

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**MAURÍCIO HÜSKEN**

**INSTRUMENTAÇÃO DOS PEDAIS DE UMA BICICLETA DE  
ESTRADA COMO PROPOSTA PARA ANÁLISE DA FORÇA  
APLICADA**

Porto Alegre

2018

**MAURÍCIO HÜSKEN**

**INSTRUMENTAÇÃO DOS PEDAIS DE UMA BICICLETA DE  
ESTRADA COMO PROPOSTA PARA ANÁLISE DA FORÇA  
APLICADA**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Controle e Automação - Instrumentação.

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Alexandre Balbinot**

Porto Alegre

2018

MAURÍCIO HÜSKEN

**INSTRUMENTAÇÃO DOS PEDAIS DE UMA BICICLETA DE  
ESTRADA COMO PROPOSTA PARA ANÁLISE DA FORÇA  
APLICADA**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Alexandre Balbinot, UFRGS

Doutor pela UFRGS – Porto Alegre, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Sergio Luiz Stevan Junior, UTFPR

Doutor pela Universidade de Aveiro – Aveiro, Portugal

Prof.<sup>a</sup> Dra. Léia Bernardi Bagesteiro, UFRGS

Doutora pela University of Surrey – Surrey, Inglaterra

Prof. Dr. Valner João Brusamarello, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, Brasil

Coordenador do PPGEE: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Valner João Brusamarello

Porto Alegre, março de 2018.

## DEDICATÓRIA

À minha família, por todo o esforço e dedicação em me proporcionar uma formação moral e afetiva, um lar amoroso e pautado em valores que vão muito além de questões materiais e financeiras. Vocês são verdadeiros heróis e possuem meu mais profundo respeito! Quero que saibam e tenham a certeza de que absolutamente tudo que conquistei e possivelmente ainda conquistarei nesta vida, já possuí e ainda possuirá a marca de vocês. Em especial, à minha mãe, que desde quando eu era criança, sempre me incentivou a estudar e lutar por metas cada vez mais ambiciosas e desafiadoras.

Aos tantos amigos e conhecidos que fiz por esse mundo afora, seja em viagens, momentos de lazer, sala de aula ou em minha carreira profissional, onde cada qual possui sua história e luta pela realização dos seus sonhos, e que em algum momento manifestaram apoio e que me ajudaram a chegar ao final desta importante etapa em minha vida.

Aos poucos e bons amigos mais próximos, que vivenciaram comigo o significado de ingressar em uma pós-graduação. Verdadeiros irmãos que a vida me deu e que pretendo levar para o resto da vida.

Aos professores que acreditaram, apoiaram ou de alguma forma contribuíram para que eu chegasse a este momento. Pessoas que possuem um brilho especial nos olhos e na alma, que são motivadoras e que serviram de inspiração ao longo de toda minha formação.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Dr. Alexandre Balbinot, pela orientação participativa e de extrema competência, mas acima de tudo, pela confiança depositada desde o primeiro momento em que aceitou me orientar.

Aos colegas profissionais e amigos Tiago, Louise e Rodrigo, que foram fundamentais tanto pela contribuição técnica quanto pela forma terna, carinhosa, companheira e prestativa como me trataram e tratam as pessoas que estão próximas a vocês.

Aos colegas profissionais e amigos da Visus, que seguem presentes em minha vida, por todo o subsídio fornecido e pela atenção incondicional. Em especial, ao Gustavo e ao Fernando: podem ter certeza que jamais esquecerei de todo apoio, ajuda em discussões técnicas, disponibilização de espaço para trabalhar e até mesmo financiamento de material para a realização das etapas experimentais! Vocês foram fantásticos!

Aos amigos que fiz durante o mestrado, pelo companheirismo nas disciplinas e auxílio durante o desenvolvimento desta dissertação. Em especial, aos colegas do IEE, que de forma acolhedora e prestativa me receberam junto à equipe.

Aos colegas profissionais e amigos da IMS, empresa onde trabalho atualmente, que compreenderam a importância deste momento em minha vida e me apoiaram da melhor forma possível, seja absorvendo cargas de trabalho, administrando minha ausência ou mesmo com palavras de apoio e afeto que demonstram que não estamos sozinhos jamais.

Por fim, agradeço imensamente ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica pela oportunidade de realização deste trabalho, bem como à equipe de professores que forneceram muito do subsídio intelectual aplicado neste trabalho.

## RESUMO

Com o crescimento do ciclismo como opção para lazer, meio de transporte e, principalmente, esporte voltado à competição, estudos mais aprofundados fizeram-se necessários visando à maximização do desempenho de atletas de alto nível. De forma complementar, muitos são os desenvolvimentos na área de sistemas de instrumentação com o objetivo primordial de possibilitar a medição e a caracterização dos diversos parâmetros de interesse dos pesquisadores na área do ciclismo. Tendo em vista o surgimento de diversos sistemas comerciais que permitem realizar a medição de grandezas como força e potência mecânica gerada pelo ciclista, este trabalho propôs instrumentar e caracterizar as medições provenientes dos pedais e pedivelas de uma bicicleta de estrada com a finalidade de, posteriormente, compará-las com base em métodos estatísticos adequados. Em função das limitações mecânicas inerentes à bicicleta e presentes no movimento de rotação nos pedais e pedivelas, foram criados sistemas completamente independentes, com alimentações elétricas feitas por baterias, e a sincronização para o início das aquisições, através de módulos ZigBee. Os ensaios contaram com a participação de dez voluntários, os quais foram responsáveis por gerar vinte *sprints* de dados, cada, que serviram para avaliar estatisticamente e concluir, por meio de Análises de Variância, que as forças aplicadas pelos ciclistas se diferenciaram significativamente para pelo menos uma das células de carga.

**Palavras-chave:** Ciclismo, Sistemas de Instrumentação, Deformação Mecânica, Extensômetros, Projetos de Experimentos.

## **ABSTRACT**

Cycling has grown as a leisure activity, means of transport and mainly as a professional sport. Therefore, deeper studies and research aiming at maximizing the performance of high-level athletes have been made necessary. Additionally to such studies, the area of instrumentation schemes has developed seeking to make possible the measuring and characterization of several parameters for researchers interested in cycling. Regarding the vibrant surging of systems that allow the measuring of magnitudes such as the forces and mechanical power generated by the cyclist, the present research aims at implementing and characterizing the measuring deriving from pedals and crankset for a road bicycle so as to analyze the results with appropriate statistic methods. Considering the mechanical limitations inherent to the bicycle – the movement of pedals and crankset – independent electrical systems charged by batteries were created, as well as the synchronization for the beginning of data acquisitions through ZigBee modules. Ten volunteers participated on the practices. They generated twenty sprints of data each. Such data served to statistically evaluate and conclude, based on variance analysis, that the power applied by the cyclists are significantly different for one of the load cell.

