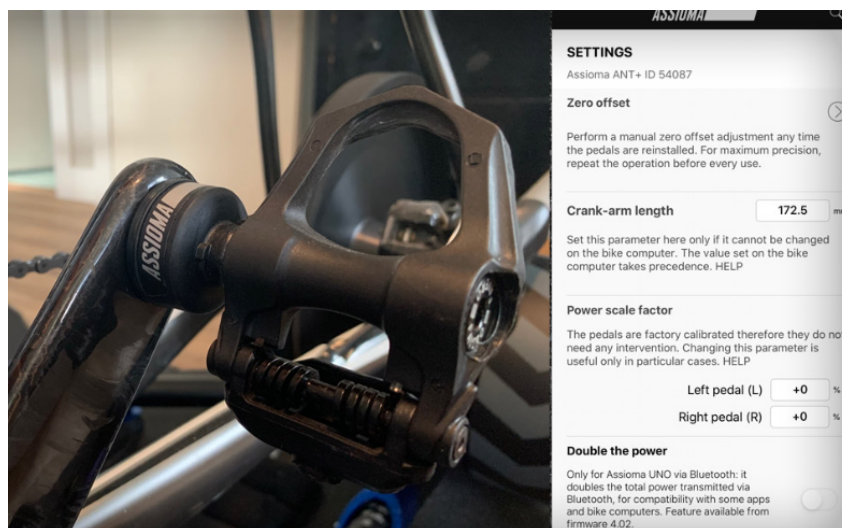


Figura 37 – Configuração do comprimento do pedivela onde está anexado o pedal medidor de potência no aplicativo.

Com o sensor ajustado no aplicativo e o comprimento do pedivela da bicicleta indicado corretamente, o próximo passo consiste em adicionar as informações de potência ao Garmin. No Garmin, deve-se indicar também o tamanho do pedivela da bicicleta, como na Figura 38.

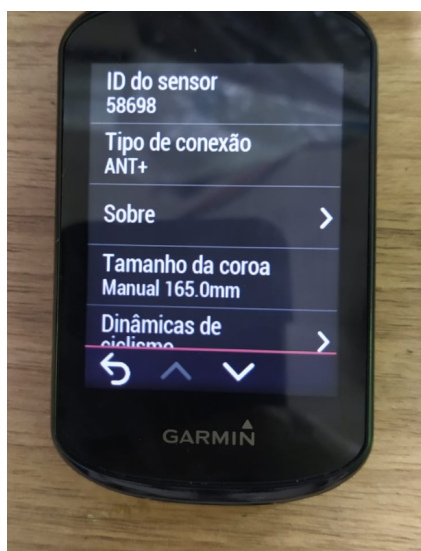


Figura 38 – Configuração do comprimento do pedivela onde está anexado o pedal medidor de potência no Garmin.

O mesmo procedimento para a comparação de dados da cadência foi realizado aqui, com comparação direta entre os dados indicados nos dois sistemas, como ilustra a Figura 39. Isso foi feito considerando um terreno inclinado no simulador, que no Zwift é definido com o parâmetro *grade*.

Vale notar que, como as duas medidas são diferentes (uma é medida diretamente no pedal, e a outra no motor), é esperado que haja alguma inconsistência nos resultados. Principalmente porque não sabemos exatamente como a potência no pedal é calculada, já que ela procura estimar a potência total do ciclista, além disso por questões das diversas variáveis envolvidas que não foram consideradas como grau de inclinação do circuito, vento e tipo de terreno. Por conta disso, foi feito um ensaio de validação.

Com os ensaios feitos utilizando várias medições de potência nas mais variadas inclinações, percebeu-se que o comportamento não era linear, pois o aumento ou diminuição da potência para cada grau de inclinação não possuía o mesmo comportamento. Essas medições foram feitas e colocadas em um gráfico em que no eixo *x* tem-se os graus de inclinação do percurso e no eixo *y* a razão entre a potência medida no rolo de treinamento (PO, de potência obtida) e a medição do sensor de potência da Fávero Assioma (PE, de potência esperada). Com isso, foi feito um ajuste na curva utilizando um polinômio de grau um, como forma de corrigir as medições em função da inclinação do terreno. O resultado é apresentado na Figura 40. Outras curvas foram avaliadas, porém o ganho não foi evidente em relação à aproximação linear. Dessa forma, a implementação ocorreu com o polinômio de grau um, o qual também está descrito na Figura 40.



