

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA**

**MÁRIO ELIAS MARINHO VIEIRA
VICTOR CAMARGO GONÇALVES**

**MEDIDOR DE POTÊNCIA FISIOLÓGICA PARA CICLISTAS:
DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2015

MÁRIO ELIAS MARINHO VIEIRA
VICTOR CAMARGO GONÇALVES

**MEDIDOR DE POTÊNCIA FISIOLÓGICA PARA CICLISTAS:
DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica, do Departamento de Eletrônica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Luiz Stevan Jr.

PONTA GROSSA

2015



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Ponta Grossa

Departamento de Eletrônica
Engenharia Eletrônica



TERMO DE APROVAÇÃO

MEDIDOR DE POTÊNCIA FISIOLÓGICA PARA CICLISTAS:
DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

por

MÁRIO ELIAS MARINHO VIEIRA E VICTOR CAMARGO GONÇALVES

Este(a) Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado(a) em 26 de novembro de 2015 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica. Os candidatos foram arguidos pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Dr. Sergio Luiz Stevan Jr
Prof.(a) Orientador(a)

Prof. Dr. Sergio Okida
Membro titular

Prof. Msc. Murilo Oliveira Leme
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

À Deus em primeiro lugar
À minha esposa amada
À minha família
Aos meus amigos
Mário Elias M. Vieira

Primeiramente à Deus, que sem Ele isso
não seria possível
À minha família pela paciência
Aos meus amigos pelos momentos
À minha namorada pelo companheirismo
Victor C. Gonçalves

AGRADECIMENTOS

Essas pequenas palavras não podem representar o meu agradecimento a todas as pessoas que me ajudaram nessa importante parte da minha vida. Peço desculpas as pessoas que não foram citadas aqui, porém saibam que vocês foram fundamentais para essa conquista tão importante para mim.

Agradeço a Deus pela sabedoria, força e saúde que me proporcionou estudar as áreas que mais sou feliz: eletrônica e esporte.

Agradeço a minha esposa Tatiana Vieira por todo seu suporte e pela sua dedicação em me ajudar em todos os meus desafios, além das horas ausentes, que foram muitas. Agradeço minha família por suas orações e pelo carinho que recebi para trilhar esse caminho de muito trabalho.

Mário Elias M. Vieira

Dedico meu esforço não somente a este trabalho, mas também a toda a minha graduação, primeiramente a minha mãe Tânia Camargo, por sempre me apoiar em minhas decisões e por me dar a segurança para conseguir aproveitar essa oportunidade da melhor forma possível. À minha avó Therezinha Boaro e minha madrinha Glaucia Costa, que sempre me deram força e incentivo para chegar ao fim desta longa caminhada.

Agradeço a meus amigos pela amizade e por fazer dessa fase, uma experiência inesquecível. Lembro também em memória do meu pai Paulo Gonçalves, que com certeza estaria muito orgulhoso de seu filho.

Victor C. Gonçalves

Agradecemos ao nosso orientador Dr Sergio Luiz Stevan Jr pelo excelente trabalho que nos guiou em todas as etapas de forma profissional e dedicada, acreditando que podemos melhorar o esporte nacional.

Agradecemos aos nossos colaboradores Msc Mauro Ricetti Paes e Msc Paulo Eduardo Redkva pelo apoio, pelo material, pelas longas horas de trabalho e principalmente por acreditarem em nós e em nosso trabalho, confiando-nos a oportunidade de trabalhar com esportes.

Pois a sabedoria entrará em seu coração,
e o conhecimento será agradável à sua
alma.

Bíblia Sagrada, Provérbios 2:10

RESUMO

VIEIRA, Mário Elias M. GONÇALVES, Victor Camargo. **Medidor de Potência Fisiológica para Ciclistas:** Desenvolvimento do protótipo. 2015. 68. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2015

Este trabalho tem como objetivo desenvolver o protótipo de um medidor de potência fisiológica aplicado no ciclismo e no triatlo. A importância da medição de dados provenientes da condição física e fisiológica do atleta tem se tornado cada vez mais importante, fornecendo base para tomada de decisões e estratégia para treinamento e provas, além de avaliações temporais. Atualmente, a potência é a melhor grandeza para avaliação de condicionamento físico e fisiológico em esportes que utilizam bicicletas, pois é uma grandeza que não é influenciada por fatores externos ao esporte, como emoção, alimentação, etc. A análise do atleta pode ser completa quando a potência é comparada com outras grandezas, como por exemplo: frequência cardíaca, velocidade e PSE (Percepção Subjetiva de Esforço). O desenvolvimento do protótipo foi realizado com o estudo de Extensometria para medição de força e torque, sensores de inércia para medição de cadência, condicionamento de sinais, microcontroladores para processamento dos dados e realização dos cálculos e comunicação *Bluetooth* para transmissão dos dados. As medições de força e torque foram divididas em duas análises: angular e quantitativa, sendo que por meio da análise angular obteve-se a região de 90° (ângulo da pedivela) como a melhor para a aplicação de força; já por meio da análise quantitativa obteve-se a equação característica de tensão elétrica em função do torque aplicado. As medições de cadência foram validadas por meio de análise de vídeo, tendo como resultado principal, todos os valores dentro do intervalo considerando o desvio padrão. Com base nos valores práticos de torque e cadência obtidos em laboratório, foi calculado a potência das sete amostras, sendo o valor de potência máxima de 317,82W, potência média de 257,69W e potência mínima de 190,13W. Além dos resultados práticos, obteve-se alguns resultados no âmbito acadêmico, sendo eles: duas publicações em congressos técnicos, proteção intelectual (patente) registrada sob o protocolo BR 10 2015 018633 9 juntamente ao INPI e uma iniciação científica. Para trabalhos futuros, os objetivos são: validar o produto, coletar dados em situações de treino e competições, pesquisar a influência de condições extremas de uso (temperatura, umidade, pressão, etc). Conclui-se então que o objetivo deste trabalho foi alcançado e que seus resultados foram satisfatórios para o desenvolvimento do protótipo.

Palavras-chave: Instrumentação. Extensometria. Potência Fisiológica. Ciclismo.

ABSTRACT

VIEIRA, Mário Elias M. GONÇALVES, Victor Camargo. **Physiological Power Meter for Cyclists**: development of a prototype. 2015. 68. Completion of course work (Bachelor's degree in Electronic Engineering) - Federal Technological University of Paraná. Ponta Grossa, 2015.

This work aims to develop a prototype of a physiological power meter used in cycling and triathlon. The importance of measuring data from the physical and physiological condition of the athlete has become most important, providing the basis for decision taking and strategy for training and competition, and temporal assessments. Currently power is the best way for evaluation of physical and physiological conditioning in sports using bicycles, because is a magnitude that is not influenced by external factors to the sport, as emotion, food, etc. The athlete analysis may be complete when power is compared to other quantities such as for example, heart rate, speed and PES (perceived exertion). The prototype development was conducted with study Extensometria for measuring force and momentum, inertial sensors for measuring cadence, signal conditioning, microcontrollers for processing the data and perform the calculations and Bluetooth communication for data transmission. The force and torque measurements were divided into two analyzes: quantitative and angle, and the angle through analysis yielded the region of 90 ° (crank angle) as the best for the application of force; already by a quantitative analysis gave the characteristic equation depending on the voltage applied torque. The cadence measurements were validated through video analysis. Based on the practical values of torque and cadence obtained in the laboratory, the power of the seven samples was calculated, and the maximum power value of 317,82W, average power 257,69W and minimum power 190,13W. In addition to the practical results, we obtained some results in the academic field, namely: two publications in technical conferences, intellectual property protection (patent) registered under BR protocol 10 2015 018 633 9 along the INPI and an undergraduate student. For future work, the objectives are to validate the product, collect data in training situations and competitions, researching the influence of extreme conditions of use (temperature, humidity, pressure, etc.). It follows then that the objective was achieved and that its results were satisfactory for the development of the prototype.

Keywords: Instrumentation. Extensometry. Physiological power. Cycling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Comparação entre os métodos de medição de condicionamento físico/fisiológico Fonte: adaptada de Friel, 2012, p.19	18
Figura 2 - Exemplo de um medidor de potência portátil (a) e um cicloergômetro (b)	21
Figura 3 - Locais de instalação do sensor de força: coroa, pedal, cubo traseiro e pedivela Fonte: adaptado de Powertap, 2015	22
Figura 4 - Medidor de potência da SRM [®] , instalado já na coroa, modelo: CANNONDALE STANDARD [®]	23
Figura 5 – Medidor de potência da PowerTap [®] de cubo, modelo: G3 HUB [™] Fonte: Powertap (2015)	25
Figura 6 - Medidor de potência da QUARQ [®] de coroa, modelo: ELSA RS [®] Fonte: Quarq (2015)	25
Figura 7 - Medidor de potência da Garmin [®] dos pedais, modelo: Vector 2S [®] Fonte: Garmin (2015)	26
Figura 8 - Exemplo do medidor de potência da Power2Max [®] , modelo: S [®] Fonte: Power2max (2015)	26
Figura 9 - Medidor de potência da Stages [®] da pedivela, modelo: Shimano Dura Ace [®] Fonte: Stages (2015)	27
Figura 10 – Mensagem de inacessibilidade do site da loja da Stages [®]	28
Figura 11 - Fluxograma de funcionamento de um Medidor de Potência convencional, fonte: autoria própria.	31
Figura 12 - Modelo escolhido de Extensômetro (uniaxial e linear)	33
Figura 13 - Circuito de ponte completa	34
Figura 14 - Um quarto de Ponte	35
Figura 15- Meia ponte com Strain Gages em lados opostos.....	36
Figura 16 – Ponte completa	37
Figura 17 - 1/2 Ponte com amplificador de instrumentação Fonte: adaptado de Javarez Junior; Martins (2012) e Instruments(1997)	38
Figura 18 - MPU 6050 Fonte : Invensense, 2013, p. 21	39
Figura 19 - Diagrama de blocos MPU 6050 Fonte: Invensense (2013).....	40
Figura 20 - Arduino Nano Fonte: Arduino (2015)	41
Figura 21 - Modulo <i>Bluetooth</i> HC-05 Fonte: Iteadstudio (2010)	42
Figura 22 - Diagrama de funcionamento do protótipo	43
Figura 23 - Sensor instalado e placa de fiação instalada Fonte: autoria própria	44
Figura 24 - Esforço normal ao eixo longitudinal: deformação e tensão.....	45
Figura 25 - Demonstração do cálculo de velocidade angular,.....	47
Figura 26 - Foto da vista superior da placa com o circuito eletrônico Fonte: autoria própria	48
Figura 27 - Disposição da placa na pedivela em relação a bicicleta Fonte: autoria própria	49
Figura 28 - Tamanho da pedivela e da placa Fonte: autoria própria	50

Figura 29 – Ângulos de força analisados na pedivela Fonte: autoria própria.....	52
Figura 30 - Força aplicada pelo ciclista no pedal em função do ângulo da pedivela Fonte: Carpes et al (2005).....	52
Figura 31 – Formas de onda obtidas com a variação do ângulo da pedivela, a) torque de 35,48 N.m e b) torque de 44,69N.m Fonte: autoria própria.....	53
Figura 32 – Exemplo de correção no ângulo do pé no pedal em relação a pedalada	54
Figura 33 – Condições de teste com destaque para o peso padrão utilizado gerando o torque na pedivela esquerda Fonte: autoria própria.....	55
Figura 34 - a) instalação do modulo Bluetooth e do MPU-6050 na pedivela; b) Estrutura e sentido de rotação do teste Fonte: autoria própria.....	58
Figura 35 - Imagem retirada da filmagem de validação do sistema de medição de cadência do protótipo Fonte: arquivo pessoal.....	59
Figura 36 - Exemplo de visualização dos dados no dispositivo móvel.....	62
Figura 37 - Perspectiva do protótipo desenvolvido neste trabalho Fonte: Patente Requerida, imagem 2.....	63
Gráfico 1 – Curva “mV” representando os dados coletados em comparação com a curva perfeitamente linear Fonte: autoria própria.....	56
Gráfico 2 – Valores médios coletados na validação.....	59
Gráfico 3 – Curva de potência e cadência referente as coletas de dados em laboratório Fonte: autoria própria.....	61
Quadro 1 - Simulação de compra de medidor da SRM em 27/10/2015.....	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplo de descrição para cada nível de PSE, considerando níveis entre esforço leve e esforço pesado.....	17
Tabela 2 – Classificação do nível e do tipo de atleta utilizando a potência máxima de saída por quilograma.....	19
Tabela 3 - Composição e fator de sensibilidade para confecção de extensômetro de resistência elétrica.....	33
Tabela 4 – Valores das medições de Tensão em função do Torque aplicado na pedivela.....	56
Tabela 5 - Análise estatística dos resultados obtidos na validação da medição de cadência.....	60
Tabela 6 – Valores de potência referente a cada amostra prática coletada.....	61
Tabela 7 – Cronograma de atividades dos trabalhos futuros	65

LISTA DE ABREVIATURAS

FC	Frequência Cardíaca
PSE	Percepção Subjetiva de Esforço
RPE	<i>Rating of Perceived Exertion</i>
W	Watts
kg	quilograma
R	Resistência elétrica
PG	Ponta Grossa
P	Potência
F	Força
X	Tamanho da pedivela
ω	Velocidade angular
Rad	Radianos
s	Segundos
rpm	Rotação por minuto

LISTA DE SIGLAS

K	Fator <i>Gage</i>
ϵ	coeficiente de deformação do material
KG	coeficiente de Extensometria
Vo	Tensão de saída
Vex	Tensão de entrada
ADC	Conversor analógico digital
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
SDA	Serial Data
SCL	Serial <i>Clock</i>

LISTA DE ACRÔNIMOS

RTC	<i>Real Time Clock</i>
SRM	<i>Schoberer Rad Messtechnik</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
MEMS	Sistemas Micro Eletro Mecânicos

DMP *Digital Matrix Processor*
LCD *Liquid Crystal Display*
EEPROM *Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*
GFSK *Gaussian frequency-shift keying*
DC *Direct Current*
MPFC *Medidor de Potência Fisiológica para Ciclismo*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	14
1.2 A POTÊNCIA FISIOLÓGICA	15
1.3 A IMPORTÂNCIA DE SE MEDIR A POTÊNCIA.....	19
1.4 ESTADO DA ARTE.....	20
1.5 MERCADO NACIONAL	27
1.6 REQUISITOS DO SISTEMA.....	28
1.7 OBJETIVO GERAL	29
1.8 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	29
2 METODOLOGIA	30
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	31
3.1 EXTENSOMETRIA	31
3.2 CONDICIONAMENTO DE SINAL.....	34
3.3 AMPLIFICAÇÃO DO SINAL.....	37
3.4 SENSORES INERCIAIS	38
3.5 MICROCONTROLADOR	40
3.5.1 PLATAFORMA ARDUINO NANO.....	41
3.6 COMUNICAÇÃO BLUETOOTH.....	42
4 DESENVOLVIMENTO	43
4.1 EXTENSOMETRIA	43
4.2 TRATAMENTO DOS DADOS.....	46
4.2.1 Cálculo da potência	46
4.2.2 Velocidade Angular.....	47
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
5.1 MEDIÇÕES DE FORÇA E TORQUE.....	51
5.2 MEDIÇÕES DE CADÊNCIA	57
5.3 MEDIÇÕES DE POTÊNCIA.....	60
5.4 VISUALIZAÇÃO DOS DADOS	62
5.5 RESULTADOS ACADÊMICOS.....	62
6 CONCLUSÃO	66
REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

O ciclismo profissional é um esporte que depende tanto do perfil técnico do atleta quanto do seu condicionamento físico, tornando-o cada vez mais um esporte que necessita do monitoramento e análise do desempenho do atleta. A evolução da tecnologia tem proporcionado grandes avanços no conhecimento do esporte, onde a sua aplicação tem como objetivo principal, a quantificação da melhoria de desempenho dos atletas (CANDOTTI, 2003) (OKAZAKI *et al*, 2012).

O entendimento do esporte é essencial para o aprimoramento do atleta e o seu desenvolvimento como competidor. No ciclismo os sistemas energéticos, aeróbico e anaeróbico, são extremamente importantes para o atleta, porém cada um tem sua taxa de influência no desempenho do ciclista, dependendo da modalidade praticada, como: estrada; pista; *mountain bike*; entre outras (MARTINS *et al*, 2007). O entendimento da especificidade da modalidade pode gerar uma grande base de informações para que estratégias e cargas de treinamento sejam otimizadas, como também diminuir o índice de lesões (OKAZAKI *et al*, 2012).

Um exemplo claro no entendimento desses conceitos é demonstrado em provas de curta duração com o *Sprint* final definindo o campeão. Segundo Bertucci, Tair e Grappe (2005) a potência de pico elevada no início da prova é fundamental na estratégia em provas de 1000m a 4000m e costuma determinar o campeão em uma competição do tipo contrarrelógio. Segundo ele, o tempo da primeira volta está diretamente correlacionada com o tempo total da prova de 1000m (composta por 4 voltas de 250m). Estas informações evidenciam que a medição da potência, do tempo, da velocidade e a estratégia de competição e treinamento são fundamentais para um bom condicionamento físico e fisiológico, fornecendo, condições para melhoria de rendimento.

Nesse contexto este trabalho propõe o desenvolvimento de um medidor de potência fisiológica para ciclistas (MPFC) a ser implementado na pedivela, que caracteriza-se por ser de baixo custo e de tecnologia nacional, acessível a ciclistas e triatletas; afim de que o acompanhamento e a análise do condicionamento do atleta sejam quantificados de forma científica e profissional.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O treinamento de um atleta baseia-se nas adaptações fisiológicas e metabólicas, além da variação de cargas, para a realização dos exercícios, que objetivem a melhoria de seu condicionamento físico (FRIEL, 2012) (COSTA *et al.*, 2014).