**Keywords: Cycling, Instrumentation Systems, Mechanical Deformation, Strain Gages, Experiment Projects.**

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	17
1.2	OBJETIVOS.....	18
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>19</b>
2.1.	CONCEITOS BÁSICOS.....	19
2.2.	TRABALHOS RELACIONADOS À EXTENSOMETRIA E AO CICLISMO .....	29
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>40</b>
3.1.	PROJETO DA CÉLULA DE CARGA .....	42
3.1.1	Procedimento para Análise da Célula de Carga Baseada na Simulação Estrutural .....	43
3.1.2	Definição e Posicionamento dos Extensômetros .....	46
3.2.	DETERMINAÇÃO DAS FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA EXPERIMENTAIS.....	50
3.2.1	Medição da Deformação Mecânica .....	50
3.2.2	Medição da Tensão Elétrica de Saída das Pontes.....	52
3.3.	PROJETO DO CIRCUITO CONDICIONADOR DE SINAIS.....	53
3.3.1	Tensão Elétrica de Referência para as Pontes de <i>Wheatstone</i> .....	54
3.3.2	Ponte de <i>Wheatstone</i> e o Circuito de Ajuste de Zero.....	55
3.3.3	Estágios de Amplificação .....	59
3.3.4	Terceiro Estágio de Amplificação e Filtragem do Sinal.....	60
3.3.5	Circuito de Ajuste de <i>Offset</i> .....	63
3.3.6	Função de Transferência Teórica Proposta .....	64
3.4.	FONTE DE ALIMENTAÇÃO ELÉTRICA .....	64
3.5.	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS .....	66
3.6.	CADEIAS DE MEDIÇÃO PROPOSTAS .....	69
3.7.	CALIBRAÇÃO ESTÁTICA DAS CÉLULAS DE CARGA E MONTAGEM NA BICICLETA.....	71
3.8.	PROCEDIMENTO PARA ENSAIOS E ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS .....	73
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>79</b>



4.1 DETERMINAÇÃO DAS FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DAS CÉLULAS DE CARGA .....	79
4.2 AVALIAÇÃO DO SISTEMA PARA AQUISIÇÃO E SINCRONIZAÇÃO DOS DADOS.....	86
4.3 DETERMINAÇÃO DA CADEIA DE MEDIÇÃO EXPERIMENTAL .....	88
4.4 ANÁLISE DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO .....	92
4.4.1 Análise da Incerteza de Medição para a Ponte de <i>Wheatstone</i> .....	92
4.4.2 Análise da Incerteza de Medição para o Circuito de Condicionamento .....	94
4.5 ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS.....	97
4.5.1 Análise Estatística dos Dados para a Força Efetiva .....	97
4.5.2 Análise Estatística dos Dados para a Força Resultante .....	101
4.5.3 Análise Estatística dos Dados para a Potência Mecânica .....	104
4.5.4 Análise das Relações entre as Células de Carga .....	108
5 CONCLUSÕES .....	112
6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	115
REFERÊNCIAS .....	117
APÊNDICE A – PROGRAMAÇÃO EM <i>LABVIEW</i> PARA AQUISIÇÕES DE DADOS DE DEFORMAÇÕES MECÂNICAS .....	122
APÊNDICE B – TABELAS DE DADOS COM GRÁFICOS PARA OS ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE MEDIÇÃO DA DEFORMAÇÃO MECÂNICA DO PEDAL ESQUERDO.....	123
APÊNDICE C – TABELAS DE DADOS COM GRÁFICOS PARA OS ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE MEDIÇÃO DA DEFORMAÇÃO MECÂNICA DO PEDAL DIREITO.....	127
APÊNDICE D – TABELAS DE DADOS PARA OS ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE CALIBRAÇÃO DO PEDAL ESQUERDO.....	131
APÊNDICE E – TABELAS DE DADOS PARA OS ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE CALIBRAÇÃO DO PEDAL DIREITO.....	133
ANEXO A – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTAÇÃO INA125U .....	135
ANEXO B – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO AMPLIFICADOR OPA4227.....	136

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Pontos de medição das grandezas de interesse: (a) entre pedivela e coroa – modelo 1, (b) entre pedivela e coroa – modelo 2, (c) entre pedivela e coroa - modelo 3, (d) quadro, (e) guidão e garfo, (f) sapatilha, (g) cubo e (h) pedal (adaptado de GLASKIN, 2012).	22
Figura 2 Representação dos eixos cartesianos no pedal (adaptado de NABINGER, 2006).	23
Figura 3 Os quadrantes e fases da pedalada (CARPES <i>et al.</i> , 2005).	24
Figura 4 Relação Torque x Ângulo do Pedivela (ARFAOUI; BERTUCCI, W. M.; POLIDORI, 2012).	25
Figura 5 (a) Ângulo do pedal ( $\alpha$ ) e do pedivela ( $\beta$ ) (b) Decomposição da força tangencial (c) Decomposição da força normal aplicada ao pedal (adaptado de CARPES <i>et al.</i> , 2005).	25
Figura 6 (a) Ângulo do Pedivela; (b) Ângulo Relativo e (c) Ângulo do Pedal (adaptado de NABINGER, 2006).	27
Figura 7 Conexão dos extensômetros em configuração de ponte completa: Direção Perpendicular (BALBINOT; MILANI; NASCIMENTO, 2014).	30
Figura 8 Resultado do Experimento <i>Outdoor</i> , (a) Forças e (b) Torque e Potência Mecânica (BALBINOT; MILANI; NASCIMENTO, 2014).	31
Figura 9 Modelo 3D dos pedivelas, (a) Pedivela direito vista superior, (b) Pedivela direito vista inferior, (c) Pedivela esquerdo vista inferior e (d) Pedivela esquerdo vista superior (PIGATTO <i>et al.</i> , 2016).	32
Figura 10 Foto do Sistema de Medição, (a) Pedivela Esquerdo, (b) Pedivela Direito: (1) Baterias (PIGATTO <i>et al.</i> , 2016).	33
Figura 11 Comparação entre as forças efetivas no início e no fim de 40km de pedalada (CARPES <i>et al.</i> , 2005).	34
Figura 12 Pedal para Medição de Força Tridimensional (LEE <i>et al.</i> , 2015).	35
Figura 13 Comparativo entre o torque mensurado no CycPed, PowerForce e SRM (ALEXANDER <i>et al.</i> , 2007).	37