Figura 39 – Comparação de potência do sensor Fávero Assioma com o do rolo de treinamento.

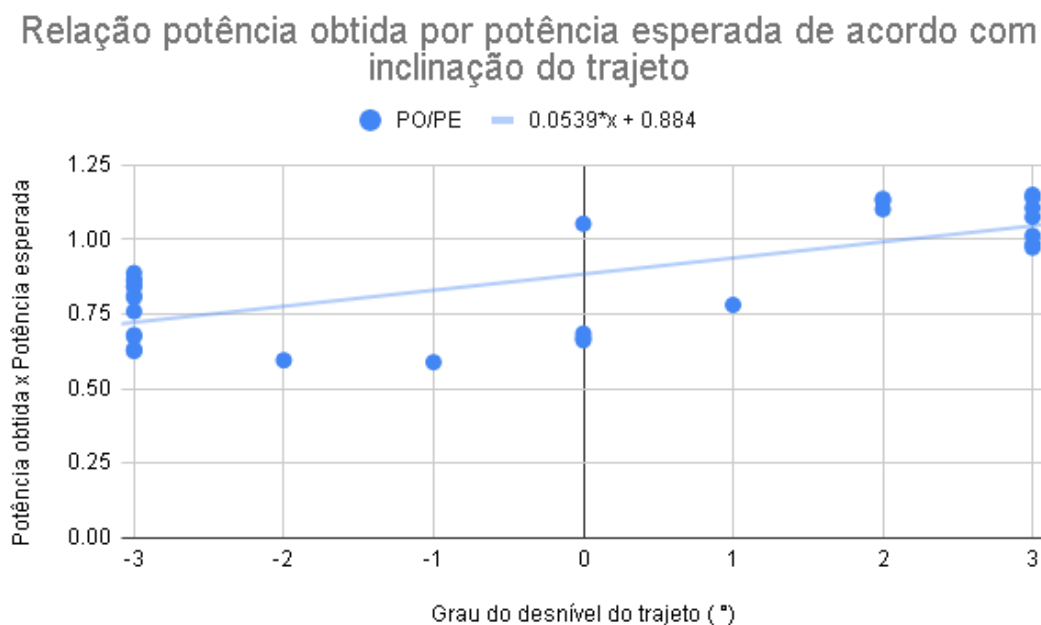


Figura 40 – Ajuste de curva para cálculo da potência esperada.

### 4.3.3 Velocidade

A comparação de dados de velocidade foi obtida da mesma forma que para a cadência e para a potência, mas no caso da velocidade a informação do diâmetro da roda deve ser informado para que a medição seja correta. Esses valores são informados no ciclocomputador e o valor correto foi informado a partir da verificação no site da fabricante do ciclocomputador, vide Figura 41.

De forma simultânea, as medidas foram obtidas utilizando o sensor de velocidade da Magene e as informadas pelo Zwift. A diferença para a visualização dos dados de

Figura 41 – Medidas de roda e pneus informados para o ciclocomputador para cálculo da velocidade.



Medida de roda e pneu	Valor
650 x 20C	1938
650 x 23C	1944
650 x 35A	2090
650 x 38B	2105
650 x 38A	2125
700 x 18C	2070
700 x 19C	2080
700 x 20C	2086
700 x 23C	2096
700 x 25C	2105
Tubular de 700C	2130
700 x 28C	2136
700 x 30C	2146
700 x 32C	2155
700 x 35C	2168

Fonte: Garmin (2021)

velocidade em relação às outras é que a velocidade não é um dado que aparece na tela de sincronização dos sensores, portanto somente dentro do simulador consegue-se verificar o comportamento (a velocidade está informada no topo centralizado do Zwift, em azul), como pode ser visto na Figura 42. Devido a diferente natureza dos dados (do rolo acessíveis por serial e do Zwift/Magene em telas), não foi possível fazer a validação da velocidade do rolo em si.