Dentro deste contexto, a medição de potência é o método (de controle de carga) mais (preciso) utilizado pelos ciclistas de elite, pois é uma metodologia não invasiva que possui uma aplicabilidade em condições extremamente diferentes (FRIEL, 2012) (ALLEN; COGGAN, 2010).

O tipo de treinamento é fundamental para a modalidade em que o atleta estará envolvido, em uma prova de resistência de estrada (170km por exemplo) o atleta tem que despender um valor de potência durante uma hora; ou em uma prova de pista de curta duração (500m por exemplo) na qual o atleta tem que desempenhar sua potência máxima para percorrer a distância no menor tempo possível (FRIEL, 2012). Em outras palavras, este tipo de equipamento é voltado a todos os ciclistas desde o velocista puro (200m) até o fundista extremo (estrada).

Os dados coletados a partir de MPFC podem permitir a análise das diferentes condições do atleta correlacionadas às distintas partes de um trajeto, como em uma subida íngreme ou em um trajeto plano com vento contrário. Essas análises podem ser base para decisões baseadas em dados científicos, como: falta de hidratação ou alimentação adequada no final do percurso; gasto de energia desnecessário nas descidas; e assim por diante (ALLEN; COGGAN, 2010). Este tema será abordado de forma mais específica nos próximos itens.

Segundo Allen e Coggan (2010), a medição da potência pode contribuir não somente para análise do condicionamento do atleta, mas também na verificação do treinador se o treinamento foi correto, além de facilitar a elaboração de estratégias para competições. É comumente verificado que um treinador após utilizar a medição de potência em seus trabalhos dificilmente volta para os métodos antigos, uma vez que verifica-se notoriamente o ganho de operacionalidade e confiabilidade nos dados.

1.2 A POTÊNCIA FISIOLÓGICA

O condicionamento físico e fisiológico de um atleta só pode ser quantificado por meio de grandezas que tornem esses dados acessíveis ao treinador em suas análises. Para atletas iniciantes ou amadores, normalmente se utiliza o tempo gasto para percorrer determinada distância, calculando então uma velocidade média que é um parâmetro inicial simples de melhoria de condicionamento (Volume versus Intensidade). Porém, em atletas de alto nível, a análise desse condicionamento deve ser mais profunda e específica, com objetivo de medir o condicionamento em todo o trajeto, assim como determinar seus limites e evoluções.

Avaliações em laboratório ou em condições pré-estabelecidas são comumente utilizadas para conhecer o perfil do atleta, seu condicionamento inicial e final após um período de treinamento, além de levantamento de limiares e testes de esforço máximo. A maior aplicação dos dados coletados nas avaliações seria durante uma comparação com os valores obtidos em treinos e provas. Para que ocorra essa comparação e análise, é necessário realizar medições durante o exercício, como por exemplo, a potência.

Além da potência, existem outras três grandezas que são utilizadas como analisadores de condicionamento físico/fisiológico: a frequência cardíaca, a velocidade e a sensação do atleta (Percepção Subjetiva de Esforço). Destas três grandezas, somente a velocidade não está correlacionada fisiologicamente com a potência. O método de análise de condicionamento com base nos valores de potência é o mais caro e complexo entre os citados acima, além de uma pergunta que precisa ser respondida: Qual a justificativa de se utilizar esse método em vez dos outros? Para responder essa questão, é apresentado abaixo um pequeno texto comparando a potência com cada método já mencionado.

- Frequência Cardíaca (FC)

Segundo Friel (2012), a frequência cardíaca (FC) é um dado reativo, não proativo. Isso quer dizer que o valor da FC é alterada após a exigência de um esforço já estiver começado, porque o coração vendo essa exigência bombeará mais sangue em menos tempo. A FC pode ser utilizada como uma informação adicional que pode ser cruzada com a potência aeróbia realizada pelo atleta. Entretanto, uma análise realizada somente em função do valor da FC pode resultar

em falhas na análise do condicionamento do atleta, uma vez que a FC recebe influências externas diferentemente da potência. Essas influências podem ser: a dieta com bebidas e alimentos que alteram o seu valor (caféina, sal, etc); estresse psicológico; qualidade no sono; e a emoção do dia da corrida (FRIEL, 2012) (SRM, 2015).

- Velocidade

O método de análise do condicionamento físico pela velocidade também sofre influências externas no seu valor. O vento e a inclinação do relevo, interferem diretamente no valor da velocidade imposta pelo atleta e essa leitura pode não representar o condicionamento do atleta. Isto fica evidente com relação às inclinações, pois o atleta não precisa pedalar para aumentar sua velocidade em uma descida, e precisa aplicar muito esforço para manter sua velocidade em uma subida, e isto pode ser aumentado com o aumento da inclinação. O mesmo acontece com a ação o sentido e velocidade de deslocamento das massas de ar. Em caso de vento contrário o ciclista precisa aplicar maior potência ao pedalar para desenvolver determinada velocidade; por outro lado, se o vento estiver a favor do ciclista, este aumenta sua velocidade, mesmo não gastando mais energia para isso (FRIEL, 2012).

É importante evidenciar que a velocidade faz parte da composição do valor de potência. Como o ciclismo é um esporte cíclico, em vez de usar o valor linear da velocidade utiliza-se a cadência, que por sua vez é a velocidade angular em que a pedivela gira em torno do eixo central. O método para o cálculo da potência é apresentado na seção 4.3.1.

- Percepção Subjetiva de Esforço (PSE)

O último método aqui comparado com a potência é o método chamado de PSE (Percepção Subjetiva de Esforço), também conhecida pela sigla ou termo em inglês RPE (*Rating of Perceived Exertion*). Esse método é utilizado por cientistas esportivos que classificam o esforço feito pelo atleta em uma escala de 0 a 10 (tabela 1), sendo 0 considerado valor de repouso e 10 o valor de esforço extremamente pesado. Esse é um método subjetivo que pode ser facilmente influenciado pela condição emocional do atleta, como por exemplo, começar pedalando forte por estar animado e depois de alguns quilômetros entrar em fadiga.

Este método é bem aplicado por atletas de elite e seus treinadores, que nesse caso já conhecem os limites e as condições físicas do atleta, mas mesmo assim não tem como quantificar durante o exercício, somente após (FRIEL, 2012).

Tabela 1 – Exemplo de descrição para cada nível de PSE, considerando níveis entre esforço leve e esforço pesado

Percepção Subjetiva de Esforço	
Nível PSE	Descrição
0	Em repouso
1	Muito leve
2	Leve
3	Moderado
4	Meio pesado
5	Pesado
6	
7	Muito pesado
8	
9	Extremamente pesado
10	

Fonte: adaptado de Allen e Coggan (2010) p.71

O objetivo deste tópico não é inferiorizar os outros métodos em relação a potência, mas justificar o uso de todos ao mesmo tempo, para aumentar a confiabilidade da análise de condicionamento durante e após os exercícios.

Para comparar a variação de intensidade de cada uma das quatro grandezas em uma situação enfrentada pelo atleta durante os exercícios, a figura 1 apresenta os movimentos de um ciclista, em função de três tipos de situações em que o ciclista submete-se em uma prova. A primeira é a subida, no qual o atleta precisa pedalar com maior esforço para alcançar o topo do trajeto o mais rápido possível. A segunda é uma descida, onde o atleta precisa pedalar apenas para manter a velocidade inicial constante. O último caso é um trajeto plano, onde o ciclista gasta sua potência para impor sua cadência planejada.

As principais análises em relação a figura apresentada, são em relação a mudança de valores em função da alteração da inclinação do relevo. No primeiro terço do percurso, o atleta está subindo a montanha, contendo uma potência constante para uma inclinação constante; tendo uma diminuição do valor de velocidade ao final da montanha em relação a inicial; um pico grande do valor de PSE em relação ao esforço inicial; e por último um aumento no valor considerável no

valor da FC. Tudo isso está correto e pode ser utilizado como dados para conhecimento das condições físicas e fisiológicas do atleta. Porém, no momento em que ele começa a descer a montanha, os valores de velocidade e potência são proativos e já demonstram uma variação em função da inclinação do relevo. Já o PSE e a FC, são métodos reativos, variando seus valores com um atraso considerável na análise de condicionamento.

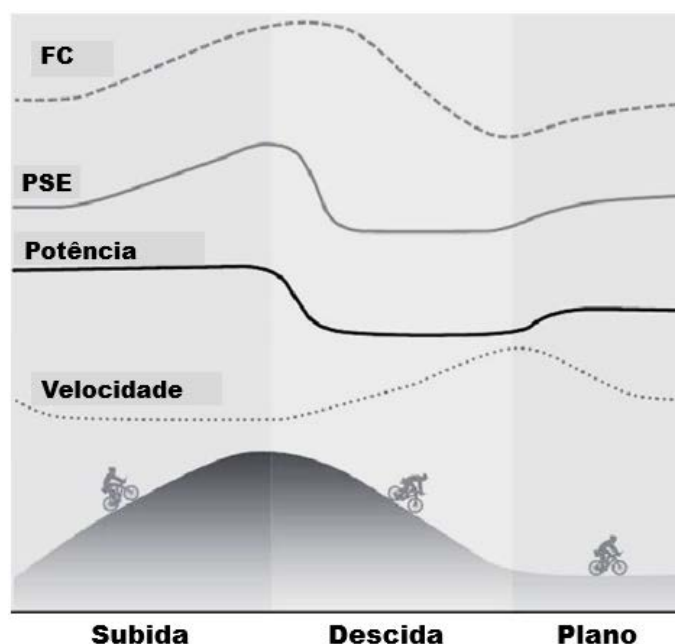


Figura 1 - Comparação entre os métodos de medição de condicionamento físico/fisiológico

Fonte: adaptada de Friel, 2012, p.19

No momento em que a descida acaba e a pista está plana, a potência que apresentava valores praticamente nulos, sobe para um valor médio, enquanto que a velocidade sofre uma diminuição drástica em relação ao pico obtido no final da montanha.

Análises como essas, mostram que os métodos reativos (PSE e FC) seriam dados que auxiliam a quantificar o quanto que o ciclista está se desgastando em função do exercício, porém não quantificam seu condicionamento. Já os dados proativos (potência e velocidade) podem quantificar o condicionamento do atleta. É possível afirmar também que os valores de PSE e FC são determinados para gerar os valores de potência e velocidade. Por isso a importância de obter todos eles, mas se não puder obter todos, a potência é o melhor método (FRIEL, 2012).

1.3 A IMPORTÂNCIA DE SE MEDIR A POTÊNCIA

Sem os valores de potência, o atleta estima como foi seu desempenho em função das condições por ele enfrentadas durante o todo o percurso, mas é só uma estimativa. Com os valores de potência é possível dimensionar o desgaste físico para cada parte do percurso, tendo uma análise específica das diferentes condições enfrentadas, como: relevo, clima, vento, etc.

Os treinamentos com potência são importantes para replicar as condições enfrentadas nas provas. Por exemplo, se durante a execução de uma prova, houver vento contrário ao deslocamento do ciclista, e este despende uma determinada potência a qual pode ser utilizada como base para tal esforço, esse valor é o valor base para seus treinamentos, uma vez que os valores de potência dependem da velocidade e da força (FRIEL, 2012).

A potência medida pode ser também usada como parâmetro para classificar o nível do atleta (ALLEN; COGGAN, 2010). A tabela 2 utiliza a potência máxima de saída por quilograma para classificar os atletas em níveis que variam de amador até profissionais. Esses valores de potência máxima gerada, são para dois tipos de atletas: velocistas puros (5 segundos) e atletas estrada-fundistas (20 minutos), sendo que esses valores de tempo são referentes ao período em que o atleta desempenha esse pico de potência durante a prova, ou em partes dela. Os valores nela apresentados são somente para ciclistas masculinos, mas o mesmo conceito pode ser aplicado em ciclistas femininos, somente alterando para os valores correspondentes.

Tabela 2 – Classificação do nível e do tipo de atleta utilizando a potência máxima de saída por quilograma

Nível do atleta	Potência Máxima de Saída (W/kg)	
	Tipo de atleta	
	Velocista Puro	Estrada-Fundista
Profissional (mundial)	25,18	6,4
Excelente amador	21,63	5,33
Amador Iniciante	14,22	3,11
Não atleta	12,44	2,58

Fonte: adaptado de Allen e Coggan (2010) p.76

Segundo Allen e Coggan (2010), se o atleta cruzar os valores de FC com os valores de potência, ele pode determinar o nível de esforço viável durante a execução do seu treinamento. Os valores de potência que serão utilizados como base para essa análise, devem ser os obtidos em provas, pois estatisticamente, é durante a realização desta que o atleta despense maior esforço, muito mais que nos treinamentos.

1.4 ESTADO DA ARTE

Existem basicamente dois tipos de medidores de potência (figura 2) voltados para esportes que utilizam a bicicleta: os *out-door* que são instalados na bicicleta e os cicloergômetros que são *in-door*. Existe uma diferença bem clara na utilização desses dois modelos de medição de potência, os modelos *out-door* são utilizados para monitoramento durante o exercício e análises posteriores em função das condições do exercício; já o cicloergômetro é utilizado para avaliações laboratoriais, podendo determinar limiares e condições de máximo esforço, entretanto não retrata as variações externas enfrentadas durante o exercício. Porém esses valores são utilizados como base e intervalos na prática (EARNEST *et al*, 2005).

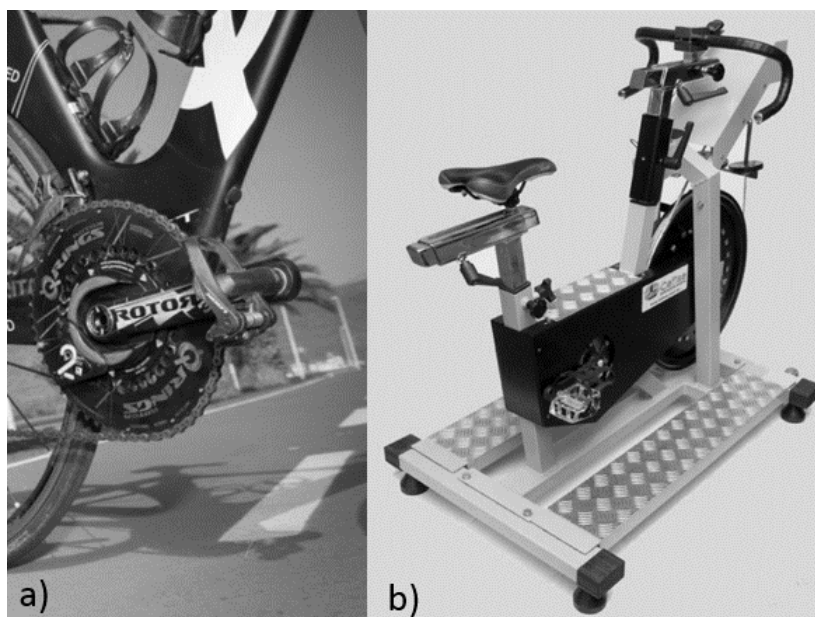


Figura 2 - Exemplo de um medidor de potência portátil (a) e um cicloergômetro (b)
Fontes: Power2max, adaptado (2015) e Cefise (2015)

No mercado atual existem vários tipos de medidores de potência utilizados por ciclistas e triatletas; além dos cicloergômetros que medem a potência do atleta em condições laboratoriais. Os medidores de potência comercializados possuem em sua maioria o sensoriamento da força aplicada pelo atleta com extensômetros (*Strain Gages*) (GHARGHAN; NORDIN; ISMAIL, 2013).

Existem quatro peças de uma bicicleta para a coleta de força aplicada pelo atleta: a coroa, a pedivela, o pedal e o cubo traseiro. Cada parte possui sua especificidade, mas todas possuem características que permitem a medição da força exercida pelo atleta na bicicleta. A figura 3 apresenta as quatro partes citadas. Como a pedivela é a peça utilizada para a aplicação deste trabalho, ela será detalhada no tópico de referencial técnico.

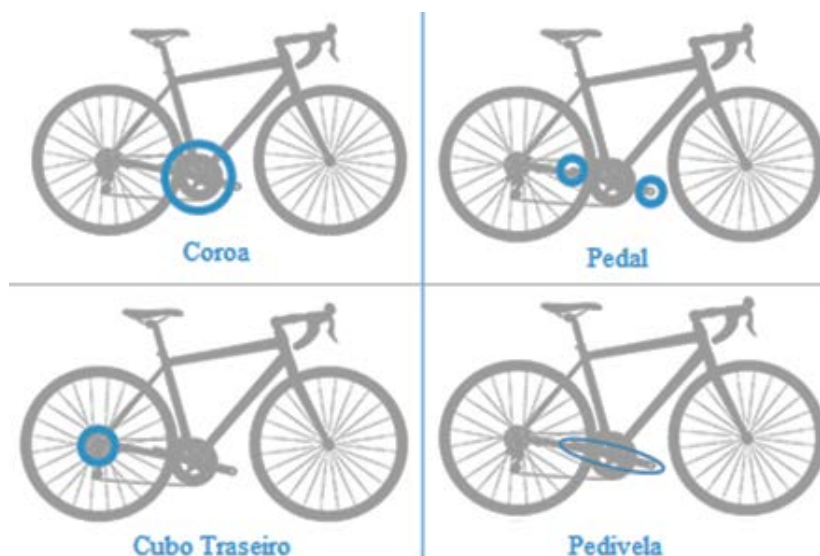


Figura 3 - Locais de instalação do sensor de força: coroa, pedal, cubo traseiro e pedivela

Fonte: adaptado de Powertap, 2015

Entre as marcas mais comuns, este trabalho apresenta uma explanação sobre os medidores de potência mais utilizados em provas de ciclismo de estrada profissional, como: SRM[®] (Schoberer Rad Messtechnik); PowerTap[®]; Quarq[®]; Garmim Vector[®]; Power2Max[®]; e Stages Cycling[®].