Figura 14 Posicionamento dos extensômetros, (a) Vista Lateral Direita, (b) Vista Superior e (c) Vista Interna da Lateral Esquerda (MANOLOVA <i>et al.</i> , 2015).....	38
Figura 15 Diagrama Geral do Sistema. ....	40
Figura 16 Bloco Expandido das Aquisições A/D e Comunicação com o <i>Datalogger</i> .....	41
Figura 17 Pedal MTB Alumínio 9/16 FP-961 PTA (Adaptado de Feimin, 2016): a) Foto real; b) Modelo Virtual criado no SolidWorks 2015. ....	42
Figura 18 Simulação considerando aplicação de forças nos três eixos de interesse do pedal..	44
Figura 19 Simulação do conjunto pedal-pedivela: (a) Eixo Lateral (X); (b) Eixo Paralelo (Y); (c) Eixo Perpendicular (Z). ....	45
Figura 20 Modelo simulado apresentando o posicionamento dos extensômetros para deformações no Eixo Lateral (X). ....	46
Figura 21 Modelo simulado apresentando o posicionamento dos extensômetros para deformações no Eixo Paralelo (Y).....	47
Figura 22 Modelo simulado apresentando o posicionamento dos extensômetros para deformações no Eixo (Z). ....	47
Figura 23 Dimensões físicas dos extensômetros utilizados no trabalho (adaptado do catálogo de extensômetros da HBM, 2015). ....	48
Figura 24 Deformação Aparente do Extensômetro versus Temperatura (adaptado de HBM, 2015).....	49
Figura 25 Esquema de ligação das Pontes de <i>Wheatstone</i> utilizada para os pedais: (a) direção perpendicular, (b) direção lateral e (c) direção paralela. ....	50
Figura 26 Foto do ensaio Experimental com a Máquina de Compressão Modelo DL 2000 para medição de deformação mecânica: (a) no Eixo X e (b) no Eixo Z.....	51
Figura 27 Diagrama de Blocos Sugerido para o Circuito de Condicionamento. ....	54
Figura 28 Esquema do circuito utilizado para gerar a tensão elétrica de referência das pontes de <i>Wheatstone</i> .....	55
Figura 29 Esquema do Circuito de Ajuste de Zero. ....	56
Figura 30 Esquema do Amplificador na Configuração Não Inversor. ....	60
Figura 31 Esquema da Topologia Padrão do Filtro Passa-Baixas Ativo de 4° Ordem. ....	62
Figura 32 Diagrama de Bode e de Fase do Filtro Projetado.....	63
Figura 33 Esquema do Circuito de Ajuste de <i>Offset</i> do sinal condicionado. ....	63
Figura 34 Esquema do Circuito Conversor para Tensão Elétrica Simétrica. ....	65
Figura 35 Sistema Proposto para Aquisição Simultânea de Dados através dos Módulos ZigBee. ....	67

Figura 36 Fluxograma do <i>Firmware</i> utilizado nas células de carga.....	68
Figura 37 Cadeias de Medição Propostas para os Pedais: a) Eixo Lateral (X); b) Eixo Paralelo (Y); c) Eixo Perpendicular (Z).....	70
Figura 38 Circuitos de Condicionamento acoplados aos Pedais da Bicicleta. ....	72
Figura 39 Circuito de Condicionamento acoplado ao Pedivela. ....	73
Figura 40 Sistema utilizado no Ensaio Experimental com Voluntários em Laboratório. ....	74
Figura 41 Referência angular utilizada para: a) Ângulo do pedivela; c) Ângulo dos pedais em relação ao ângulo do pedivela; c) Ângulo relativo dos pedais com informação de amplitude angular (adaptado de NABINGER, 2006).....	75
Figura 42 Funções de Transferência da Calibração do Pedal Esquerdo: a) Eixo Lateral (X); b) Eixo Paralelo (Y); c) Eixo Perpendicular (Z). ....	81
Figura 43 Funções de Transferência da Calibração do Pedal Direito: a) Eixo Lateral (X); b) Eixo Paralelo (Y); c) Eixo Perpendicular (Z). ....	83
Figura 44 Interface criada em C# para realizar a Sincronização das Aquisições.....	86
Figura 45 Medição do <i>Delay</i> para Sincronismo entre as Aquisições de Dados. ....	87
Figura 46 Cadeias de Medição Experimentais do Pedal Esquerdo: a) Eixo Lateral (X); b) Eixo Paralelo (Y); c) Eixo Perpendicular (Z).....	89
Figura 47 Cadeias de Medição Experimentais do Pedal Direito: a) Eixo Lateral (X); b) Eixo Paralelo (Y); c) Eixo Perpendicular (Z).....	90
Figura 48 Avaliação da distribuição da Força Efetiva por: a) Célula de Carga; b) Voluntário; c) Marcha. ....	98
Figura 49 Análise dos Resíduos para verificação de uso do modelo para Força Efetiva. ....	98
Figura 50 Avaliação das Médias da Força Efetiva através do Método de Comparação Múltipla de <i>Tukey</i> . ....	99
Figura 51 Análise dos Efeitos para a Força Efetiva. ....	100
Figura 52 Avaliação da distribuição da Força Resultante por: a) Célula de Carga; b) Voluntário; c) Marcha. ....	101
Figura 53 Análise dos Resíduos para verificação de uso do modelo para Força Resultante. ....	102
Figura 54 Avaliação das Médias da Força Resultante através do Método de Comparação Múltipla de <i>Tukey</i> . ....	102
Figura 55 Análise dos Efeitos para a Força Resultante. ....	103
Figura 56 Avaliação da distribuição da Potência Mecânica por: a) Célula de Carga; b) Voluntário; c) Marcha.....	105

Figura 57 Análise dos Resíduos para verificação de uso do modelo para a Potência Mecânica. .....	105
Figura 58 Avaliação das Médias da Potência Mecânica através do Método de Comparação Múltipla de <i>Tukey</i> . ....	106
Figura 59 Análise dos Efeitos para a Potência Mecânica.....	107
Figura 60 Relação das Forças Efetiva e Resultante por: a) Células de Carga; b) Voluntários; c) Marchas da Bicicleta.....	108
Figura 61 Relação da Assimetria Bilateral Efetiva e Resultante: a) por Célula de Carga; b) por Voluntário. ....	109
Figura 62 Relação da Cadência por Voluntário. ....	110

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Especificações Técnicas do Paquímetro Mitutoyo 500-713-20. ....	43
Tabela 2 Especificações Técnicas do Alumínio 6061 T6.....	43
Tabela 3 Carga Máxima Aplicada em cada Eixo dos Pedais. ....	44
Tabela 4 Especificações Técnicas do Extensômetro HBM 1-LY13-0.6/120.....	48
Tabela 5 Especificações Técnicas da Placa de Aquisições Utilizada na Determinação da Deformação Mecânica. ....	51
Tabela 6 Especificações Técnicas do Multímetro Digital de Bancada. ....	53
Tabela 7 Principais Características do Filtro Projetado no Terceiro Estágio. ....	61
Tabela 8 Especificações Técnicas da Bateria LiFePo4. ....	65
Tabela 9 Especificações Técnicas dos Módulos <i>XBEE SI</i> . ....	66
Tabela 10 Relação de Ganhos Teóricos por Estágio de Amplificação.....	71
Tabela 11 Relação de Ganhos Experimentais por Estágio de Amplificação .....	91
Tabela 12 Sensibilidade e Incerteza de Medição para cada Eixo.....	96
Tabela 13 Resultado da Análise de Variância para a Força Efetiva.....	99
Tabela 14 Resultado da Análise de Variância para a Força Resultante. ....	103
Tabela 15 Resultado da Análise de Variância para a Potência Mecânica. ....	106

## LISTA DE ABREVIATURAS

DAQ: *Data Acquisition*

FE: Força Efetiva

IE: Índice de Efetividade

PMS: Ponto Morto Superior

PMI: Ponto Morto Inferior

UART: *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*

$VO_2$ : Consumo de Oxigênio

VI: *Virtual Instrument*

## 1 INTRODUÇÃO

Pesquisas direcionadas à área esportiva objetivam proporcionar uma melhoria de desempenho para atletas em competições, mas também uma melhor qualidade de vida para pessoas que optam pela prática em prol de uma vida mais saudável (BINI; CARPES, 2012; JENSEN, 2008). Por ser uma área multidisciplinar, estudos direcionados a este tema estão em franca expansão, valendo-se de avanços nas áreas da Biologia, Fisiologia, Anatomia, Matemática, Física, Medicina e demais campos de estudos correlatos (BOSCH, 2006; SOVNDAL, 2009). Da mesma forma, muitos são os desenvolvimentos na área de sistemas de instrumentação com o objetivo primordial de possibilitar a medição e a caracterização dos diversos parâmetros de interesse dos pesquisadores na área do ciclismo.