Os dados de velocidade foram anotados ponto a ponto em determinados momentos do circuito e, com base neles, foi construído um gráfico para verificar se os dados do Zwift condizem com o informado no Garmin. Percebeu-se uma discrepância grande nos dados principalmente quando se relacionou o grau de inclinação do circuito do Zwift com a velocidade do ciclista, ou seja, quando o circuito possuía um declive ou um aclave muito acentuado, o simulador respondia de forma diferente do que era apresentado pelo Garmin. No gráfico da Figura 43 percebe-se que a velocidade do ciclista se manteve constante mesmo quando a inclinação do circuito alterava. Pode ter havido uma compensação do usuário aumentando a potência para que a velocidade se mantenha em maiores inclinações. Mais ensaios poderiam ter sido feitos para se averiguar essa condição e mais amostras coletadas para validação dos dados. Como os dados de potência e cadência foram validados com sensores externos, é possí-



Figura 42 – Velocidade informada no Zwift.

vel assumir que há alguma discrepância nos parâmetros utilizados pelo Zwift para o cálculo da velocidade.

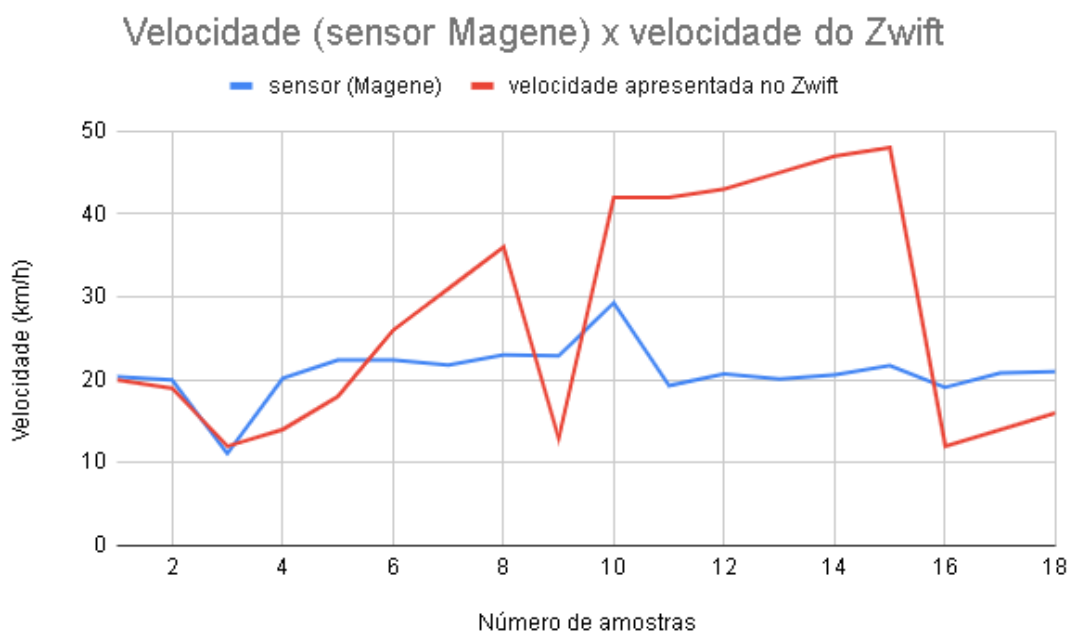


Figura 43 – Relação entre medições de velocidade no Garmin e no rolo de treinamento.