Os dois protocolos de comunicação que são encontrados nos medidores de potência aqui apresentados, são: ANT+[®] e Bluetooth[®]. O protocolo ANT+ foi criado por uma empresa canadense (Dynastream Innovations Inc.) com o propósito de comunicar dispositivos utilizados em aplicações dinâmicas (esportes) sem a necessidade de fios e de baixo consumo. Com isso, a empresa cresceu no segmento esportivo com a inserção de novos equipamentos em sua prática. Hoje, ANT+ pertence a uma divisão da Garmin[®] Ltd, como já citado, também fabrica medidores de potência para ciclistas (ANT+, 2015).

O modelo de Bluetooth utilizado nos medidores de potência é o Bluetooth LE (*Low Energy*), criado para aplicações que utilizam baterias como fonte de alimentação e necessitam de baixo consumo na comunicação com outros dispositivos. Esse modelo foi desenvolvido com o objetivo de ser a comunicação mais simples e utilizada por dispositivos de aplicações específicas e práticas. A atual versão é a 4.0+, possuindo maior operacionalidade para distintos sistemas e abordando o conceito de internet das coisas (BLUETOOTH, 2015).

O medidor de potência da SRM[®] (figura 4) foi o primeiro a ser desenvolvido, patenteado e comercializado por Ulrich Schoberer em 1986 (MESSTECHNIK, 2015).

Os modelos atuais utilizam como método de medição da força do atleta na deformação gerada na coroa da bicicleta. Normalmente são utilizados oito extensômetros divididos em quatro regiões da coroa, essas regiões possuem maior deformação conforme a força aplicada (GHARGHAN; NORDIN; ISMAIL, 2013).



Figura 4 - Medidor de potência da SRM[®], instalado já na coroa, modelo: CANNONDALE STANDARD[®]
Fonte: Store (2015)

Segundo SRM (2015) o medidor de potência da SRM[®] possui apenas 2% de erro na leitura dos dados e mede a força aplicada pelas duas pernas do ciclista. A comunicação dos seus medidores de potência é com o protocolo ANT+[®], possuindo compatibilidade com qualquer ciclo-computador, porém não se comunica com dispositivos móveis comuns (*smartphones*, computadores, etc).

As maiores dificuldades dos medidores da SRM[®] é o alto valor de venda dos produtos, alta dificuldade em locais para manutenção e custo de manutenção alto (ALLEN; COGGAN, 2010). Para ilustrar essas afirmações, o quadro 1 apresenta a simulação de importação de um medidor de potência.

Quadro 1 - Simulação de compra de medidor da SRM em 27/10/2015.

Este quadro apresenta a simulação de importação de um medidor da SRM de estrada de menor custo na data de pesquisa (modelo *CANNONDALE STANDARD*), sem o ciclo-computador (interface chamada de *Head Unit*), realizado em 27 de outubro de 2015, quando tínhamos uma taxa de câmbio de dólar a R\$3,8988.

O produto foi cotado no site norte americano da SRM[®] (STORE, 2015), com o valor original de U\$1941,00. A figura abaixo apresenta os resultados da simulação realizada no site da Receita Federal (STORE, 2015) (RECEITA

FEDERAL, 2015).

Simulação do Tratamento Tributário e Administrativo das Importações			
Código NCM		9506.99.00	
Descrição NCM		OUTROS ARTIGOS PARA GINÁSTICA OU ESPORTES	
Taxa de Câmbio do Dia 27/10/2015		R\$ 3,8988	
Valor Aduaneiro Convertido		R\$7.462,30	
Aliquota II (%)	<input type="text" value="20,00"/>	Tributo II	R\$ 1.492,46
Aliquota IPI (%)	<input type="text" value="20,00"/>	Tributo IPI	R\$ 1.790,95
Aliquota PIS (%)	<input type="text" value="2,10"/>	Tributo PIS	R\$ 156,71
Aliquota COFINS (%)	<input type="text" value="9,65"/>	Tributo COFINS	R\$ 720,11
As alíquotas podem ser preenchidas manualmente e os tributos recalculados			
			<input type="button" value="Recalcular Tributos"/>

O valor final após o cálculo de tributos e câmbio é R\$ 11.622,43, esse valor não está contido o valor do frete e outras despesas que possam haver. Observa-se que o valor dos tributos é aproximadamente 35,69% do valor total do produto. Vale ressaltar que esse valor é apenas para o medidor de potência, sem o ciclo-computador que é necessário para a visualização dos dados, além de que esse valor é somado nos gastos do atleta juntamente com o valor da bicicleta, roupa adequada, sapatilha, capacete, entre outros.

Os medidores de potência da PowerTap[®] (figura 5) são conhecidos por serem medidores instalados do cubo traseiro da bicicleta. Este foi o primeiro modelo da empresa e foi inserido no mercado com preços normalmente mais acessíveis que os da SRM[®]. Mas nos últimos anos a empresa lançou modelos que podem ser instalados em outras regiões da bicicleta, como no pedal e na coroa (figura 3). Todos os modelos da empresa utilizam extensômetros para a medição de força, não importando o local de sua instalação (POWER TAP, 2015).



Figura 5 – Medidor de potência da PowerTap® de cubo, modelo: G3 HUB™
Fonte: Powertap (2015)

O medidor de potência mais conhecido da PowerTap® é o HUB®, um cubo instalado na roda traseira da bicicleta, possuindo oito extensômetros que medem a torção do cubo em função do força do ciclista (GHARGHAN; NORDIN; ISMAIL, 2013) (POWERTAP, 2015). Os dispositivos da PowerTap® comunicam tanto com o protocolo ANT+®, quanto por Bluetooth, porém sempre com ciclo-computadores.

Os medidores de potência da Quarq Technology® (figura 6) possuem um funcionamento bem parecido aos medidores da SRM®, porém, possuem dez extensômetros também instalados na coroa da bicicleta. Sua comunicação é somente pelo protocolo ANT+®, diminuindo a quantidade de dispositivos para visualização dos dados (GHARGHAN, NORDIN e ISMAIL, 2013) (ALLEN e COGGAN, 2010).



Figura 6 - Medidor de potência da QUARQ® de coroa, modelo: ELSA RS®
Fonte: Quarq (2015)

Os medidores de potência da Quarq® possuem alta confiabilidade, com valores em torno de $\pm 1,5\%$ de erro e alta compensação de temperatura (QUARQ, 2015).

A única linha de medidores da Garmin® (figura 7) é chamada Vector®, um medidor de potência instalado nos pedais da bicicleta. Esta linha também possui

extensômetros para medir a deformação do eixo central do pedal em função da força aplicada pelo ciclista.

Existem dois modelos disponíveis deste medidor, um com somente o pedal esquerdo instrumentado, obtendo a potência aproximada; e um modelo com os dois pedais instrumentados, obtendo a potência total e a parcela da potência gerada por cada perna (GHARGHAN; NORDIN; ISMAIL, 2013) (GARMIN, 2015).



Figura 7 - Medidor de potência da Garmin® dos pedais, modelo: Vector 2S®
 Fonte: Garmin (2015)

Os medidores de potência da power2max® (figura 8) são bem parecidos com os da Quarq® e da SRM®, pois também utiliza a instrumentação na coroa da bicicleta. Eles possuem uma precisão em torno de $\pm 2\%$, além de não utilizar sensores magnéticos para coletar a cadência, mas sim utiliza um acelerômetro.



Figura 8 - Exemplo do medidor de potência da Power2Max®, modelo: S®
 Fonte: Power2max (2015)

Ele possui a potência total baseada nas potências geradas por cada perna separada, utilizando o conceito de diferença no sentido de pressão aplicada nos quatro extensômetros instalados na coroa (GHARGHAN; NORDIN; ISMAIL, 2013) (POWER2MAX, 2015).

Os medidores de potência da Stages[®] (figura 9) são os únicos medidores desta análise que possuem os extensômetros instalados na pedivela, similarmente ao proposto neste trabalho. Esses medidores possuem um erro de $\pm 2\%$ e não adicionam massa relevante à pedivela (em torno de 20 gramas). A comunicação pode ser feita com os protocolos ANT+[®] e Bluetooth, sendo compatível com ciclocomputadores (*Head Unit*) de várias marcas. Os medidores de potência da Stages[®] não são instalados em qualquer pedivela comercial, mas sim somente nas parceiras da marca como a Shimano[®], SRAM[®], Cannondale[®], etc.



Figura 9 - Medidor de potência da Stages[®] da pedivela, modelo: Shimano Dura Ace[®]
Fonte: Stages (2015)

A linha da Stages[®] é uma das mais novas marcas em comparação as marcas citadas neste trabalho, porém é a primeira a possuir uma portabilidade de ser instalada apenas na pedivela (GHARGHAN; NORDIN; ISMAIL, 2013) (STAGES, 2015).

Neste tópico foram apresentados vários modelos de medidores de potência, com métodos de medições diferenciados e todos utilizados por atletas profissionais, porém nenhum deles é fabricado no Brasil ou possui fácil acesso para brasileiros. Para aquisição de qualquer um destes modelos apresentados é necessário importar pessoalmente ou comprar de empresas importadoras de tecnologia.

1.5 MERCADO NACIONAL

A situação nacional em relação ao MPFC é caracterizada por dois tópicos latentes na dificuldade de compra e da falta de utilização do equipamento em solo brasileiro. Em um primeiro momento, existe a falta de acesso para brasileiros até mesmo em sites de empresas que fabricam o MPFC. Já em um segundo tópico, é

apresentado a quantidade de ciclistas e competições profissionais no Brasil, evidenciando um público alvo em um âmbito nacional.

Para exemplificar a falta de acesso de brasileiros ao MPFC, a figura 10 apresenta a mensagem de acesso negado para o usuário brasileiro. O acesso é negado por causa da falta de disponibilidade de envio e comercialização para ciclistas brasileiros. A Stages® foi utilizada como exemplo, porém não é a única empresa que possui indisponibilidade de vendas para o Brasil.



Figura 10 – Mensagem de inacessibilidade do site da loja da Stages®
Fonte: STORE STAGES CYCLING, 2015

Essa dificuldade é evidenciada na falta de entrada dessas empresas no Brasil, não tendo assim uma comercialização direta e não possuindo manutenção dos equipamentos no mercado nacional.

O ciclismo profissional nacional é uma realidade de prática esportiva de alto nível, sendo os primeiros beneficiados por estudos como este. Para exemplificar essa estrutura, pode-se citar que a Confederação Brasileira de Ciclismo possui federações em todos os estados no Brasil, além de organizar os eventos mais importantes em seis modalidades: BMX, Estrada, MTB, Pista, Paraciclismo e Ciclismo para todos (CBC, 2015).

Outro exemplo que pode-se evidenciar é que o ranking de ciclistas profissionais masculino (Estrada) conta com 32 equipes de todas as regiões do país, além de 17 equipes júnior (CBC, 2015).

Esses tópicos apresentam a justificativa e o público alvo deste projeto que tem como alvo a melhoria do esporte nacional por meio de equipamentos tecnológicos.

1.6 REQUISITOS DO SISTEMA

Para o projeto e o desenvolvimento deste protótipo foram estabelecidos alguns requisitos essenciais, sendo eles no âmbito elétrico, mecânico e econômico.

Esses requisitos formaram a base para tomadas de decisões nas escolhas dos componentes ou dos métodos utilizados.

Os requisitos mais importantes são:

- Ter a menor quantidade possível de componentes buscando sempre o menor custo do protótipo;
- A alimentação do sistema ser por bateria(s) e não pela rede elétrica;
- A transmissão dos dados ser realizada por comunicação sem fio;
- As dimensões da placa não podem exceder: 7 cm de comprimento, 5 cm de altura e 2,5 cm de espessura;
- A placa tem que possuir um sistema de liga/desliga para diminuir o consumo da bateria;
- O aplicativo para visualização dos dados ser gratuito e de plataforma aberta;
- O aplicativo tem que salvar os dados no dispositivo móvel para análises posteriores, em formato de texto (*.txt).

1.7 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é desenvolver um protótipo de um medidor de potência fisiológica instalado na pedivela esquerda da bicicleta, sendo esse medidor testado em condições de laboratório.

1.8 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar, instalar, medir e analisar a deformação da pedivela esquerda por meio de Extensometria;
- Compreender, mensurar e analisar a cadência de pedalada por meio de sensores de inércia;
- Aprofundar os estudos, desenvolver e aplicar um circuito de aquisição e tratamento de sinais para o seu processamento;
- Desenvolver e programar um sistema de comunicação móvel para transmissão dos dados a um dispositivo móvel;
- Testar o protótipo de medição de potência fisiológica em laboratório.

2 METODOLOGIA

O desenvolvimento do medidor de potência foi dividido em algumas partes, visando facilitar a evolução do projeto de forma eficiente e prevenindo eventuais problemas que pudessem ocorrer. Primeiramente, foi realizado um extenso levantamento bibliográfico do assunto, tanto na área de ciclismo, como na área da eletrônica, para que se realizasse um estudo de toda a teoria envolvida no dispositivo, identificando os principais aspectos na modelagem numérica, da viabilidade de construção e dos materiais necessários.

Dentre os parâmetros estudados, a parte de extensometria foi dividida em três partes: a escolha do extensômetro, o local de aplicação e a técnica de fixação. Posteriormente foram confirmadas suas características de funcionamento através de análise quantitativa estática, onde obteve-se de forma experimental sua equação de funcionamento, utilizando seis diferentes valores de pesos padrão com quinze amostras para cada valor.

Com relação a dinâmica do movimento, verificou-se principalmente a técnica da pedalada utilizada por ciclistas profissionais, examinando os principais pontos de força e de cadência. Pesquisou-se também o uso dos principais medidores de potência comerciais, aferindo o funcionamento e a forma de atuação de tais dispositivos, e seu aproveitamento por ciclistas e técnicos, tornando possível um melhor entendimento do uso dos dados obtidos, para que a escolha dos sensores inerciais cumprissem os critérios necessários de um uso efetivo.

A programação do microcontrolador se fez através da relação com os sensores inerciais utilizados e com o tipo de dados de entrada, do tipo analógica, baseando-se em bibliotecas já existentes da plataforma arduino, que facilitam o tratamento dos sinais provenientes da entrada e fornecem a facilidade de desenvolver uma programação simples e eficiente.

Como o dispositivo tem objetivo de uso prático em condições de treino e de prova, testes preliminares foram realizados em laboratório para verificar a confiabilidade dos resultados, em relação a força, velocidade do movimento e transmissão de dados.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Todo o processo de validação foi realizado em função de duas coletas de dados, sendo a primeira em função do dispositivo validado e a segunda em função do protótipo, sendo esses coletados ao mesmo tempo. Após a coleta de dados foi realizado uma análise estatística e de correlação entre os dados obtidos.

As deformações ocorridas em uma pedivela por ação de forças externas são medidas inicialmente por um extensômetro, dispositivo capaz mensurar essa força aplicada variando sua resistência elétrica.

Esta variação de resistência deve ser traduzida por uma variação de tensão elétrica, a qual será correlacionada com a força mecânica aplicada. Para realizar esta quantificação, circuitos eletrônicos de condicionamento de sinal são necessários para alimentar, amplificar e delimitar o sinal elétrico para que este possa ser interpretado por circuitos microcontrolados.

Paralelamente à análise de força, sensores inerciais são utilizados para analisar deslocamento e aceleração angular e desta forma monitorar os movimentos produzidos na pedivela pelo ciclista.

De forma geral, a figura 11 ilustra as etapas de tratamento do sinal propostas neste trabalho, desde a coleta até a transmissão dos dados digitais à dispositivos móveis para visualização das informações já tratadas.

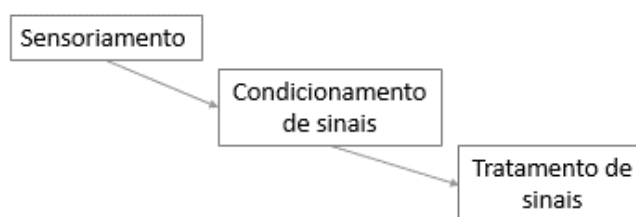


Figura 11 - Fluxograma de funcionamento de um Medidor de Potência convencional, fonte: autoria própria.

3.1 EXTENSOMETRIA

A extensometria é a técnica responsável pela medição de forças em diferentes estruturas que transformam variações de força em variações equivalentes de sua própria resistência elétrica, ou seja, transdutores que permitem a leitura da

variação da resistência elétrica. Sendo comum caracterizar como strain gages, os extensômetros que possuem a propriedade da variação da resistência elétrica quando ocorre uma variação mecânica. Extensômetros possuem características como, ótima precisão de deformação, baixo custo, pequeno tamanho e peso, facilidade de manipulação e instalação, que tornam esse dispositivo ideal para diferentes tipos de aplicações e ambientes (JAVAREZ JUNIOR; MARTINS, 2012).

Seu princípio de funcionamento é devido as descobertas feitas por Kelvin, em 1856, quando o mesmo verificou que fios de cobre e ferro sofriam alterações na resistência elétrica, caso fossem submetidos a deformações mecânicas. Pode-se caracterizar essa deformação por meio de uma constante K , definida como fator gage, relação entre a deformação medida e o sinal de saída (LAZZARI, 2010).

Segundo Grante, 2004, se em um dado material é aplicada uma força, essa tração é proporcional à deformação causada na região elástica, conservando uma relação constante entre a magnitude da força aplicada e o tamanho da deformação. Isto ocorre no fato da relação de tensão- deformação, baseada na lei de Hooke, lei da física publicada em 1676 e que descreve a força restauradora que existe em diversos sistemas quando comprimidos ou estendidos. Dado a fórmula:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1)$$

- ε representando o coeficiente de deformação do material;
- σ representando a tensão de cisalhamento aplicada;
- E o modulo elástico;

Um dado material de resistência R é caracterizado por sofrer uma variação de sua resistência ΔR , devido a uma tensão aplicada V_{ex} .

$$\frac{\Delta R}{R} = K * \varepsilon \quad (2)$$

- K representando o fator de sensibilidade do extensômetro;
- ε representando o coeficiente de deformação do material;
- ΔR representando a variação da resistência do material (Ω);
- R representando a resistência (Ω).