Através de estudos desenvolvidos nesta área, é possível melhorar o desempenho de atletas de diversas formas, seja atuando na técnica de pedalada, postura, ou ainda, alterando a ergonomia e tecnologia da própria bicicleta. Segundo (MINETTI; PINKERTON; ZAMPARO, 2001), as bicicletas tornaram-se complexas em razão da necessidade de redução do gasto energético durante a pedalada. Da mesma forma, para que o ciclista tenha um *feedback* da efetividade da técnica adotada e, com isto, tenha embasamento para atuar sobre ela, é necessário que medições sejam realizadas visando a obtenção de dados como as forças efetivas e potência mecânica gerada pelo movimento da pedalada. Diversos fatores afetam direta ou indiretamente a maximização da potência mecânica que será convertida em movimento, como a forma com que as forças são aplicadas nos pedais, sua simetria e módulo, direção de aplicação em relação ao ângulo do pedivela e a cadência da pedalada (BINI; CARPES, 2012).

Esta dissertação tem o interesse de investigar alguns aspectos relacionados à área de ciclismo. O Capítulo 2 apresenta uma breve introdução sobre alguns dos aspectos relacionados à área de Instrumentação Biomecânica em uma abordagem relacionada ao ciclismo. Consideram-se alguns fundamentos e equações utilizadas no decorrer do trabalho, além de



determinar os principais pontos onde a deformação mecânica é medida. Alguns trabalhos publicados na área apresentam o estado da arte, cujo foco é voltado à metodologia utilizada e aos resultados que embasaram a proposta desta dissertação.

A metodologia experimental (ver Capítulo 3), bem como, as propostas de circuito eletrônico e cadeias de medição são apresentadas através de diagramas, esquemas eletrônicos, descrição da simulação mecânica virtual e ensaios preliminares realizados em laboratório. Estes dados embasaram a topologia adotada no circuito de condicionamento e possibilitaram a elaboração das cadeias de medição propostas. O procedimento para análise dos dados coletados é detalhado no Capítulo 4, que apresenta os resultados e a análise *offline* dos dados obtidos nos ensaios experimentais, bem como, a análise de incerteza do sistema de condicionamento. Por fim, no Capítulo 5, uma discussão sobre os resultados alcançados, com o apontamento de propostas para trabalhos futuros relacionados à área de interesse no Capítulo 6.

## **1.1 JUSTIFICATIVA**

Diversos instrumentos foram criados com a proposta de realizar a medição de grandezas como força, torque, potência mecânica e cadência, onde cada qual se baseia em um método, ou princípio físico específico, escolhido por um determinado fabricante ou grupo de pesquisa. Normalmente, o ciclista opta por um instrumento de acordo com o que deseja monitorar, considerando suas características de funcionamento e a relação custo-benefício. Uma forma de avaliar os resultados apresentados por instrumentos comerciais ou, ainda, sistemas protótipos, consiste na comparação entre as medições em pontos distintos da bicicleta. Durante muito tempo, este conhecimento foi empírico e baseado apenas em aspectos *práticos* e na experiência de pessoas que atuam há bastante tempo na área.

Estudos científicos permitem o aprofundamento necessário para a compreensão do ato de pedalar, tendo em vista uma série de reações que são causadas no conjunto ciclista-bicicleta.

A força aplicada sobre os pedais, por exemplo, cria um estresse mecânico que resulta em deformações mecânicas em diversos pontos da estrutura, sendo comumente mensuradas nos próprios pedais, coroa, cubo da roda traseira ou então nos pedivelas da bicicleta. Sistemas comerciais para análise da força aplicada tendem a avaliar uma determinada parte da estrutura e apontam, através de dados absolutos, valores de força, potência e cadência medidos. De forma complementar, este trabalho é justificado pelo desenvolvimento de um sistema composto que permite avaliar simultaneamente a deformação mecânica nos pedais, de onde se obtém as forças aplicadas nos três eixos (perpendicular, paralelo e lateral) e nos pedivelas, possibilitando a comparação direta entre os resultados obtidos, para um mesmo estímulo de força aplicada, onde se busca avaliar possíveis diferenças entre cada um.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema instrumentado que permita comparar as medições de forças nos pedais e pedivelas de uma bicicleta de estrada, através de ensaios experimentais realizados com voluntários. Fatores como desempenho e características da pedalada de cada voluntário não serão discutidos nas avaliações. Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) criar um sistema *wireless* que possibilite a aquisição síncrona de dados dos pedais e pedivelas;
- b) realizar atividades experimentais em ambiente controlado *indoor* para a coleta de dados com voluntários;
- c) comparar os dados de força efetiva, força resultante e potência mecânica, na mesma base de tempo, nos pedais instrumentados neste trabalho com os pedivelas instrumentados por (PIGATTO et al., 2016).

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. CONCEITOS BÁSICOS

A Biomecânica, cujo termo surgiu da combinação das palavras Bio (ou Biologia) e Mecânica (OXFORD, 2013), baseia-se no estudo do movimento de seres vivos usando métodos e conceitos específicos da Física Mecânica (ATWATER, 1980; HATZE, 1974; WINTER, 2009). Segundo (HOFFMAN, 2009), a Biomecânica utiliza as leis da Mecânica para determinar como os seres se movem durante uma atividade física e como as forças atuam no corpo, afetando sua estrutura e funcionamento. Seja na medicina ou na área esportiva, estes estudos buscam descrever a forma como os movimentos ocorrem.

No esporte, um dos principais objetivos é a competição entre habilidades de movimento e perícia. Em épocas passadas, onde não haviam estudos específicos ou até mesmo recursos técnicos para uma análise mais detalhada, os movimentos atléticos eram executados e aperfeiçoados segundo a percepção e intuição dos treinadores dos atletas. Embora o conhecimento intuitivo sobre biomecânica fora utilizado por décadas e visto como suficiente para garantir o êxito dos atletas, esta não é a atitude predominante no mundo contemporâneo. Para atingir objetivos maiores tornam-se necessários conhecimentos mais aprofundados e específicos (ZATSIORSKY, 2000).