O que se conclui desse comportamento é que, como o Zwift não utiliza os dados de velocidade instantânea do rolo de treinamento, ele está calculando sua própria velocidade dentro do simulador, não utilizando assim os dados reais provenientes do rolo de treinamento. A configuração para enviar os dados via FTMS foi feita da mesma forma que para a cadência e para a potência, utilizando a tabela dos bits e *flags*. Entretanto, na implementação foi possível averiguar que de fato o dado de velocidade não estava sendo enviado corretamente, pois ele não aparecia na tela de sincronização

---

de sensores como um campo de *speed sensor*. Dessa forma, nos ensaios finais se averiguou que o resultado não era coerente com o que o rolo estava impondo.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresenta as principais conclusões do trabalho e perspectivas para trabalhos futuros.

### 5.1 CONCLUSÕES

Com base nos critérios estabelecidos, conclui-se que este projeto de fim de curso obteve sucesso parcial na construção de um rolo de treinamento *smart* de ciclismo de preço acessível. Utilizando ferramentas de desenvolvimento abertas (*open source*), foi possível desenvolver um protótipo funcional que proporciona benefícios significativos à comunidade de ciclismo.

O rolo de treinamento *smart* permite medir o desempenho do ciclista de maneira confiável em relação à cadência e à potência. Por outro lado, a medição de velocidade ainda precisa ser aprimorada. Além disso, o trabalho alcançou êxito na concepção e utilização de um software para a comunicação entre o rolo de treinamento e o simulador, garantindo uma integração adequada e uma experiência de treinamento imersiva.

A validação dos dados adquiridos foi realizada utilizando equipamentos comerciais de destaque no mercado. Todos os sensores foram previamente ajustados de acordo com as suas características e a característica da bicicleta e do ciclista. Essa validação é fundamental para garantir que os ciclistas tenham acesso a informações confiáveis sobre seu desempenho e possam tomar decisões informadas para aprimorar seu treinamento.

Dessa forma, o trabalho cumpriu parcialmente com sucesso seus objetivos específicos, fornecendo à comunidade de ciclismo uma solução acessível com medições de cadência e potência satisfatórias. Com isso o ciclista pode aprimorar seu desempenho treinando de maneira *indoor*. A implementação desse rolo de treinamento *smart* contribui para que ciclistas com menor poder aquisitivo possam realizar treinos com acesso a dados que normalmente só equipamentos de ponta e de alto custo possuem.

### 5.2 PERSPECTIVAS FUTURAS

Com base nas conquistas e avanços alcançados no trabalho desenvolvido até o momento, é possível vislumbrar diversas perspectivas futuras para aprimorar o rolo de treinamento *smart* de ciclismo proposto.

O principal ponto de atenção é a correção da velocidade, em que é calculado pelo rolo de treinamento, mas não há uma integração do dado obtido com o simulador.

Uma melhoria importante seria a adição de uma alimentação elétrica dual, compatível com tensões de 110 V e 220 V. Isso permitiria que o rolo de treinamento funcionasse sem depender exclusivamente de um banco de baterias, aumentando sua

praticidade e usabilidade em diferentes ambientes e locais.

Além disso, uma nova funcionalidade que poderia ser explorada é a transformação do rolo de treinamento construído em um *direct drive*. Nesse caso, o usuário teria a facilidade de utilizar uma plataforma pronta, na qual bastaria remover a roda traseira de sua bicicleta e conectá-la diretamente ao rolo de treinamento, utilizando o próprio cassete do rolo para treinar (ao qual também está acoplado o motor). Essa implementação proporcionaria uma experiência ainda mais realista e imersiva aos ciclistas durante o treinamento *indoor*.

Outro aspecto importante a ser considerado é a ampliação da compatibilidade do rolo de treinamento com outros simuladores disponíveis no mercado. Como muitos simuladores utilizam protocolos similares, seria viável realizar adaptações para tornar o rolo compatível com essas plataformas adicionais. Dessa forma, os usuários teriam uma maior flexibilidade na escolha do simulador que melhor atenda às suas necessidades e preferências.