A figura 12 ilustra o formato geométrico de um extensômetro uniaxial e linear.



Figura 12 - Modelo escolhido de Extensômetro (uniaxial e linear)
Fonte: Javarez Junior; Martins (2012) p. 18

Existem diversos tipos e modelos de extensômetros no mercado, que variam desde sua composição até sua principal aplicação, podendo ser utilizados para soluções de problemas em análise de tensões ou na construção de transdutores. Para sua correta seleção deve ser analisando o propósito e as condições de medição. Uma escolha imprópria pode prejudicar sua leitura, ocasionando a obtenção de dados incorretos e que não condizem com o fenômeno estudado. Algumas características de operação devem ser consideradas para a escolha do mesmo, como: faixa de temperatura que estará submetido, resistência à umidade, corrente máxima suportada e durabilidade.

Para a fabricação de extensômetros elétricos, são considerados os materiais que apresentam baixa variação da resistividade com a deformação, apresentam pequeno coeficiente (KG) e variação de temperatura.

Tabela 3 - Composição e fator de sensibilidade para confecção de extensômetro de resistência elétrica
Fonte: BARRETO, E. J. (2002)

	Composição (%)	KG
Advance	44 Ni, 54 Cu, 1 Mn	2,1
Nicromo V	80 Ni, 20 Cr	2,2
Isoelastic	36 Ni, 8 Cr, 0,5 Mo, 55,5 Fe	3,5
Karma	74 Ni, 20 Cr, 3 Al, 3 Fe	2,1
Constatan	40 Ni, 60 Cu	2,1
Níquel	100 Ni	-12,0

A Tabela 3 apresenta ligas metálicas comumente empregadas na fabricação de *strain gages*, assim como os valores de seus fatores de sensibilidade. Sendo

utilizados principalmente os materiais Constantan, Isoelastic e Karma (JAVAREZ JUNIOR; MARTINS, 2012).

3.2 CONDICIONAMENTO DE SINAL

A ponte de Wheatstone é o circuito mais usado com os extensômetros elétricos de resistência, tanto para fazer a medição das variações estáticas como dinâmicas (GRANTE, 2004).

Portanto, a medição de deformação é empregada para a variação de resistências muito pequenas, arranjando-se as *strain gages* e os resistores em uma configuração em ponte, com a inclusão de uma fonte de tensão de excitação. Uma ponte Wheatstone é formada por quatro braços resistivos e uma tensão de excitação (V_{EX}), aplicada entre eles, e uma saída que mede o equilíbrio (V_O), conforme ilustrado na figura 13.

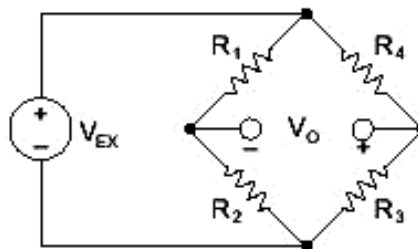


Figura 13 - Circuito de ponte completa
Fonte: NATIONAL INSTRUMENTS (2013).

A tensão de saída V_O , será igual a:

$$V_O = \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \cdot V_{EX} \quad (3)$$

Ao analisar-se a equação (3), verifica-se que o equilíbrio ocorre quando $R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$, ou seja, quando V_O é igual a zero. Quando cumpre essa condição, diz-se que a ponte está balanceada. Qualquer variação na resistência em um dos braços da ponte resultará em uma tensão de saída diferente de zero (Instruments, 2013).

O circuito tipo Ponte de Wheatstone, tem como característica a comparação das variações relativas da resistência elétrica, sendo mais frequentemente utilizado para pequenas variações de resistência, por apresentar boa precisão. A Ponte de

Wheatstone normalmente produz na saída um sinal de tensão da ordem de miliVolts ou Volts, sendo possível então que este sinal seja lido por diferentes instrumentos e processado em um microcomputador (JAVAREZ JUNIOR; MARTINS,2012)

$$R1=R2=R3=R;$$

$$R4=R+\Delta R \quad (4)$$

Segundo Andolfato, Camacho e Brito (2004), na configuração em um quarto de ponte, conforme figura 14, quando apenas um dos resistores é variável, temos que sua ligação é comumente usada quando se quer medir a deformação, em apenas um dado sentido, tendo a desvantagem de apresentar melhores resultados em ambiente onde a variação de temperatura é pequena. Sendo:

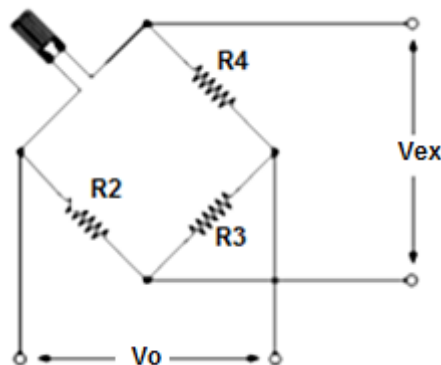


Figura 14 - Um quarto de Ponte
Fonte: Javarez Junior; Martins (2012) pg. 35

A configuração em meia ponte é um método em que dois resistores variam sua resistência, conforme figura 15 as técnicas de medição podem ser empregadas para obter as forças aplicadas, sendo que para cada tipo de aplicação e necessidade, tem-se um tipo de posição dos extensômetros nos braços da ponte, e como os mesmos estarão posicionados no corpo de prova, sendo que o valor entre os pontos em V_o será de:

$$V_o = \frac{-\Delta R \cdot V_{ex}}{4 \cdot R} \quad (5)$$

É possível utilizar as técnicas de meia ponte com os extensômetros colados em faces opostas (figura 15), para se adquirir as componentes da flexão ou normais, devido a flexão nas faces contrárias que apresentaram a mesma deformação, mesmo valor, mas com sinais opostos. Estando de acordo com:

$$\begin{aligned} R_3 &= R_4 = R; \\ R_1 &= R_2 = R + \Delta R \end{aligned} \quad (6)$$

Estando a ponte com tensão de saída igual a zero, significa dizer que a ponte esta balanceada. Qualquer mudança de resistência nos braços da ponte, irá resultar em uma tensão de saída diferente de zero (Andolfato, Camacho e Brito, 2004).

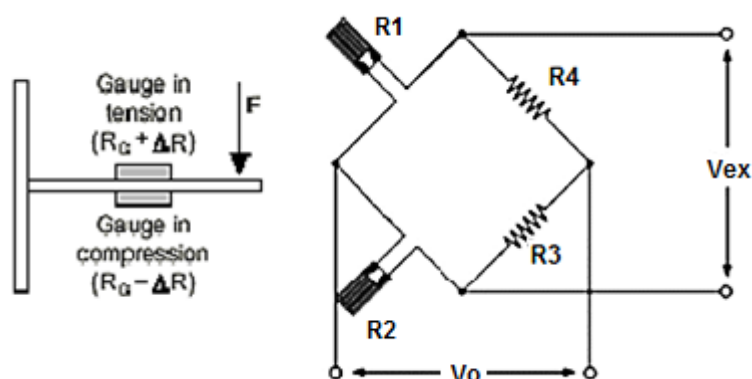


Figura 15- Meia ponte com Strain Gages em lados opostos
 Fontes: adaptado de Instruments (2013) e Javarez Junior; Martins (2012) pg. 35

$$V_o = \frac{-\Delta R \cdot V_{ex}}{2 \cdot R} \quad (7)$$

Mesmo com o sinal de saída já sendo em tensão elétrica, existe a necessidade de amplificação do mesmo, para um melhor tratamento e equacionamento do sinal, sendo a segunda etapa do condicionamento responsável por isso.

Sendo possível aumentar ainda mais a sensibilidade do circuito a força submetida, fazendo todos os quatro braços da ponte com strain gauges ($R+\Delta R$) ativados em uma configuração de ponte completa. Conforme figura 16.

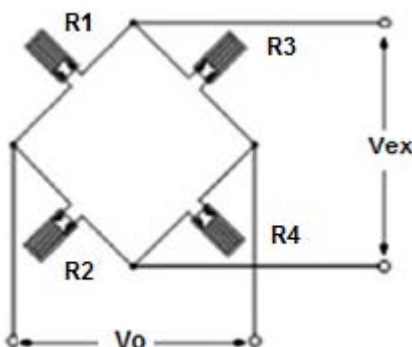


Figura 16 – Ponte completa
Fonte: Javarez Junior; Martins (2012) pg. 35

Sendo que a equação do equilíbrio da ponte completa é representada pela equação:

$$V_o = \frac{-\Delta R \cdot V_{ex}}{R} \quad (8)$$

3.3 AMPLIFICAÇÃO DO SINAL

A amplificação de um sinal de baixa amplitude pode ser realizada por um amplificador operacional comum, amplificando o sinal absoluto, ou através de amplificadores de instrumentação, os quais amplificam a relação diferencial de dois sinais. Estes possuem uma aplicação em uma faixa específica e com ganho delimitado, e possuem como principais características: elevada impedância de entrada, controle do ganho através de uma única resistência, elevado ganho, baixo offset, elevada rejeição de modo comum (CMRR), perfeita simetria entre as entradas inversora e não inversora (ANALOG, 2006).

Para a amplificação do sinal obtido, escolheu-se o INA 122 *single supply*, que apresenta a vantagem de necessitar somente de uma alimentação DC positiva. Segundo a National Instruments (1997), o ganho G é obtido por:

$$G = 5 + \frac{200k}{R_g} \quad (9)$$

De acordo com as características da $\frac{1}{2}$ ponte e do amplificador de instrumentação, INA 122, a figura 17 retrata de forma simplificada como fica a ligação da ponte com as entradas do amplificador, e como esse sinal será amplificado, resultando na saída V_O (pino 6).

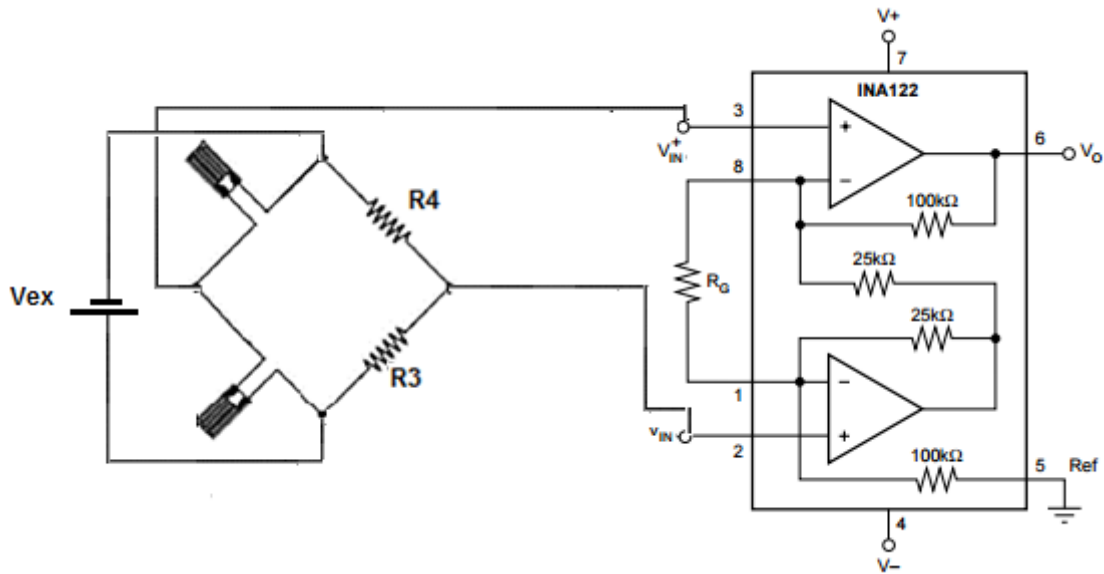


Figura 17 - 1/2 Ponte com amplificador de instrumentação
 Fonte: adaptado de Javarez Junior; Martins (2012) e Instruments(1997)

3.4 SENSORES INERCIAIS

Sensores inerciais são dispositivos baseados em tecnologia de Sistemas Micro Eletro Mecânicos (MEMS). Tecnologia que se tornou uma alternativa instrumental de baixo custo, importante para a avaliação dos aspectos de utilização deste dispositivo, visando a integração de sistemas de baixo custo que apresentem desempenho compatível com as aplicações demandadas. Apresentando grande utilização no mercado, já substituindo alguns dos seus precursores, pois apresentam menor tamanho, menor peso, menor consumo de energia, menor custo e alta confiabilidade de operação, quando comparados com os sensores convencionais. Em um único circuito integrado encontramos estruturas mecânicas micro usinadas formando os transdutores mecânicos, responsáveis por executar a tarefa de sensoriamento, e a microeletrônica, responsável de fornecer sinais elétricos

analógicos equivalentes às forças as quais o sensor foi submetido (MASUZAWA, 2000).

Tendo conhecimento das leis da dinâmica e sabendo-se como o movimento de corpos são descritos, esses dispositivos são projetados para perceber os efeitos da ação de forças que provoquem uma mudança do estado inercial dos corpos, sendo então capturada por um transdutor correspondente e convertida em um sinal elétrico, fundamentados na tecnologia MEMS. Tecnologia capaz de fornecer as variações de velocidade e aceleração, linear ou angular, direta ou indiretamente, através da parametrização das forças inerciais atuantes, convertidas por um transdutor correspondente e resultando em um sinal elétrico (LEE, 2011).

O MPU 6050 (figura 18), é um sensor inercial de tecnologia MEMS, capaz de mensurar de forma confiável os valores de aceleração linear e velocidade angular, possui alimentação, que pode variar entre 3 e 5V. O módulo utiliza a comunicação via interface I2C, assim a comunicação com o Arduino é facilitada. Esse dispositivo se baseia no Princípio da Inércia, enunciado em 1687, por Isaac Newton (LEE, 2011).

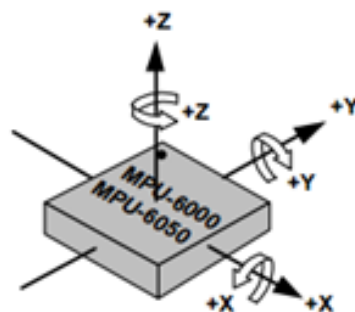


Figura 18 - MPU 6050
Fonte : Invensense, 2013, p. 21

Segundo INVENSENSE (2013), o dispositivo MPU-6050 combina um giroscópio de 3 eixos e um acelerômetro de 3 eixos no mesmo circuito integrado, conversor analógico para digital (ADC) de 16 bits e um processador (DMP) que processa complexos algoritmos *Motion Fusion* 6 eixos. O dispositivo pode acessar dispositivos externos ou outros sensores através de um barramento de comunicação mestre I2C auxiliar, conforme mostrado na figura 19, o dispositivo permite que os dispositivos possam reunir um conjunto completo de dados de sensores sem a intervenção do processador do sistema.

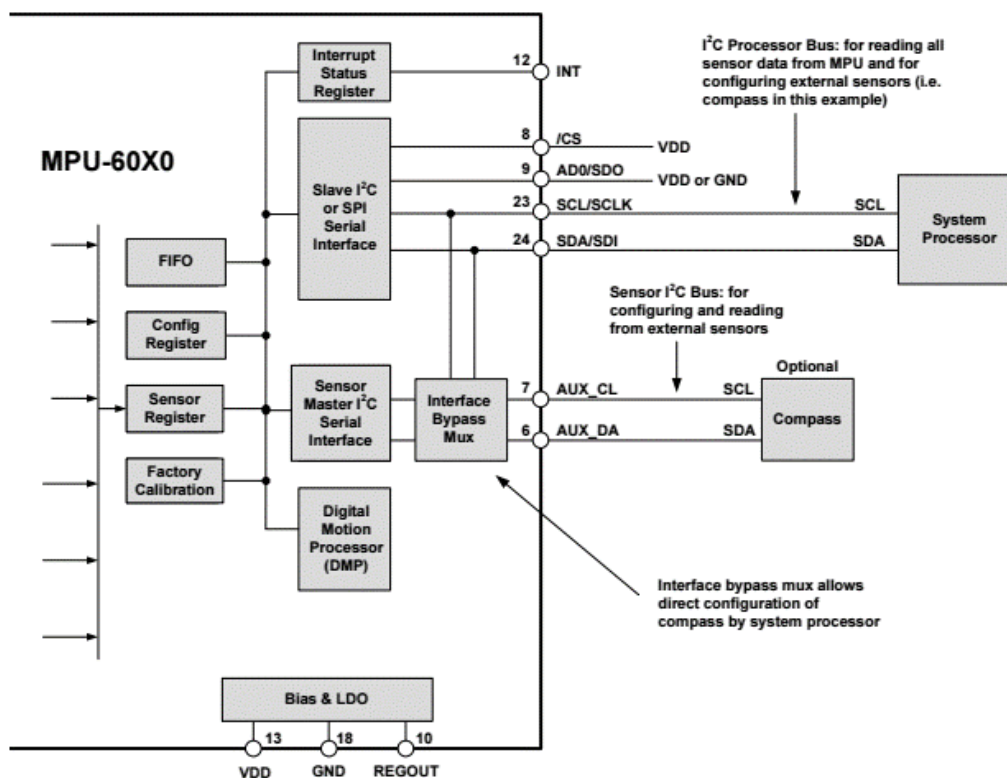


Figura 19 - Diagrama de blocos MPU 6050
Fonte: Invensense (2013)

O giroscópio consiste em um dispositivo capaz de mensurar e parametrizar rotações. O MPU6050 é capaz de mensurar variações instantâneas independentemente nos três eixos de até 2000 graus por segundo (333,33 RPM), com quatro faixas de precisão: $\pm 250^\circ/s$, $\pm 500^\circ/s$, $\pm 1000^\circ/s$ e $\pm 2000^\circ/s$. Acerca do acelerômetro, trata-se de sensor capaz de detectar e mensurar aceleração, podendo ser a aceleração gravitacional ou qualquer outra aceleração resultante. No MPU 6050 é capaz de mensurar acelerações nos três eixos independentemente de até 16g (156,896 m/s²) e possui quatro faixas de precisão: $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 6g$ e $\pm 16g$, a unidade G referente ao valor da aceleração gravitacional (INVENSENSE, 2013).