Em uma análise voltada ao ciclismo, é possível afirmar que o desempenho do atleta é afetado pela interação de diversas variáveis, como condições do meio ambiente, fatores humanos e mecânicos. Enquanto que engenheiros focam seus estudos no desenvolvimento de bicicletas mais eficientes, cinesiologistas, biomecânicos e fisiologistas investigam o desempenho no ciclismo sob uma perspectiva humana (GROOT *et al.*, 1994). Porém, independente de qual área o pesquisador pertença, o uso e o desenvolvimento de sistemas de

instrumentação para esta área do esporte, se faz necessário para possibilitar a medição e, por consequência, o monitoramento dos fenômenos de interesse.

O ciclismo é um esporte que tem apresentado um aumento considerável de adeptos nos últimos anos. Enquanto que grandes metrópoles registram crescimento no número de bicicletas, seja por questões físicas, de saúde, agilidade no deslocamento ou mesmo por questões financeiras, o esporte ciclismo tem se tornado cada vez mais popular e com novos adeptos a cada dia (SCHMIDT, 2014). Quando considerado como transporte, as bicicletas têm se mostrado uma excelente alternativa aos carros ou veículos de tração animal. Em Amsterdã, por exemplo, aproximadamente 20% das viagens envolvem o uso de bicicletas, enquanto que na Dinamarca, a popularização já ocorre desde a infância (JENSEN, 2008).

No ciclismo recreativo, palavras como competitividade e desempenho não possuem a mesma importância se comparadas a forma como são tratadas pelo ciclismo profissional. Esta busca por aumento de desempenho alavancou as pesquisas neste ramo, ao mesmo tempo que muitas delas tiveram grande importância na compreensão de aspectos fisiológicos como frequência cardíaca, nível de oxigenação sanguínea e preparo muscular. No entanto, como o desempenho não depende apenas do preparo físico do atleta, mas sim da escolha da melhor estratégia e técnica possíveis, tornou-se necessário o conhecimento detalhado de aspectos como cadência<sup>1</sup> e postura, visando sempre a busca pela maior caracterização possível do movimento (SOVNDAL, 2009).

De acordo com (GLASKIN, 2012), existem diversas formas de realizar a medição de grandezas como potência mecânica<sup>2</sup>, cadência da pedalada, resistência de atrito com o ar, entre

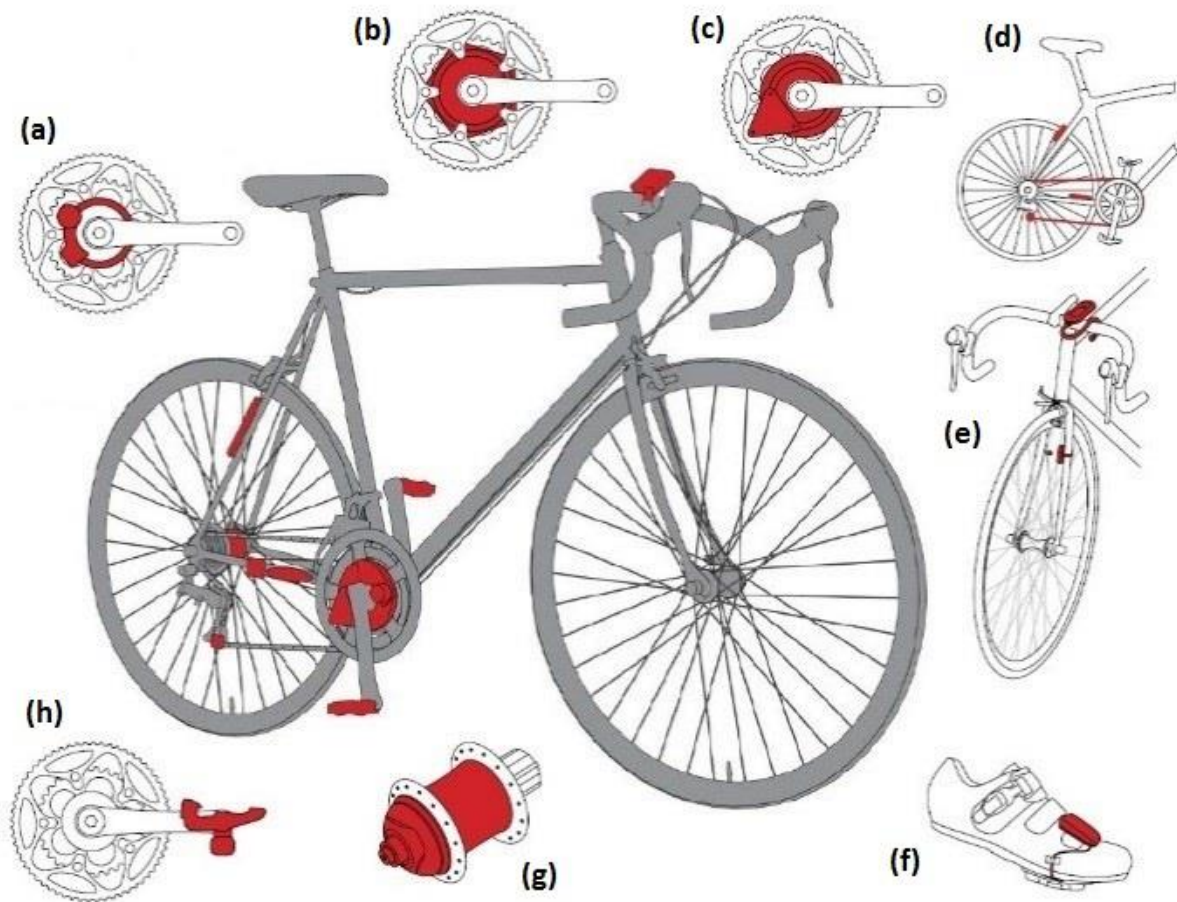
---

<sup>1</sup> Cadência - frequência do ciclo de pedalada e expressa individualmente em cada rotação.

<sup>2</sup> Potência Mecânica – trabalho realizado por pessoa ou máquina, transmitido através de algum mecanismo ou esforço físico, num determinado espaço de tempo.

outros. Sejam visando melhoria de desempenho, aspectos relacionados à saúde, bem-estar ou ainda diagnóstico de alguma patologia, medir estas grandezas é um procedimento fundamental para permitir análises corretas das variáveis de interesse. Entre os princípios físicos que permitem quantificar e relacionar as variáveis de interesse, destaca-se a dinamometria, que permite medir as forças aplicadas através da deformação mecânica (HALL, 2011). Isto é possível graças aos fenômenos de tração e compressão observados na estrutura de qualquer objeto carregado mecanicamente.