Adicionalmente, uma perspectiva interessante para o aprimoramento do rolo de treinamento *smart* de ciclismo é a possibilidade de desenvolver um *display* integrado. Essa adição permitiria que os usuários que não desejam utilizar um simulador ainda pudessem visualizar os dados de maneira on-line durante seus treinamentos. Com um *display* incorporado ao rolo de treinamento, os ciclistas teriam acesso imediato às informações de cadência, potência e velocidade, bem como outros dados relevantes, diretamente em seu campo de visão. Isso proporcionaria uma experiência mais conveniente e intuitiva, eliminando a necessidade de utilizar um simulador separado. Além das medições atuais, o *display* poderia apresentar outras informações relevantes, como o tempo de treino e distância percorrida, além de gráficos de desempenho de forma on-line.

Essas melhorias propostas possibilitariam uma evolução no rolo de treinamento *smart* de ciclismo, tornando-o ainda mais atraente e competitivo no mercado. Com recursos aprimorados, maior flexibilidade de uso, uma experiência de treinamento mais envolvente e a adição do *display* integrado, o rolo de treinamento poderia atender às necessidades e expectativas dos ciclistas de forma ainda mais completa.

Ademais, seria relevante explorar a integração com dispositivos de monitoramento de frequência cardíaca e outros sensores biométricos, permitindo que os ciclistas tenham acesso a informações abrangentes sobre seu desempenho físico durante o treinamento.



## REFERÊNCIAS

ABELLA, John. **The Absolute Beginner's Guide to Zwift**. [S.l.: s.n.], mai. 2020. url:<https://us.zwift.com/>. Acesso em 22 de abril. 2023.

ABI RESEARCH. **Bluetooth Wireless Technology**. [S.l.: s.n.], 2015. url:<https://mundoconectado.com.br/artigos/v/33673/o-que-e-bluetooth-le-low-energy>. Acesso em 16 de maio 2023.

ARAUJO, André Silveira de; VASCONCELLOS, Pedro de. **Bluetooth Low Energy**. [S.l.: s.n.], 2012. url:[https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos\\_v1\\_2012\\_2/bluetooth/index.htm](https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos_v1_2012_2/bluetooth/index.htm). Acesso em 16 de maio 2023.

ARDUINO. **Arduino Uno Rev3**. [S.l.: s.n.], 2023. url:<https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3>. Acesso em 20 de abr. 2023.

BKOOOL. **Experience indoor cycling like never before**. [S.l.: s.n.], 2019. url:<https://www.bkool.com/en/cycling-simulator>. Acesso em 21 de abril. 2023.

BLUETOOTH. **Specifications and Documents**. 1.0. ed. [S.l.: s.n.], 2017. Disponível em: [https://www.bluetooth.org/DocMan/handlers/DownloadDoc.ashx?doc\\_id=423422](https://www.bluetooth.org/DocMan/handlers/DownloadDoc.ashx?doc_id=423422).

COPY SUPPLY. **Hoverboard Bluetooth**. [S.l.: s.n.], jun. 2023. <https://www.copysupply.com.br/lazer/hoverboard/hoverboard-bluetooth-6-5-preto-top-tag>. Acesso em 2 de junho de 2023.

COXWORTH, Ben. **Bkool simulator creates any animated cycling route you want, on the fly**. [S.l.: s.n.], 2015. url:<https://newatlas.com/bkool-cycling-simulator/36840/>. Acesso em 21 de abril. 2023.

DEFENSEBRIDGE. **What is an electronic speed controller?** [S.l.: s.n.], mai. 2023. url:<https://defensebridge.com/article/what-is-an-electronic-speed-controller.html>. Acesso em 20 de maio. 2023.

DRIEMEIER, Larissa. **Sensores e Transdutores**. São Paulo: [s.n.], 2012. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4119238/mod\\_resource/](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4119238/mod_resource/)

content/1/01%5C%20Introdu%5C%C3%5C%A7%5C%C3%5C%A3o%5C%20a%5C%20sistemas%5C%20de%5C%20medi%5C%C3%5C%A7%5C%C3%5C%A3o.pdf. Acesso em: 16 abr. 2023.

GARMIN. **Tamanho da roda e circunferência.** [S.l.: s.n.], jun. 2021. <https://www8.garmin.com/manuals/webhelp/edge830/PT-BR/GUID-DB0BC20A-DADF-41EB-A61C-14BEC158B43C.html>. Acesso em 2 de junho de 2023.