3.5 MICROCONTROLADOR

Microcontroladores são dispositivos inteligentes que consistem num circuito processador contendo entradas, saídas e uma memória. Os diversos circuitos que formam um microcontrolador, a maneira como são integrados e seu funcionamento é chamada de arquitetura do microcontrolador. O que diferencia os diversos tipos

existentes são suas características primárias, como sua capacidade de memória que pode variar de algumas centenas a milhares de bytes, qual a área de aplicação, a arquitetura, a velocidade de operação (baseada em um cristal de quartzo como relógio ou *clock*) e a alimentação do mesmo (PEREIRA, 2006).

3.5.1 PLATAFORMA ARDUINO NANO

O Arduino Nano, ilustrado na figura 20, é uma plataforma de prototipagem eletrônica *open-source* que se baseia em hardware e software flexíveis e fáceis de usar, possui a vantagem de ser uma placa pequena (45 por 18 mm), custo acessível e com tecnologia baseada no microcontrolador na ATmega328.



Figura 20 - Arduino Nano
Fonte: Arduino (2015)

Sua configuração traz a necessidade de uma alimentação de 9 V, um total de 14 saídas e entradas digitais, sendo 6 com modulação PWM, que fornecem uma corrente máxima de 40 mA, 8 entradas analógicas e velocidade de *clock* de 16 MHz (Arduino, 2015).

Outra vantagem apresentada pelo dispositivo é o protocolo de comunicação serial utilizado, *Inter-Integrated Circuit* (I2C), um protocolo de barramento que trabalha no modelo mestre-escravo, que funciona de modo simples, quando a estação mestre inicia a comunicação solicita que os escravos enviem seus dados. Os escravos, por fim, recebem a cobrança do mestre e retornam os dados solicitados.

Também oferece a possibilidade de utilizar diferentes componentes, de diferentes tecnologias construtivas sem problemas de incompatibilidade e comunicação, como memórias externas (EEPROM), RTC (*Real Time Clock*), Visores

(LCD e TFT), sensores de temperatura, sensores inerciais (acelerômetro, giroscópio). No barramento temos o SDA, uma linha bidirecional de comunicação que efetivamente transfere os dados, e o SCL responsável pela temporização entre os dispositivos, a fim de que comunicação pelo SDA possa ter confiabilidade (I2C-BUS, 2015).

3.6 COMUNICAÇÃO BLUETOOTH

O desenvolvimento da tecnologia sem fio *Bluetooth* iniciou-se em 1995, tendendo a substituir os cabos de dados de aparelhos eletrônicos por conexões de rádio frequência. Suas especificações o tornam padrão e referência em comunicação sem fio de curta distância, possuindo um baixo custo, baixo consumo de energia, característica fundamental para dispositivos móveis alimentados por baterias; operação em faixa de frequências ISM (*Industrial Scientific and Medical*), frequência de 2,4 GHz, disponível mundialmente; estrutura de protocolos bem definida, de maneira a permitir a interoperabilidade de dispositivos de diferentes fabricantes. Todas essas características, somadas ao fato de ser uma tecnologia padrão mundial, tornam a tecnologia Bluetooth uma alternativa eficiente e vantajosa na transmissão de dados em dispositivos móveis (MARTINCOSKI, 2003). A figura 21 ilustra um módulo *Bluetooth* HC-5.



Figura 21 - Módulo *Bluetooth* HC-05
Fonte: Iteadstudio (2010)

O módulo *Bluetooth* HC-05 (ilustrado na figura 22) oferece uma forma fácil e eficiente de comunicação com o microcontrolador Arduino, suportando tanto o modo mestre como o escravo, além de ter uma fácil configuração. Sua alimentação varia de 3,3 a 5 V, com baixo consumo. Possui alcance de até 10 metros e modulação GFSK (*Gaussian frequency-shift keying*) (ITEADSTUDIO, 2010).

4 DESENVOLVIMENTO

De posse dos requisitos, da definição dos sensores, de outros elementos utilizados e seus parâmetros, buscou-se desenvolver um protótipo de maneira que todos seus requisitos fossem cumpridos, com um objetivo final de desenvolver um circuito final capaz de adquirir e transmitir dados de forma confiável, e que apresente um tamanho de placa pequeno compatível com o local de instalação na bicicleta.

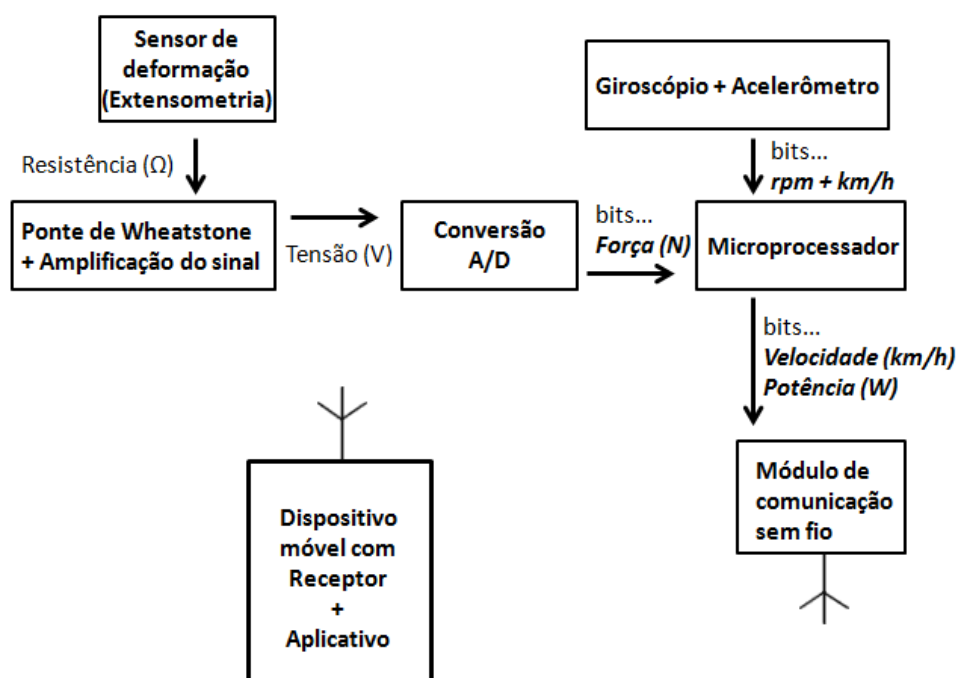


Figura 22 - Diagrama de funcionamento do protótipo
Fonte: autoria própria

O diagrama em blocos da figura 22 apresenta a visão geral de funcionamento do sistema, sendo que os tópicos a seguir descrevem em detalhes técnicos e teóricos. Cada uma das partes funcionais do sistema, como os componentes que foram escolhidos, levando em conta toda a análise teórica e os objetivos considerados para o desenvolvimento.

4.1 EXTENSOMETRIA

Para realizar a medição das forças através da extensometria utilizou-se a configuração de meia ponte, sendo fixados os extensômetros em lados opostos da pedivela, configuração que oferece uma maior precisão e facilidade na obtenção da

deflexão sentida pela pedivela. Cada extensômetro apresenta uma resistência característica de 120Ω configurados no mesmo braço da ponte, e dois resistores de 120Ω com 1% precisão.

A resposta dos extensômetros à aplicação de tensão mecânica na pedivela resulta em pequenas variações de sua resistência, na ordem de microOhms. Por este motivo, um estágio de amplificação de instrumentação é necessário na saída da ponte de Wheatstone. Foi utilizado um INA122 para esta função, o qual tem seu ganho controlado por um resistor de ganho R_g . Segundo a National Instruments (1997), ao utilizar-se um resistor de ganho R_g igual a 100Ω , obtém-se um ganho G de aproximadamente de 2000.

Para a correta instalação e fixação dos extensômetros na pedivela, utilizou-se como base o livro Extensometria Básica do Prof. Dr. Laercio Javarez Junior, autor que por sua vez disponibilizou o laboratório de Extensometria do DAMEC (Departamento de Mecânica – UTFPR- PG), dos equipamentos e componentes para a instalação do extensômetro.

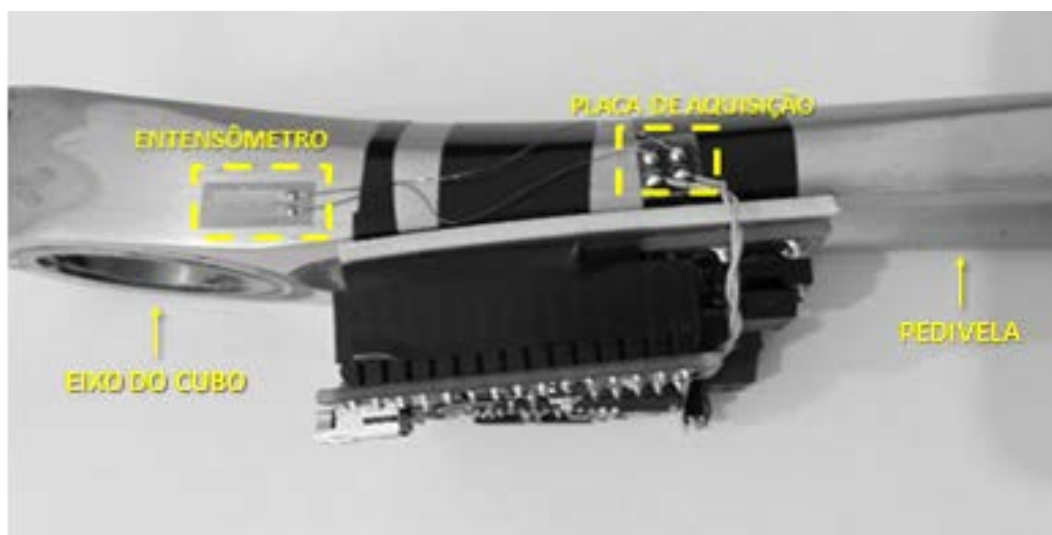


Figura 23 - Sensor instalado e placa de fiação instalada
Fonte: autoria própria

A figura 23 mostra o local de instalação do extensômetro na pedivela, onde realizou-se todos os procedimentos para a correta instalação do sensor, passando por etapas como o lixamento e limpeza do local na peça, sendo de fundamental importância a determinação do local de instalação do mesmo (JAVAREZ JUNIOR;

MARTINS, 2012). Como critério utilizado, foi determinado uma posição para o sensor na região de maior deformação na pedivela, conforme ilustrado na figura 24.

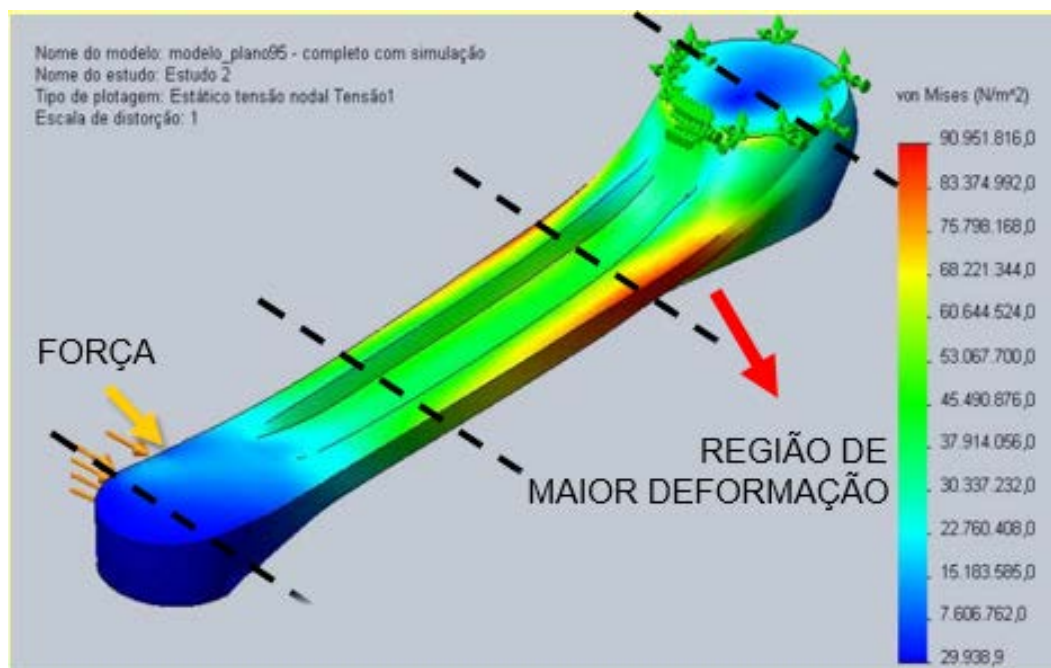


Figura 24 - Esforço normal ao eixo longitudinal: deformação e tensão
 Fonte: Lazzari (2010) p.53.

O resultado (figura 24) para a simulação da principal carga a qual a peça estará submetida, uma carga normal ao seu eixo longitudinal, utilizando vários modos da frequência de ressonância para os ensaios simulados, onde considera-se de 337 Hz o modo fundamental.

Também identificou-se a região ideal para o posicionamento dos extensômetros, através da verificação do local onde, atuam as maiores intensidades da força aplicada pelo ciclista (no pedal que é fixado no lado externo da pedivela).

Neste panorama, conclui-se que a mesma se deforma em somente um eixo, contendo componentes normais e tangenciais, e que os pontos com a maior intensidade de deflexão estão a aproximadamente um quarto do comprimento do eixo do cubo do pedivela, nas áreas em vermelho, sendo as áreas em azul com a menor intensidade de deflexão (JAVAREZ JUNIOR; MARTINS, 2012).

4.2 TRATAMENTO DOS DADOS

Após a aquisição dos dados na parte inicial do funcionamento, referentes a força aplicada e a velocidade angular do movimento, os mesmos são tratados pelo microcontrolador, arduino nano, onde passam por modelagem matemática, capaz de parametrizar a força aplicada em potência fisiológica desenvolvida pelo ciclista, e a dinâmica do movimento em cadência. Após essa etapa, esses dados são filtrados e organizados, para que possam finalmente serem transmitidos pelo módulo Bluetooth ao aplicativo instalados no visor do celular, facilitando assim a leitura e a utilização pelo usuário.

4.2.1 Cálculo da potência

Tem-se que o cálculo do trabalho na física tradicional é feito multiplicando-se a força e a distância, e a potência é dividindo-se esse trabalho pelo tempo decorrido. O torque é a medida de quanto uma força que age em um determinado objeto faz com que o mesmo gire. Sendo que para termos práticos de utilização no ciclismo, pode-se correlacionar o trabalho com o torque, que por sua vez é o produto da força aplicada pelo ciclista com o tamanho da pedivela utilizada (neste caso: 0,17 m). Após o cálculo do torque, seu resultado é multiplicado pela velocidade angular (rad/s), gerando assim a potência (equação 10) despendida pelo ciclista (BERTUCCI, TAIAR E GRAPPE, 2005).

$$P = F \cdot X \cdot \omega \quad (10)$$

Onde:

- P é a potência em Watts;
- F é a força em Newtons;
- X é o tamanho da pedivela em metros;
- ω é velocidade angular da pedivela em radianos por segundo.

4.2.2 Velocidade Angular

A leitura efetuada pelo acelerômetro e giroscópio traz aquisições que necessitam ser convertidas para unidades de medidas usuais.

Segundo Halliday e Resnick (1983), estando um corpo no movimento de rotação, ele está variando a sua posição angular de modo que num primeiro momento, é conhecido pelo ângulo X_1 e num momento posterior é definida pelo ângulo X_2 , conforme ilustrado na Figura 25.

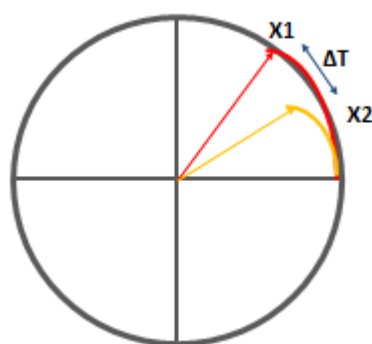


Figura 25 - Demonstração do cálculo de velocidade angular, fonte: autoria própria

É possível definir que a velocidade angular é a taxa com que a posição angular está variando. Ou seja, a relação entre o deslocamento angular e o tempo necessário para fazer esse deslocamento. Para obtermos a velocidade em rotações por minuto, utilizou-se:

$$N = \frac{60}{2\pi} \cdot \omega \quad (11)$$

Conforme a figura 25, o sensor inercial instalado descreve a velocidade angular em graus/s, obtida por:

$$\text{Velocidade angular} = \frac{X_1 - X_2}{\Delta T} \quad (12)$$

Sendo que as variáveis utilizadas de posição (X_1 e X_2) são obtidas após uma integração simples no tempo, pois o valor recebido do sensor inercial é a velocidade pontual. Já neste trabalho, é utilizado a velocidade angular diferencial entre dois pontos.

4.4 DESENVOLVIMENTO DO CIRCUITO

O desenvolvimento do circuito elétrico final se deu com base nos requisitos principais exigidos do protótipo, como: custo acessível, confiabilidade de dados e o menor tamanho possível. A escolha dos componentes e do material se deu através do estudo das características apresentadas pelos dispositivos escolhidos para o desenvolvimento, e pelo modo de operação.