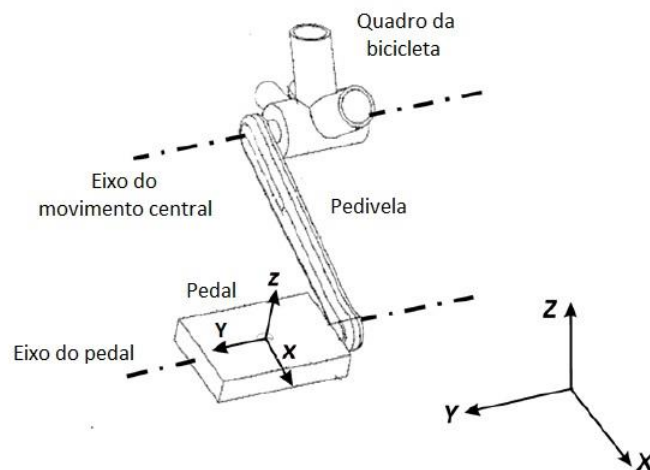
Embora o quadro da bicicleta apresente deformação mecânica devido à força peso exercida pela pessoa, os principais pontos de medição utilizados são os pedais, pedivela e coroa da bicicleta. Estes pontos foram escolhidos estrategicamente, uma vez que, além da potência mecânica, possibilitam apresentar ao usuário a cadência de pedalada, a qual é facilmente obtida quando relacionada à rotação dos aros, pedais ou pedivela. Além disso, é na coroa, nos pedais e pedivelas que a energia motora produzida pelo usuário é convertida em potência mecânica traduzida em movimento (GLASKIN, 2012). A Figura 1 apresenta os diversos pontos que poderiam ser utilizados para medir grandezas de interesse em uma bicicleta.



**Figura 1** Pontos de medição das grandezas de interesse: (a) entre pedivela e coroa – modelo 1, (b) entre pedivela e coroa – modelo 2, (c) entre pedivela e coroa - modelo 3, (d) quadro, (e) guidão e garfo, (f) sapatilha, (g) cubo e (h) pedal (adaptado de GLASKIN, 2012).

Para evitar interferências mecânicas na dinâmica do movimento, a deformação mecânica pode ser medida na junção do pedivela com a coroa, conforme apresenta a Figura 1 (a), (b) e (c), no cubo (Figura 1 (g)), no pedal (Figura 1 (h)) ou ainda fora da própria bicicleta, utilizando um sistema acoplado à sapatilha (Figura 1 (f)). Para coletar dados a partir do movimento da correia, como frequência de vibração e cadência, propõem-se sistemas com posicionamento apresentado na Figura 1 (d). Quando o objetivo é medir a força contrária ao movimento (atrito com o ar) e a cadência, por exemplo, uma opção para posicionamento é o guidão e o garfo, como exemplifica a Figura 1 (e) (GLASKIN, 2012).

Caracterizar a distribuição das forças aplicadas ao conjunto pedal-pedivela é de fundamental importância para compreensão da técnica de pedalada desenvolvida pelo ciclista. Através desta compreensão é possível identificar aspectos a serem corrigidos na busca por um melhor desempenho ou ainda o entendimento relacionado às lesões que esta atividade pode proporcionar (ROWLANDS; DOWNEY, 2000). O método utilizado para esta análise é conhecido como dinamometria do pedal, que consiste na análise da força resultante em um pedal instrumentado e posterior cálculo da força efetiva que é traduzida em movimento. Para isto, pode-se medir a força aplicada sobre o pedal em três eixos cartesianos locais (x, y e z) (NABINGER, 2006), conforme mostra a Figura 2.



**Figura 2 Representação dos eixos cartesianos no pedal (adaptado de NABINGER, 2006).**

Com relação ao movimento da pedalada, o mesmo pode ser dividido em quadrantes, de acordo com (SCHMIDT, 2014): a fase denominada “propulsão” ocorre nos dois primeiros quadrantes (entre  $0^\circ$  e  $180^\circ$ ), enquanto que a fase de “recuperação” representa as duas partes restantes (entre  $180^\circ$  e  $360^\circ$ ). Esta divisão permite analisar o movimento em partes, começando pelo ângulo inicial ( $0^\circ$ ), onde tem-se o chamado Ponto Morto Superior ou PMS. A energia convertida em movimento efetivo passa a ser percebida a partir dos  $10^\circ$  iniciais, sendo que a máxima potência efetiva ocorre entre  $90^\circ$  e  $110^\circ$ . Os 2º e 3º quadrantes são fundamentais para a análise da pedalada, visto que são neles que a maior parte da potência mecânica é

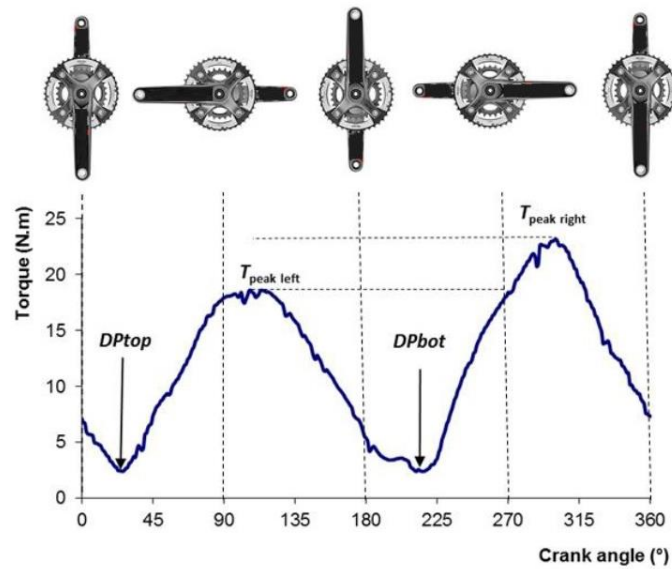
transformada em movimento propriamente dito. Além disto, ocorre o momento de transição, onde encerra-se a fase de propulsão e passa-se a exercer a força destinada à recuperação do movimento, logo após a passagem pela segunda zona morta, conhecida por Ponto Morto Inferior ou PMI. Enquanto que o lado direito entra na fase de recuperação, de forma complementar, o lado esquerdo entra na etapa de propulsão e vice-versa. Este ciclo é apresentado pela Figura 3.



**Figura 3 Os quadrantes e fases da pedalada (CARPES *et al.*, 2005).**

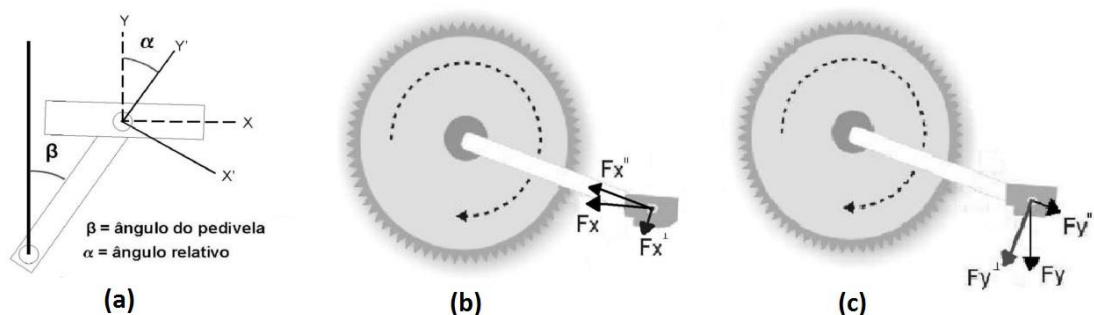
Alguns estudos que buscaram estabelecer comparações e análises sobre as características da pedalada levam em consideração o torque aplicado pelo sujeito, relacionando-o com o ângulo do pedivela. No trabalho sugerido por (ARFAOUI; BERTUCCI, W. M.; POLIDORI, 2012), estes dados são mensurados ao longo do tempo, considerando variações na potência mecânica em tempos cronometrados. A proposta visou analisar o padrão de pedalada adotado por pessoas com  $(53,5 \pm 4,1 \text{ anos})$ , onde a assimetria entre o torque dos pedais direito e esquerdo pode indicar e, se corretamente trabalhada, prevenir lesões devido ao excesso de carga aplicado nas articulações do joelho. A Figura 4 exemplifica parte dos dados coletados ao longo deste estudo.