HECTOR, Kate. **Comprehensive guide to indoor cycling and trainers.** [S.l.: s.n.], abr. 2021. url:[https://stagescycling.com/en\\_us/content/guide-to-indoor-cycling#What-is-power](https://stagescycling.com/en_us/content/guide-to-indoor-cycling#What-is-power). Acesso em 2 de junho de 2023..

KLEINA, Nilton. **O que é Bluetooth LE (Low Energy).** [S.l.: s.n.], 2023. url:<https://mundoconectado.com.br/artigos/v/33673/o-que-e-bluetooth-le-low-energy>. Acesso em 16 de maio 2023.

LANGANI, Rodrigo. **Smart Trainers: tudo o que você queria saber sobre os rolos inteligentes mas tinha vergonha de perguntar!** [S.l.: s.n.], 2018. url:<https://viivaassessoria.com/smart-trainers-tudo-o-que-voce-queria-saber-sobre-os-rolos-inteligentes-mas-tinha-vergonha-de-perguntar/>. Acesso em 2 de junho de 2023.

MATTEDE, Henrique. **Como Funciona um Sensor de Proximidade?** [S.l.: s.n.], 2018. url:<https://www.mundodaeletrica.com.br/como-funciona-um-sensor-de-proximidade/>. Acesso em 20 de agosto. 2023.

MATTEDE, Henrique. **Motor de corrente contínua, características e aplicações!** [S.l.: s.n.], nov. 2019. url:<https://www.mundodaeletrica.com.br/motor-de-corrente-continua-caracteristicas-e-aplicacoes/>. Acesso em 10 de abril. 2023.

NEHR, Zach. **What is ANT+ and why do I need it for cycling indoors?** [S.l.: s.n.], jul. 2022. url:<https://www.cyclingnews.com/features/what-is-ant-plus/>. Acesso em 15 de mar. 2023.

OLIVEIRA, Euler. **Conhecendo o NodeMCU-32S ESP32.** [S.l.: s.n.], 2017. url:<https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3>. Acesso em 20 de abril. 2023.

POWERDRIVES. **What is an ESC?** [S.l.: s.n.], ago. 2022. url:<https://powerdrives.net/blog/what-is-an-esc>. Acesso em 20 de maio. 2023.

- PPGENFIS, UFRGS. **Sensores reed-switch**. [S.l.: s.n.], 2009.  
url:<https://ppgenfis.if.ufrgs.br/mef004/20061/Cesar/SENSORES-Reed-switch.html>.  
Acesso em 17 de mar. 2023.
- STA ELETRÔNICA. **Balanceamento de baterias de Lítio-Ion**. [S.l.: s.n.], jun. 2023.  
<https://www.sta-eletronica.com.br/artigos/baterias-recarregaveis/baterias-de-litio/balanceamento-de-baterias-de-litio-ion>. Acesso em 2 de junho de 2023.
- SVB. **What is FTMS?** [S.l.: s.n.], jul. 2020.  
url:<https://www.noble-pro.com/bluetooth/ftms/what-is-ftms/>. Acesso em 2 de junho de 2023.
- VESC PROJECT. **Welcome to the Home of the VESC Open Source Project!**  
[S.l.: s.n.], 2018. url:<https://vesc-project.com/>. Acesso em 25 de maio. 2023.
- VIM. **VIM - Vocabulário Internacional de Metrologia**. Guaratinguetá: [s.n.], 2012.  
Disponível em:  
[https://metrologia.org.br/wpsite/wp-content/uploads/2021/02/vim\\_2012.pdf](https://metrologia.org.br/wpsite/wp-content/uploads/2021/02/vim_2012.pdf).  
Acesso em: 16 abr. 2023.
- ZWIFT. **JUMP ON ZWIFT HUB, JUMP INTO ZWIFT**. [S.l.: s.n.], 2015.  
url:<https://us.zwift.com/>. Acesso em 22 de abril. 2023.