Algumas ligações elétricas na parte do esquemático são fundamentais (figura 26), ou por transmitirem os dados, ou por serem responsáveis pela alimentação do circuito. Dentre elas, temos as portas Rx e Tx, do Arduino nano, responsável pela comunicação serial; a saída do amplificador, responsável por demonstrar as aquisições de força; as trilhas de alimentação +5V e GND, que alimenta o INA, o módulo o *Bluetooth*, e o MPU 6050; A ponte de Wheatstone que não está visível na imagem, pois está embaixo do módulo *Bluetooth*, e uma tensão de 9 V, oriunda de uma bateria fora do circuito, responsável por alimentar o Arduino Nano.

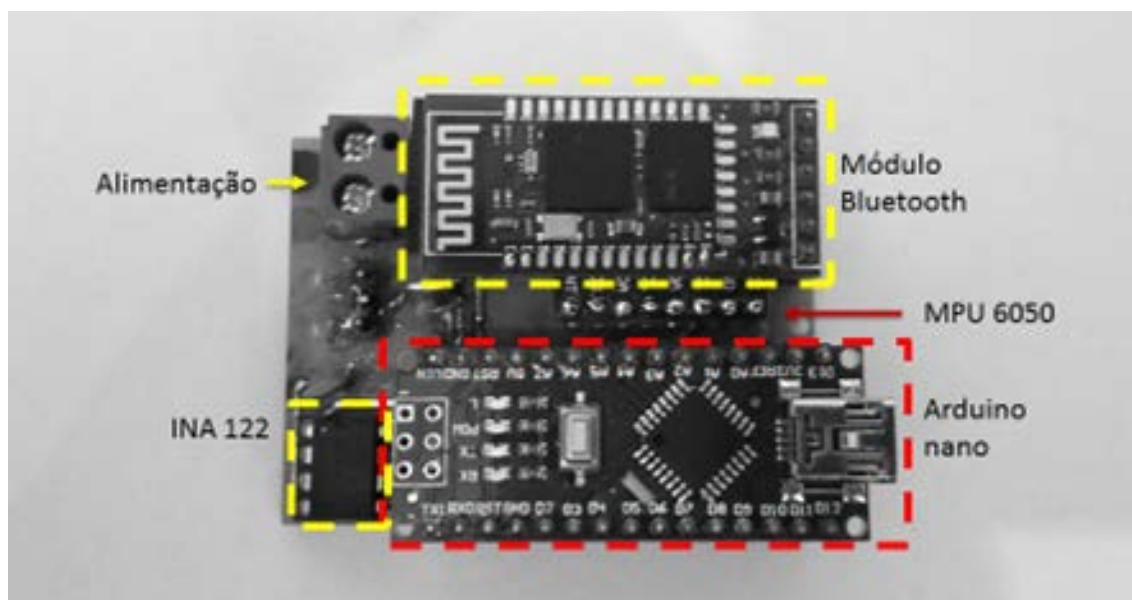


Figura 26 - Foto da vista superior da placa com o circuito eletrônico
Fonte: autoria própria

- Posição de Instalação da Placa:

A placa foi posicionada de forma a não atrapalhar o ciclista no movimento da pedalada, conforme figura 27, sendo necessário ainda tendo que estar perto do extensômetro, para uma melhor coleta da deflexão.

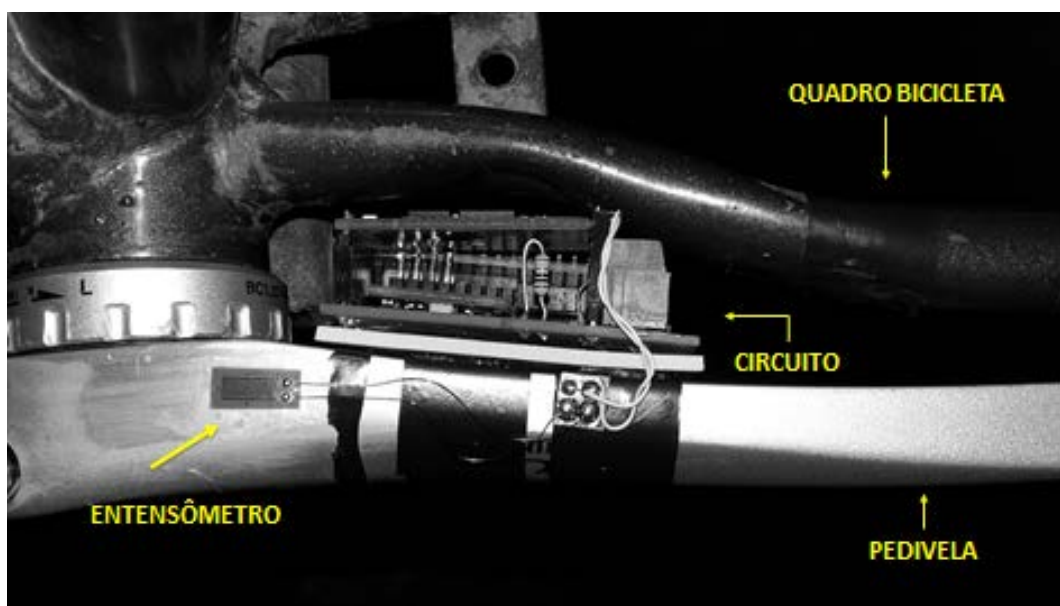


Figura 27 - Disposição da placa na pedivela em relação a bicicleta
Fonte: autoria própria

- Tamanho da Placa:

O tamanho da placa contendo o circuito eletrônico é de 4,5 cm de largura por 5,5 cm comprimento, com 2 cm de altura. Dimensões aceitáveis, visto que a distância entre o quadro e a pedivela é de 2,5 cm, e conforme a figura 28, as dimensões da placa ficaram proporcional com o tamanho da pedivela.

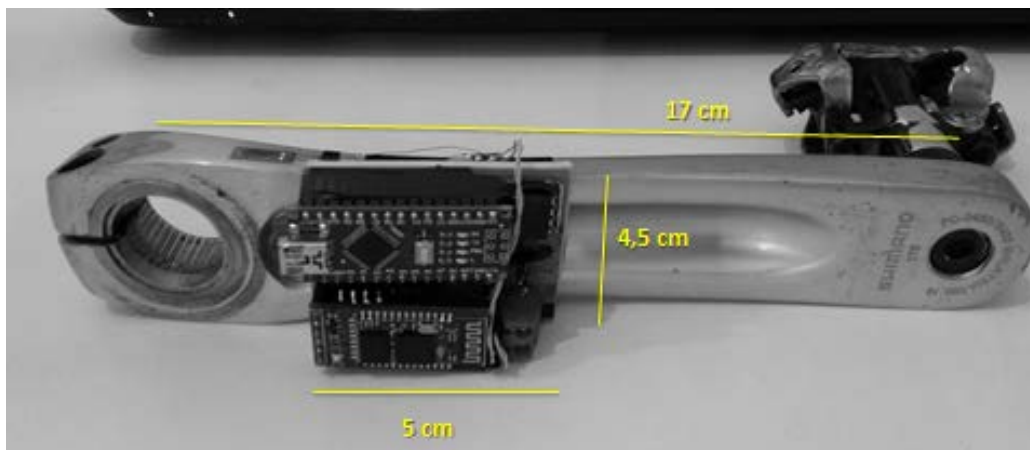


Figura 28 - Tamanho da pedivela e da placa
Fonte: autoria própria

- Pedivela utilizada:

Um dos requisitos deste trabalho, não é desenvolver um pedivela ou modificar a pedivela que o ciclista já utiliza. Mas sim, instalar o medidor de potência em uma pedivela comercial, adaptando-se a cada caso, sendo mais abrangente possível para que não restrinja o uso do equipamento.

O modelo de pedivela escolhido para ser trabalhada e para a implementação de todo o circuito, foi uma Shimano FC 3450 que possui comprimento de braço de 17 cm, feita em alumínio, desenvolvido para bicicletas de velocidade e estrada.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O foco deste tópico é apresentar os resultados e discussões obtidos visando o cumprimento dos objetivos anteriormente citados. Todos os valores e análises aqui apresentadas são referentes ao desenvolvimento do protótipo, assim como a demonstração de seu desempenho nas condições de teste.

Para melhor apresentar os resultados obtidos e estruturar a discussão de cada parte, os dados foram divididos em quatro partes, sendo elas: medições de força e torque, cadência, potência e os resultados acadêmicos.

5.1 MEDIÇÕES DE FORÇA E TORQUE

A medição de força é fundamental para o cálculo da potência como já apresentado, porém, os valores de potência podem ser interpretados separadamente da potência, sendo base para análises pontuais. Dentro deste contexto, foram realizadas duas análises em função da força aplicada na pedivela.

A primeira análise é em relação ao ângulo da pedivela conforme é aplicada a força na pedivela, determinando as regiões de máxima transferência de força para gerar movimento. A segunda análise é quantitativa, fornecendo assim a equação base do cálculo de torque que foi programado no microcontrolador, sendo essa uma das variáveis para o cálculo da potência (equação 7).

- Análise Angular

A pedivela gira 360° (figura 29) durante a execução do exercício e possui regiões onde se aplicam maiores intensidades de força e outras onde há somente atuação da inércia.

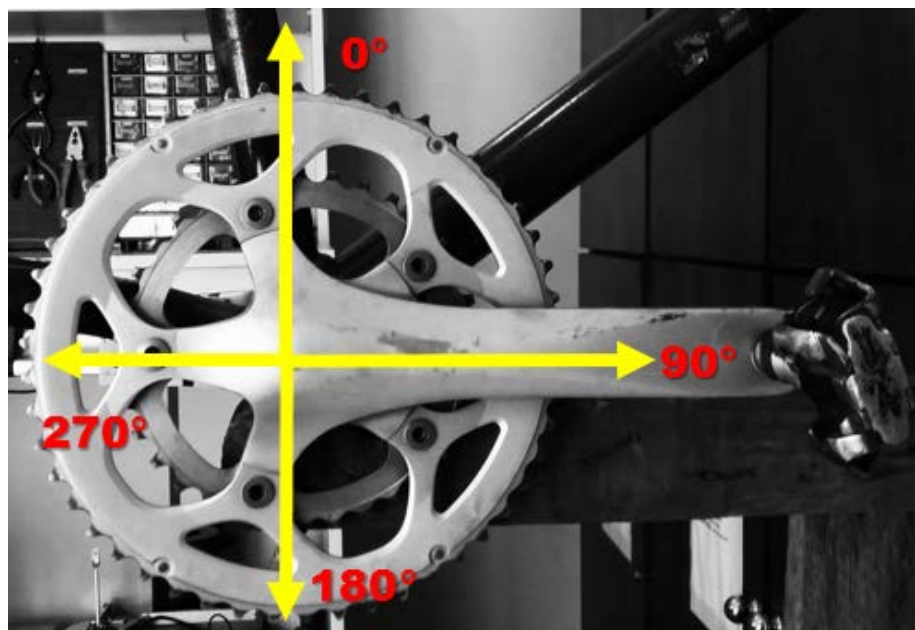


Figura 29 – Ângulos de força analisados na pedivela
Fonte: autoria própria

Como base nessa análise, a figura 30 apresenta um estudo feito por Carpes et al (2005) que analisou a força do ciclista mediante o ângulo da pedivela.

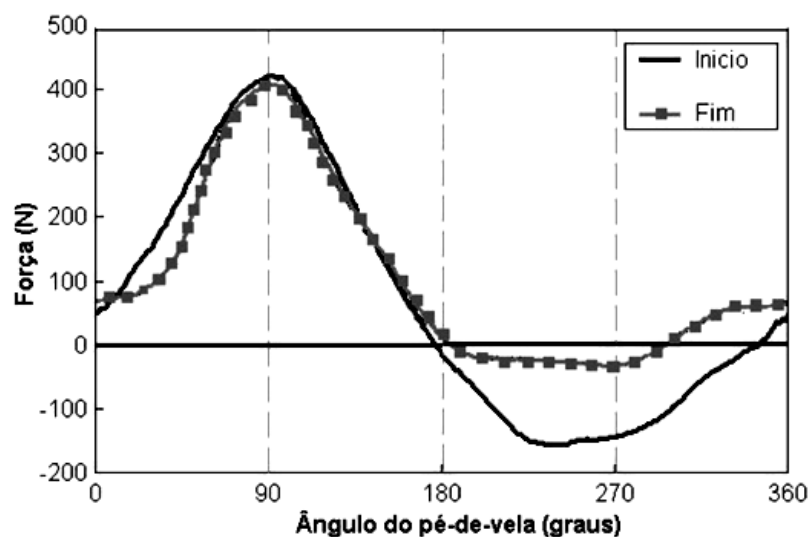


Figura 30 - Força aplicada pelo ciclista no pedal em função do ângulo da pedivela
Fonte: Carpes et al (2005)

Existem regiões ótimas para aplicação de força, regiões essas que dependem do ângulo da pedivela em relação ao quadro da bicicleta. O trabalho de Carpes et al (2005) é o desenvolvimento de uma análise da aplicação da força no pedal em uma prova de contrarrelógio de 40 km, mostrando a importância de aplicar a força nas regiões certas e qual o comportamento dessa força durante o percurso.

Esse tipo de análise é importante neste trabalho, mostrando o funcionamento da aquisição do sinal em todo o período de aplicação de força pelo atleta. Como o protótipo aqui proposto foi inteiramente projetado pelos autores, é necessário a verificação de cada etapa do processo, sendo essa, a primeira análise da força.

Para uma visualização rápida do comportamento do sinal, o terminal de saída da placa de aquisição de dados foi conectado a uma ponteira de prova de um osciloscópio, gerando os sinais apresentados na figura 31.

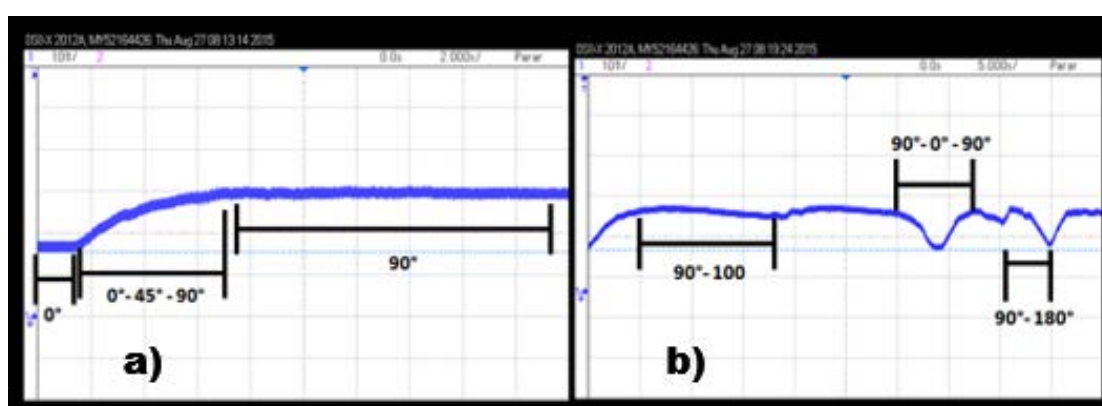


Figura 31 – Formas de onda obtidas com a variação do ângulo da pedivela, a) torque de 35,48 N.m e b) torque de 44,69N.m
Fonte: autoria própria

Após a apresentação da figura 31 (b) contendo os sinais obtidos com ensaios práticos, é possível observar que os "vales" das formas de onda são quando a pedivela se encontra com o ângulo na região do 0° ou do 180° .

Já os picos de torque estão localizados em torno do ângulo de 90° (figura 31 a), mostrando que é a região onde o ciclista aplica a maior força no momento da pedalada. As inclinações das curvas demonstram o sentido da pedalada do ciclista; se a pedivela se aproxima de 90° , a inclinação é positiva. Porém se a pedivela se afasta do ângulo de 90° , tanto para 0° quanto para 180° , a inclinação é negativa.

As regiões na parte posterior da pedivela esquerda (180° , 270° até 360°), são as regiões onde a aplicação de força ocorre no lado direito (oposto) da bicicleta.

Outra análise realizada baseou-se em Xu *et al* (2015), onde está descrito que, se o ciclista aplicar uma maior força na região em que a pedivela não produz tanto torque (0° ou 180°), a eficiência da pedalada é baixa, gerando pouco movimento e gastando mais energia.

Ele também apresenta uma análise do ângulo do pedal onde se localiza o pé do ciclista em função do sentido da força aplicada. Entre os 360° percorridos pela pedivela, existe um ângulo correto para a posição do pedal e conseqüentemente, da aplicação da força, como apresenta a figura 32.



Figura 32 – Exemplo de correção no ângulo do pé no pedal em relação a pedalada
Fonte: Xu et al (2015)

- **Análise Quantitativa**

A análise quantitativa tem o objetivo de levantar a curva de funcionamento dos extensômetros em função de um valor de torque aplicado no pedal. Como já apresentado, a aplicação da força pelo ciclista resulta em um toque aplicado e conseqüentemente na deformação da pedivela, a qual gera um valor de tensão na saída da ponte de Wheatstone (tópico 3.4). Como este valor de amplitude é muito baixo (com valores nas casas de μV), o mesmo é colocado na entrada do amplificador de instrumentação (por exemplo o INA). Após a amplificação deste valor, o sinal é enviado a entrada analógica do microcontrolador que necessita de uma equação para correlacionar os valores de tensão de entrada com o torque aplicado. Essa equação é baseada na curva de resposta dos extensômetros, obtida empiricamente.

Baseando-se nesse contexto, o levantamento da curva foi realizado com de modo estático. A pedivela é posicionada no ângulo de 90° que conforme a análise do item anterior, é a posição ideal para aquisição do torque máximo aplicado. A

figura 33 apresenta as condições de teste e demonstra a aplicação do peso padrão como o objeto utilizado para gerar o torque analisado.