**Figura 4** Relação Torque x Ângulo do Pedivela (ARFAOUI; BERTUCCI, W. M.; POLIDORI, 2012).

É importante ressaltar que para analisar as forças que atuam sobre um dado conjunto, pode ser necessário que se faça a decomposição das forças tangencial e normal como componentes separadas, de modo que, posteriormente, obtenha-se a força resultante do sistema. Neste caso, o princípio básico é separar as componentes que são convertidas em movimento das componentes que representarão apenas consumo energético. Um exemplo da decomposição dos vetores de força é apresentado na Figura 5.



**Figura 5** (a) Ângulo do pedal ( $\alpha$ ) e do pedivela ( $\beta$ ) (b) Decomposição da força tangencial (c) Decomposição da força normal aplicada ao pedal (adaptado de CARPES *et al.*, 2005).

Segundo (NABINGER, 2006), para calcular a força efetiva (FE), que equivale à componente perpendicular ao pedivela e que representa, de fato, a parcela da força aplicada que é transmitida para o movimento, pode-se utilizar a Equação (1):

$$FE = Fy^{\perp} + Fx^{\perp} \quad (1)$$

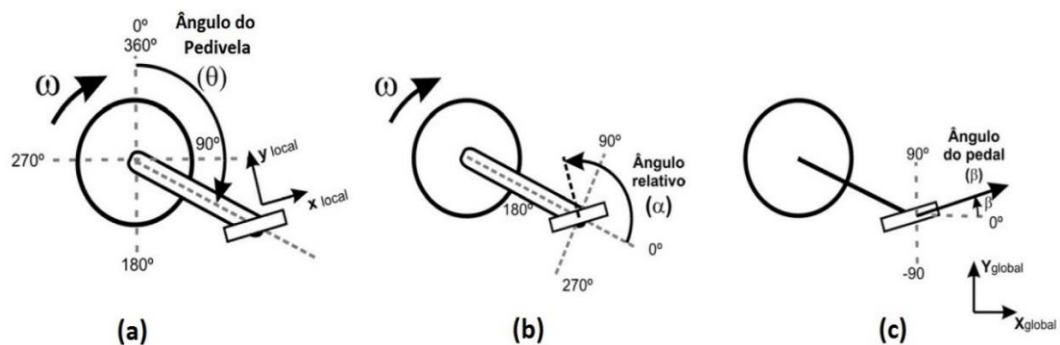
onde  $FE$  é a força efetiva como resultante da decomposição das forças aplicadas, dada em  $[N]$ ,  $Fy^{\perp}$  é a componente de força aplicada ao eixo Y e  $Fx^{\perp}$  é a componente de força aplicada ao eixo X, ambos em  $[N]$ . Para que as forças sejam mensuradas, é importante que cada componente do sistema de eixos coordenados seja coletada e analisada de forma independente. Esta necessidade impulsionou estudos voltados ao formato e geometrias de novos pedais, de modo que as forças permaneçam desacopladas (ALVAREZ; VINYOLAS, 1996; CHUNFU, 2009; GURGEL *et al.*, 2006; LEE *et al.*, 2015). (BOSCH, 2006) cita a necessidade de conhecer as variáveis presentes no ciclismo visando a melhoria do desempenho e a maximização do movimento para participação em competições de alto nível. Segundo (NABINGER, 2006), a medição e o registro das variáveis presentes no ciclismo permite não apenas descrever o movimento, mas também analisá-lo posteriormente. Por serem de natureza temporal e cíclica, estas variáveis podem ser representadas tanto em função do tempo como relativamente em função do ângulo da pedalada e/ou do pedivela. As principais variáveis consideradas na literatura (ALEXANDER *et al.*, 2007; ARFAOUI; BERTUCCI, W. M.; POLIDORI, 2012; BINI; CARPES, 2012; GHARGHAN; NORDIN; ISMAIL, 2015; PIGATTO *et al.*, 2016; SANDERSON, 1991) são:

- a) Cadência: é a frequência do ciclo de pedalada e expressa individualmente cada rotação. Normalmente é expressa em rotações por minuto (RPM), conforme mostra a Equação (2):

$$Cadência_n = \frac{1}{t_n} \times 60 \quad (2)$$

onde  $Cadência_n$  é a cadência no ciclo "n" [RPM] e  $t_n$  é o tempo do ciclo "n" [s];

- b) **Ângulo do Pedivela ( $\theta$ ):** corresponde à posição angular do pedivela durante a pedalada, partindo do ponto morto superior (PMS), considerado como referência ( $0^\circ$ ) – ver Figura 6 (a) como exemplo;
- c) **Ângulo Relativo ( $\alpha$ ):** é o ângulo que relaciona o pedivela com o sistema de coordenadas local do pedal. É utilizado para a decomposição das forças normais e tangenciais do pedal – ver Figura 6 (b);
- d) **Ângulo do Pedal ( $\beta$ ):** este ângulo relaciona o sistema de coordenadas locais do pedal ( $x_{local}$ ,  $y_{local}$  e  $z_{local}$ ) com o sistema de coordenadas globais ( $X_{global}$ ,  $Y_{global}$  e  $Z_{global}$ ). É utilizado para descrever a característica angular da técnica de pedalada do ciclista, como mostra a Figura 6 (c);



**Figura 6 (a) Ângulo do Pedivela; (b) Ângulo Relativo e (c) Ângulo do Pedal (adaptado de NABINGER, 2006).**

- e) Força aplicada sobre o Pedal ( $\vec{F}$ ): é a soma vetorial das componentes de força cartesianas aplicadas sobre o pedal ( $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ ), conforme mostra a Equação (3):

$$\vec{F} = F_x \vec{x} + F_y \vec{y} + F_z \vec{z} \quad (3)$$

em que  $\vec{F}$  é a força vetorial aplicada sobre o pedal, em [N],  $F_x$  é a força tangencial, em [N],  $F_y$  é a força normal, em [N] e  $F_z$  é a força lateral, em [N];