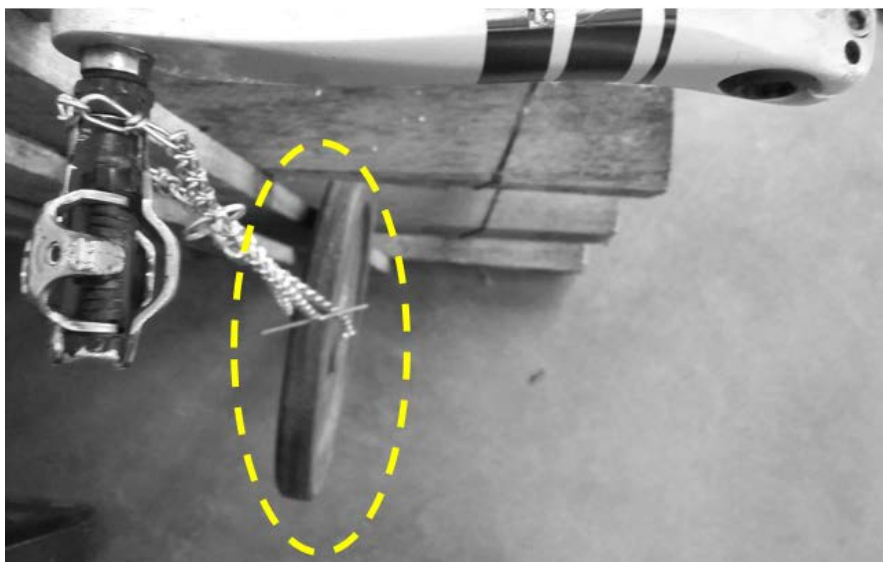


Figura 33 – Condições de teste com destaque para o peso padrão utilizado gerando o torque na pedivela esquerda
Fonte: autoria própria

Após as coletas efetuadas, obteve-se a curva apresentada no gráfico 1, que possui a seguinte equação característica:

$$y = 5,47 \cdot x + 3,58 \quad (13)$$

Sendo que y é a tensão correspondente em mV e x é o torque aplicado no pedal em N.m. Essa equação é importante para a programação do microcontrolador que receberá um valor de tensão e calculará o torque proporcional.

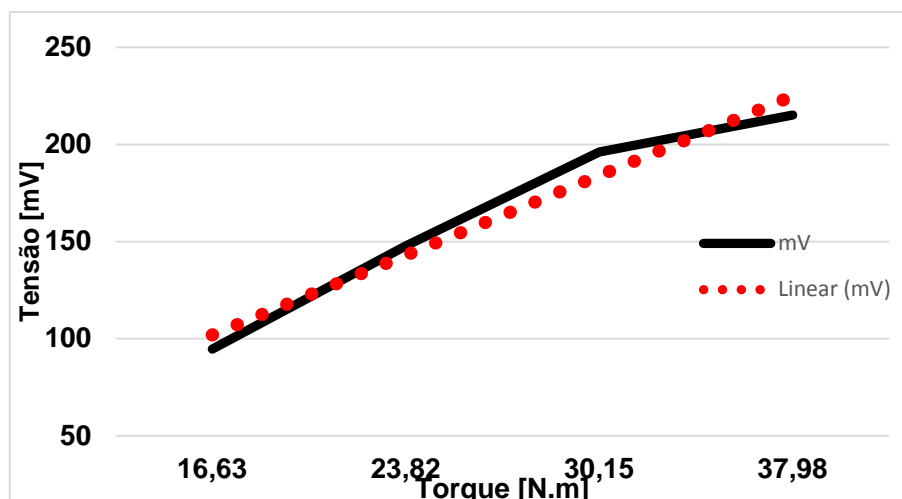


Gráfico 1 – Curva “mV” representando os dados coletados em comparação com a curva perfeitamente linear
Fonte: autoria própria

A curva “mV” representa os resultados coletados com a prática mencionada anteriormente, sendo ela com características lineares, como era esperado. Essa curva foi comparada com uma curva perfeitamente linear, mostrando sua tendência de linearidade.

Os resultados coletados em laboratório (tabela 4) foram analisados em função de três valores: o valor médio de tensão em função do torque aplicado, o valor de desvio padrão (mV) e o valor da entrada analógica do arduino em função da tensão de saída do INA.

O valor da entrada analógica do arduino possuirá valores entre 0 e 1023 como citado anteriormente, porém como o sistema possui um *offset* de 1,5 V, será considerado zero (sem torque) o valor de 307.

Tabela 4 – Valores das medições de Tensão em função do Torque aplicado na pedivela

Torque (N.m)	37,98	30,15	23,82	16,63
Média (mV)	215,18	196,13	147,77	94,67
Desvio Padrão (mV)	11,08	12,75	9,43	10,24
Entrada Analógica	351	347	337	326

Fonte: autoria própria

Após a apresentação dos valores obtidos nas medições realizadas, observa-se que o maior desvio padrão de 12,75 mV, resultando em 6,5% do valor da

amostra. Valor esse aceitável para o protótipo aqui desenvolvido, considerando que esse valor é utilizado como variável de entrada no cálculo da potência.

Os valores da entrada analógica do arduino apresentados (tabela 4) são os valores recebidos por ele e colocado como variável para o cálculo do torque. Após esse passo, o valor de torque é inserido no cálculo da potência, juntamente com o valor de cadência, transmitindo esses valores para o dispositivo móvel.

5.2 MEDIÇÕES DE CADÊNCIA

A cadência é uma das variáveis que compõe o cálculo de potência, determinando a velocidade de pedalada do ciclista. Como a etapa de funcionamento do protótipo que mede a cadência é distinta da força, a validação dessa medição ocorreu de forma separada.

O método utilizado para a medição e a validação dos dados coletados de cadência, foi desenvolvido para comparar os valores do protótipo em relação aos valores analisados por vídeo.

A figura 34 apresenta duas imagens da filmagem citada. A primeira é o local de instalação do sensor de inércia (MPU-6050) na pedivela. A segunda imagem demonstra o sentido de rotação da pedivela, o ponto de partida (posição) e a referência para contagem das voltas.



Figura 34 - a) instalação do módulo Bluetooth e do MPU-6050 na pedivela; b) Estrutura e sentido de rotação do teste
Fonte: autoria própria

Em um período de um minuto são salvos valores de cadência gerados em um intervalo médio de valores, como por exemplo 80 rpm. Esse processo é filmado e analisado posteriormente, visualizando quantas voltas a pedivela completou em um minuto. No exemplo utilizado acima, o valor correto seriam 80 voltas em um minuto.

A figura 35 apresenta um exemplo de uma imagem retirada da filmagem de validação. O ponto inicial é o mesmo de referência para a contagem de voltas, sendo o destacado com o texto em azul. No centro da coroa existe uma sinalização do ângulo total que a pedivela percorre e um círculo azul, apresentando o movimento percorrido por ela.



Figura 35 - Imagem retirada da filmagem de validação do sistema de medição de cadência do protótipo

Fonte: arquivo pessoal

Foram analisadas sete coletas em sequência, sempre variando os intervalos dos valores de cadência. Para cada coleta foi determinado um intervalo objetivando a facilidade de visualização dos resultados. Os valores de cadência foram determinados entre 50 rpm até 120 rpm, valores comuns de cadência para ciclistas e triatletas em competições de estrada.

Como o sensor de inércia transmite os dados em uma frequência de aproximadamente 13,88 Hz, cada amostra possui em torno de 833 valores de cadência.

O gráfico 2 apresenta os valores de medição de cadência, tanto do protótipo, quanto pela análise de vídeo. As variações de intervalos e os valores de erro padrão do protótipo dessa validação, são demonstrados na tabela 5.

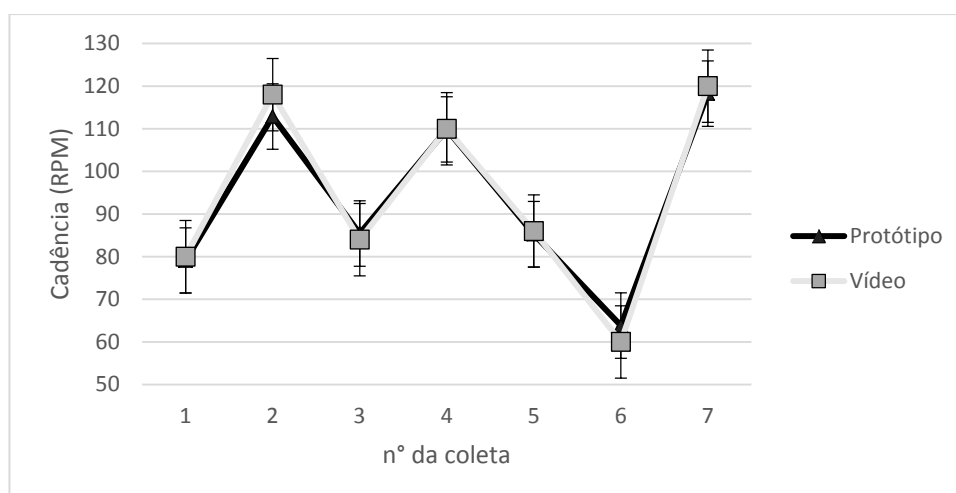


Gráfico 2 – Valores médios coletados na validação
Fonte: autoria própria

Tabela 5 - Análise estatística dos resultados obtidos na validação da medição de cadência
Fonte: autoria própria

Análise	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7
Intervalo de cadência (rpm)	77-83	112-118	83-89	107-113	77-83	60-66	118-123
Desvio Padrão do protótipo (rpm)	3,49	3,01	2,75	3,00	3,92	2,60	3,48

Percebe-se que o desvio padrão máximo nas sete amostras coletadas foi de aproximadamente 3,92 rpm, mostrando que todos os valores apresentados considerando o desvio padrão, estão entre os valores analisados por vídeo. As variações apresentadas nos intervalos corresponderam praticamente iguais, conforme é demonstrado na curva do gráfico 2.

Os valores coletados e a análise realizada na validação da medição de cadência foram satisfatórios, visto que a diferença dos valores não passa de 4,33%. A validação desses valores é importante, visando sempre a diminuição do erro e do aumento da confiabilidade dos dados apresentados ao atleta.

5.3 MEDIÇÕES DE POTÊNCIA

As medições de potência foram originadas das coletas de dados provenientes da força e da cadência. As coletas foram realizadas no laboratório de modo a analisar o funcionamento do protótipo. Após as coletas dos valores de força e cadência, foram realizados os cálculos para apresentar os valores de potência nos mesmos períodos que as coletas práticas.

As somas dos períodos das coletas resultaram em um tempo total de 169 segundos de dados salvos e analisados. Como já citado, os valores de cadência e força foram divididos em sete intervalos diferentes, tendo como resultado o gráfico 3.

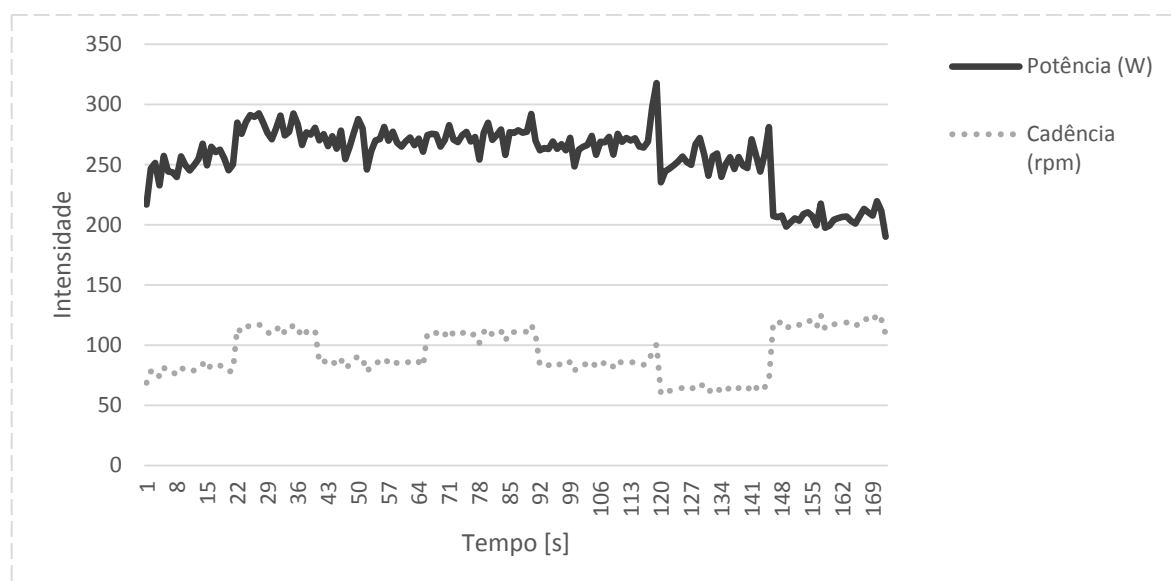


Gráfico 3 – Curva de potência e cadência referente as coletas de dados em laboratório
Fonte: autoria própria

As curvas de potência e cadência apresentadas no gráfico 3 representam os valores obtidos com os ensaios de laboratório. Para uma análise mais completa dos resultados coletados, foram calculados e apresentados (tabela 6) os seguintes itens: valor médio da potência (P_{MED}), desvio padrão, potência máxima ($P_{MÁX}$) e mínima ($P_{MÍN}$).

Tabela 6 – Valores de potência referente a cada amostra prática coletada

AMOSTRA	1	2	3	4	5	6	7
P_{MED} (W)	249,71	281,53	269,65	273,97	269,24	253,89	205,89
$P_{MÁX}$ (W)	267,4	292,71	287,92	292,09	317,82	281,22	219,68
$P_{MÍN}$ (W)	216,9	266,3	245,97	254,18	248,53	235,37	190,13
Desvio Padrão (W)	11,32	7,71	8,87	7,63	12,62	10,55	6,18

Fonte: autoria própria

Observando a tabela 6 é possível afirmar que os valores de cada amostra possui um valor de desvio padrão aceitável para os primeiros dados do protótipo, sendo o maior valor de desvio padrão de 12,62 W da amostra 5, que corresponde a aproximadamente 4,69% do valor médio da amostra. Sendo o valor de potência máxima de 317,82 W, potência média de 257,69 W e potência mínima de 190,13 W.

Os valores de potência, como já citado, foram obtidos de forma simulada e em condições de laboratório, porém o sistema como um todo em pleno

funcionamento já pode ser testado em condições de treino, sendo esse um dos passos futuros deste projeto.

5.4 VISUALIZAÇÃO DOS DADOS

A figura 36, demonstra como é disposto os dados para a visualização pelo usuário. Onde priorizou-se o fácil entendimento, uma vez que os dados são recebidos de forma instantânea e estando o ciclista em movimento. Tem-se que os dados de dT, relativo ao tempo de coleta dos ângulos, e o RPM, relativo a cadência desenvolvida pelo ciclista, são os dados com maior importância para visualização. Sendo os outros dados: temperatura (Tmp) em graus Celsius, deltaa e CAD são referentes a duas equações realizadas pelo arduino nano.

```

1104141409.txt
| Tmp = 24.91 | dT = 72.00 | deltaa = 43.46 | CAD = 75.84 | RPM = 82.59
| Tmp = 24.95 | dT = 71.00 | deltaa = 48.65 | CAD = 84.89 | RPM = 82.59
| Tmp = 24.81 | dT = 72.00 | deltaa = 52.40 | CAD = 91.44 | RPM = 82.59
| Tmp = 24.81 | dT = 72.00 | deltaa = 47.18 | CAD = 82.33 | RPM = 82.59
| Tmp = 24.86 | dT = 71.00 | deltaa = 42.49 | CAD = 74.15 | RPM = 82.59
| Tmp = 25.00 | dT = 72.00 | deltaa = 37.66 | CAD = 65.72 | RPM = 82.59
| Tmp = 24.91 | dT = 72.00 | deltaa = 34.00 | CAD = 59.33 | RPM = 82.59
| Tmp = 24.91 | dT = 71.00 | deltaa = 34.03 | CAD = 59.38 | RPM = 82.59
| Tmp = 24.81 | dT = 72.00 | deltaa = 33.95 | CAD = 59.24 | RPM = 82.59
| Tmp = 24.86 | dT = 72.00 | deltaa = 37.98 | CAD = 66.28 | RPM = 82.59
| Tmp = 24.91 | dT = 71.00 | deltaa = 42.79 | CAD = 74.66 | RPM = 82.59
| Tmp = 24.86 | dT = 73.00 | deltaa = 46.18 | CAD = 80.59 | RPM = 82.59
| Tmp = 24.86 | dT = 72.00 | deltaa = 52.34 | CAD = 91.34 | RPM = 82.59
| Tmp = 24.81 | dT = 72.00 | deltaa = 52.56 | CAD = 91.72 | RPM = 82.59
| Tmp = 24.77 | dT = 71.00 | deltaa = 46.43 | CAD = 81.02 | RPM = 86.06

```

Figura 36 - Exemplo de visualização dos dados no dispositivo móvel
Fonte: Autoria própria

5.5 RESULTADOS ACADÊMICOS

Além dos resultados práticos e a validação do protótipo, obteve-se alguns resultados na área acadêmica que vale a pena ressaltar, visando sempre a importância deste trabalho para a comunidade científica e em geral. Esses

resultados foram divididos em três tópicos: proteção intelectual, publicações em congressos e atuação acadêmica.

- Proteção Intelectual

O objetivo de desenvolver um equipamento nacional, acessível e de menor custo para brasileiros; fez-se a necessidade da proteção intelectual da ideia e do projeto em si. No fim de 2014 iniciou-se o processo de escrita da documentação necessária para o requerimento de patente nacional.

Após uma longa procura por patentes nacionais referente a medição de potência e esportes que utilizam bicicleta, chegou-se à conclusão da viabilidade de requerer a patente do protótipo desenvolvido neste trabalho.

O procedimento foi conduzido pela Agência de Inovação da UTFPR, que por sua vez coordenou todo o pedido e o requereu juntamente ao INPI (Instituto Nacional da Propriedade Intelectual).

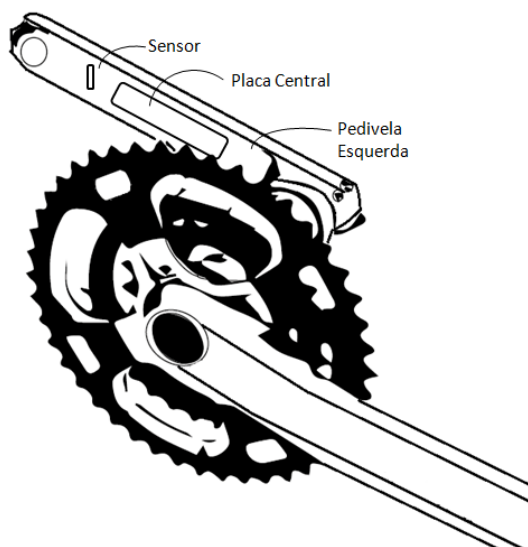


Figura 37 - Perspectiva do protótipo desenvolvido neste trabalho
Fonte: Patente Requerida, imagem 2

O pedido foi protocolado no dia quatro de agosto do presente ano sob o protocolo: BR 10 2015 018633 9, processo esse nomeado de Medidor de potência fisiológica para ciclistas (figura 37).

- Publicações em Congressos

Após o pedido de proteção intelectual ter o protocolo gerado pelo INPI, duas publicações do trabalho foram realizadas em congressos da área de engenharia. Essas publicações tiveram como objetivos a divulgação do trabalho desenvolvido e a análise do medidor de potência como ferramenta de estratégia de treinamento no ciclismo.

A primeira publicação ocorreu no VI Seminário de Eletrônica e Automação da UTFPR-PG, com o título: Medidor de Potência Fisiológica para Ciclistas. O evento ocorreu no mês de agosto deste ano, sendo que a participação no mesmo foi importante para divulgação do trabalho desenvolvido e para uma contextualização do equipamento no meio da eletrônica. O trabalho foi focado em mostrar como um medidor de potência é estruturado e como a sua utilização é comum e importante no esporte.

A segunda publicação ocorreu no X Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais, apresentado em Ponta Grossa, também no mês de agosto deste ano. O título do trabalho foi: A Importância de Equipamentos Tecnológicos em Esportes de Alto Rendimento. O medidor de potência nesse caso foi utilizado como o exemplo principal de equipamentos que auxiliam na estratégia de treinos e competições. Outros equipamentos e processos foram abordados no texto, porém o medidor de potência foi citado como o projeto a ser desenvolvido no momento, por meio deste trabalho.

- Atuação Acadêmica

Além deste trabalho de conclusão de curso, a presente pesquisa foi iniciada como Iniciação Científica financiada seis meses pela Fundação Araucária. A pesquisa realizada focou na instrumentação da pedivela e de seu comportamento com a força aplicada no pedal. O título do trabalho foi: Desenvolvimento de um sistema de aquisição e análise de dados provenientes do esforço de uma pedivela para análise de treinamento no ciclismo profissional, vinculado ao projeto de pesquisa: Desenvolvimento e aplicação de sensores para fins industriais e biomédicos.

O trabalho durou doze meses e teve seus resultados divulgados no XX Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR realizado no mês de outubro do presente ano em Campo Mourão, Paraná.

- **Trabalhos Futuros**

Este trabalho será base para outras pesquisas futuras dos autores, a nível de pós graduação, mostrando seu potencial e complexidade em seu desenvolvimento. Como neste momento o objetivo é o desenvolvimento do protótipo, sua continuação (tabela 7) terá foco na otimização, validação e profissionalização do processo, assim como em análises mais específicas por exemplo: medição de força na bicicleta em diferentes pontos e condições de funcionamento em casos extremos (temperatura, umidade, pressão, etc).

Tabela 7 – Cronograma de atividades dos trabalhos futuros
ATIVIDADE **PREVISÃO**

Otimização e testes	Durante 2016
Validação	2º semestre de 2016
Profissionalização do processo	1º semestre de 2017
Testes em condições de estresse	2º semestre de 2017
Utilização pela Liga de Ciclismo dos Campos Gerais – PR.	A partir do fim da validação do produto

Fonte: autoria própria

Após a realização de cada passo já citado, a proposta é a utilização deste equipamento pelos atletas da Liga de Ciclismo dos Campos Gerais – Paraná, principalmente nas categorias de base. A importância do desenvolvimento de produtos tecnológicos para a utilização de atletas brasileiros é cada vez mais evidente, principalmente pela necessidade de apoio para a evolução do esporte nacional.

6 CONCLUSÃO

A importância de equipamentos tecnológicos nas aplicações esportivas está cada vez maior e mais abrangente. A medição de dados para análises de condicionamento físico, fisiológico e de desempenho se tornou ferramenta fundamental para treinadores e atletas no desenvolvimento do esporte.

No ciclismo não é diferente, pelo contrário, os dados no ciclismo são ferramentas que não podem ser desprezadas. A potência é a melhor grandeza para avaliar a condição física e fisiológica do atleta, sendo ela não alterada por influências internas (emoções, ansiedade, alimentação, etc) e pode ser auxiliada por outras grandezas, como: frequência cardíaca, velocidade e Percepção Subjetiva de Esforço.

A importância da medição de potência no ciclismo pode ser exemplificada como uma forma de classificar o tipo do atleta (velocista ou fundista) e também o seu nível (profissional, amador, não treinado, etc). Os valores de potência podem determinar a estratégia utilizada em competições como divisão de intensidades por trecho, período ou altitude.

Atualmente no Brasil, não existe nenhum fabricante de medidores de potência, o que acaba causando um alto custo na importação do produto, em sua manutenção e na compra de acessórios (ciclo-computador). Isso acarreta na dificuldade (falta de acesso) dos atletas nacionais utilizarem essa tecnologia em seus treinos e competições.

Este estudo teve como objetivo principal o desenvolvimento do protótipo de um medidor de potência, o qual foi instalado em uma pedivela esquerda de uma bicicleta. Desejou-se desenvolver um equipamento de baixo custo, que pudesse nacionalizar esta tecnologia e futuramente concorrer com os equipamentos importados.

O protótipo aqui desenvolvido possui os seguintes componentes e suas funções: dois extensômetros como sensores de deformação (meia ponte); INA122 como amplificador de instrumentação; MPU6050 como sensor de inércia (velocidade angular); Arduino Nano como microcontrolador; e o HC-05 como módulo *Bluetooth*.

Esses componentes são responsáveis por medir a força que o ciclista aplica na pedivela, por medir a cadência de pedalada, por processar os dados e realizar o

cálculo de potência e por transmitir os valores de potência e cadência para um dispositivo móvel.

A medição de força e torque foi dividida em duas análises (angular e quantitativa). A análise angular mostrou que a melhor região para aplicação de força do ciclista é quando a pedivela se encontra próxima de 90° . Porém, quando a pedivela está em regiões perto de 0° ou 180° , a força aplicada não gera movimento, diminuindo a eficiência de pedalada. A análise quantitativa foi responsável pela caracterização do sensor, obtendo assim a equação de funcionamento dos extensômetros em função do torque aplicado no pedal.

A medição de cadência foi validada por meio de análise de vídeo, onde comprovou-se que os valores de cadência obtidos com o sensor (rpm e rad/s) são aproximadamente iguais aos valores de rotações físicas da pedivela.

Com base nos valores de toque e cadência obtidos em laboratório, foram calculados valores de potência referente aos mesmos períodos de coletas. Tendo esses valores de potência coletados em sete amostras que totalizaram 169 segundos de coleta, foram apresentados os valores de potência média, máxima, mínima e o desvio padrão para cada amostra, visualizando o resultado obtido com o protótipo.

Além dos resultados práticos com o protótipo, obteve-se importantes resultados acadêmicos, como a publicação do projeto em dois congressos técnicos, o requerimento da proteção intelectual do projeto juntamente ao INPI, uma iniciação científica e a possibilidade de continuação do estudo em nível de pós-graduação e profissional.

Após todas as análises realizadas e a apresentação dos valores obtidos no laboratório, pode-se concluir que os objetivos do trabalho foram alcançados de maneira satisfatória, finalizando a presente etapa do projeto como um todo.

Os próximos passos deste projeto são: validação, otimização e profissionalização do equipamento, além de obter dados coletados em treinos e competições de ciclismo.

REFERÊNCIAS

ALLEN, Hunter; COGGAN, Andrew R. **Training and racing with a power meter**. 2. ed. Boulder: Velopress, 2010. 300 p.

ANALOG. **A DESIGNER'S Guide to Instrumentation Amplifiers**. 2006. Disponível em: <<http://www.analog.com/inamps>>. Acesso em: 26 out. 2015.

ANDOLFATO, R. P.; CAMACHO, J. S.; BRITO, G. A. **EXTENSOMETRIA BÁSICA**. Universidade Estadual Paulista - Júlio Mesquita Filho - Unesp. Ilha Solteira, 2004. 46 p.

ANT+. **HISTORY: BORN TO SOLVE REAL PROBLEMS**. 2015. Disponível em: <<https://www.thisisant.com/company/d1/history/>>. Acesso em: 16 nov. 2015.

ARDUINO. **Arduino Nano**. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardNano>>. Acesso em: 06 nov. 2015.

BARRETO, E. J., 2002. **O extensômetro Elétrico de Resistência**, L editora. Brasil.

BERTUCCI, W.; TAIAR, R.; GRAPPE, F.. Differences between sprint tests under laboratory and actual cycling conditions. **The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness**, [s.i], v. 45, n. 3, p.277-283, 2005.

BLUETOOTH. **What is Bluetooth Technology?: Low Energy**. 2015. Disponível em: <<http://www.bluetooth.com/what-is-bluetooth-technology/bluetooth-technology-basics/low-energy>>. Acesso em: 16 nov. 2015.

CANDOTTI, Cláudia Tarragô. **Características Biomecânicas e Fisiológicas da Técnica de Pedalada de Ciclistas e Triatletas**. 2003. 142 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências do Movimento Humano, Escola de Educação Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

CARPES, Felipe Pivetta et al. Aplicação de força no pedal em prova de ciclismo 40 km contra-relógio simulada: estudo preliminar. **Revista Brasileira de Educação Física e Esporte**, São Paulo, v. 19, n. 2, p.105-113, 2005.

CBC. **Confederação Brasileira de Ciclismo: HOME**. Disponível em: <<http://www.cbc.esp.br/default/index.php>>. Acesso em: 03 dez. 2015.

CEFISE. **Cicloergômetro Biotec 2100**. 2015. Disponível em: <<http://www.cefise.com.br/produto/21/32/cicloergometria>>. Acesso em: 05 nov. 2015.

COSTA, V. P. et al. Efeitos do treinamento intervalado em variáveis fisiológicas e na performance de ciclistas competitivos. **Revista Andaluza de Medicina del Deporte**, [s.i], v. 7, n. 2, p.83-89, 2014.

EARNEST, Conrad P. et al. RELIABILITY OF THE LODE EXCALIBUR SPORT ERGOMETER AND APPLICABILITY TO COMPUTRAINER ELECTROMAGNETICALLY BRAKED CYCLING TRAINING DEVICE. **Journal Of Strength And Conditioning Research**, [s.i], v. 19, n. 2, p.344-348, 2005.

FRIEL, Joe. **THE POWER METER HANDBOOK: A User's Guide for Cyclists and Triathletes**. Boulder: Velopress, 2012. 159 p.

GARMIN. **VECTOR 2: Medições onde mais importa**. 2015. Disponível em: <<http://sites.garmin.com/pt-PT/vector/>>. Acesso em: 18 out. 2015.

GHARGHAN, Sadik Kamel; NORDIN, Rosdiadee; ISMAIL, Mahamod. Empirical investigation of pedal power calculation techniques for track cycling performance measurement. **2013 IEEE Student Conference On Research And Development**, [s.l.], p.48-53, dez. 2013. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE). DOI: 10.1109/scored.2013.7002539.

GRANTE. **Apostila de Extensometria**. Florianópolis: Ufsc, 2004. 46 p.

INSTRUMENTS, National. **Medições de deformação com strain gages**. 2013. Disponível em: <<http://www.ni.com/tutorial/7130/pt/>>. Acesso em: 01 nov. 2015.

HALLIDAY, David and RESNICK, Robert. **Física 4 a ed., volume 4**. Livros Técnicos e científicos, Rio de Janeiro, 1983.

I2C-BUS. **I2C**. 2015. Disponível em: <http://www.i2c-bus.org/references/>. Acesso em: 04 nov. 2015.

INSTRUMENTS, National. **Medindo distensão com Strain Gauges**. 2013. Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/3642/pt>>. Acesso em: 26 out. 2015.

INVENSENSE. **MPU 6050**. 2013. Disponível em: <<http://www.invensense.com/products/motion-tracking/6-axis/mpu-6050/>>. Acesso em: 04 nov. 2015.

ITEADSTUDIO. **Hc 05 - Datasheet**. 2010. Disponível em: <http://www.robotshop.com/media/files/pdf/rb-ite-12-bluetooth_hc05.pdf>. Acesso em: 06 nov. 2015.

JAVAREZ JUNIOR, Laercio; MARTINS, Camila Almeida. **EXTENSOMETRIA BÁSICA**. Ponta Grossa - PR: Laercio Javarez Junior, 2012. 70.

LEE, K. B. **Principles of Microelectromechanical Systems**. Wiley – IEEE Press. 1^a ed, 2011.

LIMA, Sandro Reginato Soares de. **INTEGRAÇÃO GPS/INS UTILIZANDO SENSORES INERCIAIS BASEADOS EM SISTEMAS MICROELETROMECÂNICOS (MEMS)**. 2005. 136 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Geodésicas, Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

MARTINCOSKI, Daniel Henrique. **SISTEMA PARA TELEMETRIA DE ELETROCARDIOGRAMA UTILIZANDO TECNOLOGIA BLUETOOTH**. 2003. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

MARTINS, Rebeca Machado et al. NÍVEL DE DESIDRATAÇÃO DURANTE UMA AULA DE CICLISMO INDOOR. **Revista Brasileira de Nutrição Esportiva**, São Paulo, v. 1, n. 3, p.91-104, jun. 2007.

MASUZAWA, Takahisa. **State of the art of micromachining**. CIRP Annals-Manufacturing Technology 49.2 (2000): 473-488.

MESSTECHNIK, Schoberer Rad. **HISTORY**: From humble beginnings, to The industry standard. 2015. Disponível em: <<http://www.srm.de/company/history/>>. Acesso em: 15 out. 2015.

MIXED SIGNAL MICROCONTROLLER. 2011. Disponível em: <<http://www.ti.com/product/msp430g2452>>. Acesso em: 26 out. 2015.

NETO, Carlos Dreyer, et al. **Desenvolvimento de uma plataforma de força em pedal de ciclismo**. Braz J Biomech 3 (2001): 39-44.

OKAZAKI, Victor Hugo Alves et al. Ciência e tecnologia aplicada à melhoria do desempenho esportivo. **Revista Mackenzie de Educação Física e Esporte**, São Paulo, v. 11, n. 1, p.143-157, 2012.

PEREIRA, Fábio. **Microcontroladores PIC**. 4.ed. SÃO PAULO: Érica, 2006. 358p.

PETERSEN, K. E. **Silicon as a Mechanical Material**, Proceedings of the IEEE, May 1982, Vol. 70, No. 5, p. 420-457.

POWER2MAX. **Athletes and teams**: Anja Beranek – Long distance Turbo Diesel. 2015. Disponível em: <<http://www.power2max.com/northamerica/athletes-and-teams/>>. Acesso em: 05 nov. 2015.

POWER2MAX. **Power2max power meters explained**. 2015. Disponível em: <<http://www.power2max.com/northamerica/power2max-power-meters-explained/>>. Acesso em: 01 nov. 2015.

POWERTAP. **COMPARE POWER METERS: PREPARE TO DOMINATE**. 2015. Disponível em: <<http://www.powertap.com/page/compare>>. Acesso em: 15 out. 2015.

QUARQ. **CHOOSING A POWER METER: POWER METER COMPARISON**. 2015. Disponível em: <<http://www.quarq.com/pages/getting-started/choosing-power-meter>>. Acesso em: 18 out. 2015.

RECEITA FEDERAL. **Sistemas de Comércio Exterior**: Simulação do Tratamento Tributário e Administrativo das Importações. 2015. Disponível em: <<http://www4.receita.fazenda.gov.br/simulador/Simulacao-tag.jsp>>. Acesso em: 27 out. 2015.

REIS, Valdinei Rodrigues dos. **Protocolo de Comunicação I2C**. 2014. Disponível em: <<http://www.arduino.br/arduino/i2c-protocolo-de-comunicacao/>>. Acesso em: 06 nov. 2015.

SRM. **SRM TRAINING SYSTEM: WHY POWER?**. 2015. Disponível em: <<http://www.srm.de/srm-training-system/why-power/>>. Acesso em: 27 out. 2015.

STAGES, Cycling. **POWER METERS: SHIMANO DURA-ACE 9000**. 2015. Disponível em: <<http://www.stagescycling.com/global/products/dura-ace-9000/>>. Acesso em: 5 nov. 2015.

STORE, SRM. **PowerMeter only: POWERMETER SPIDER ONLY - CANNONDALE STANDARD**. 2015. Disponível em: <<http://store.srm.de/powermeter-only/road-and-triathlon/powermeter-spider-only-cannondale-standard.html>>. Acesso em: 27 out. 2015.

STORE STAGES CYCLING. **Access Denied**. Disponível em: <<https://store.stagescycling.com/denyaccess.aspx>>. Acesso em: 2 dez. 2015.

XU, James Y. et al. Integrated Inertial Sensors And Mobile Computing For Real-Time Cycling Performance Guidance Via Pedaling Profile Classification. **IEEE Journal Of Biomedical and Health Informatics**, [S.L.], V. 19, N. 2, P.440-445, Mar. 2015. Institute Of Electrical & Electronics Engineers (IEEE). Doi: 10.1109/Jbhi.2014.2322871.