- f) Força Resultante ( $|\vec{F}_r|$ ): é o módulo da força aplicada sobre o pedal ( $\vec{F}$ ), conforme mostra a Equação (4):

$$|\vec{F}_r| = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (4)$$

onde  $|\vec{F}_r|$  é a força resultante aplicada sobre o pedal,  $F_x$  é a força tangencial,  $F_y$  é a força normal e  $F_z$  é a força lateral, todos em [N];

- g) Índice de Efetividade ( $IE$ ): é a razão entre a força aplicada no pedal e a força que foi transmitida para o movimento. Pode ser utilizado como um parâmetro de avaliação para um ciclo completo. É expresso pela Equação (5):

$$IE = \frac{\int F_{efetiva} dt}{\int |F_r| dt} \cong \frac{\sum F_{efetiva}}{\sum |F_r|} \quad (5)$$

em que  $IE$  é o Índice de Efetividade,  $F_{efetiva}$  é a força efetiva aplicada sobre o pedal e  $|F_r|$  é a força resultante, ambos em [N];

- h) Torque ( $T$ ): é a combinação entre a força efetiva aplicada sobre o pedal e o comprimento do pedivela, conforme mostra a Equação (6):

$$T = F_{efetiva} \times L_c \quad (6)$$

sendo  $T$  é o torque transmitido ao sistema de transmissão da bicicleta, em  $[N \cdot m]$ ,  $F_{efetiva}$  é a força transmitida ao movimento, em  $[N]$ , e  $L_c$  é o comprimento do pedivela, em  $[m]$ ;

- i) Trabalho externo realizado pelo ciclista ( $W$ ): é a integral do torque ao longo de um ciclo completo, cuja expressão é dada pela Equação (7):

$$W_n = \int_{\theta=0^\circ}^{\theta=2\pi} T(\theta) d\theta \quad (7)$$

onde  $W_n$  é o trabalho externo realizado para o ciclo  $n$   $[J]$  e  $T(\theta)$  é o torque na posição definida pelo ângulo  $\theta$ ;

- j) Potência Mecânica ( $P$ ): é a relação entre o trabalho externo produzido e o tempo de ciclo, conforme representa a Equação (8):

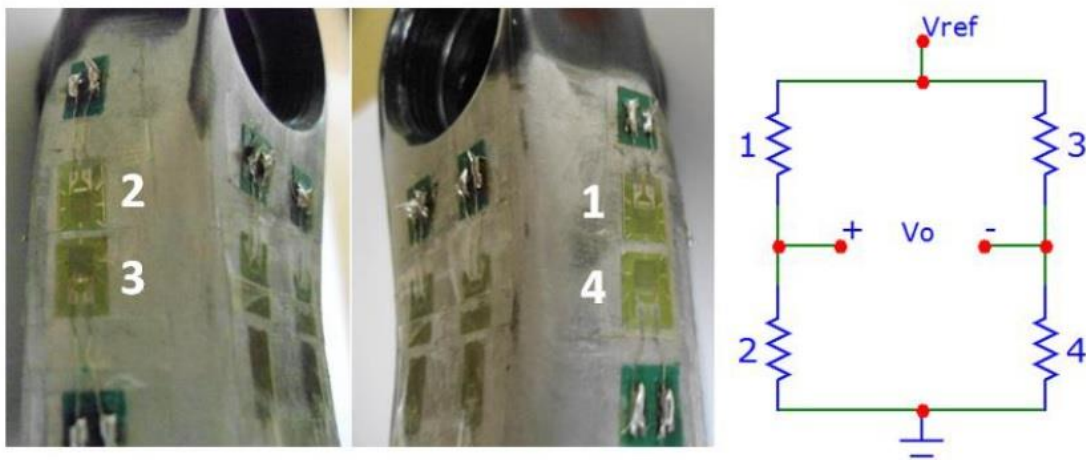
$$P_n = \frac{W}{t_n} \quad (8)$$

sendo  $P_n$  é a potência mecânica produzida no ciclo  $n$ , em  $[W]$ ,  $W$  é o trabalho externo, em  $[J]$  e  $t_n$  é a duração do ciclo, em  $[s]$ .

## 2.2. TRABALHOS RELACIONADOS À EXTENSOMETRIA E AO CICLISMO

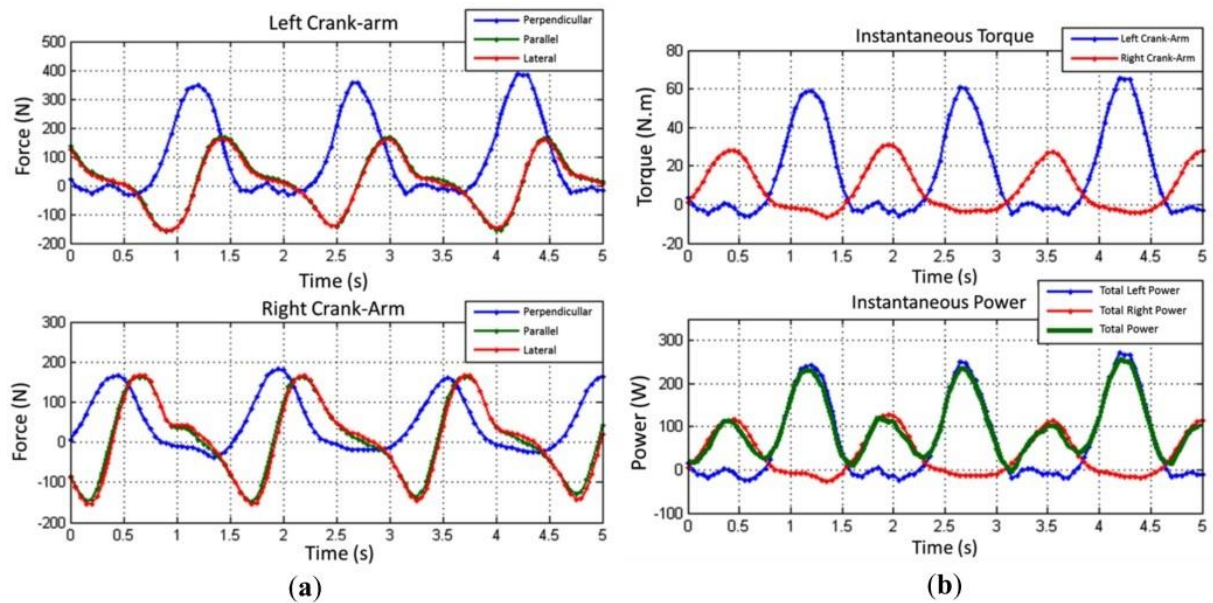
Segundo (GLASKIN, 2012), uma das formas de medir a força aplicada nos pedais, pelo ciclista, é através da medição de deformação mecânica no conjunto de pedivela. A proposta de (BALBINOT; MILANI; NASCIMENTO, 2014) visou a medição de força nos três eixos como proposta para a caracterização da pedalada do ciclista. Sendo assim, projetou-se uma plataforma

de força através de um conjunto de pedivelas instrumentados, os quais realizaram a transmissão dos dados coletados através de um sistema de medição sem fio. Neste caso, optou-se pela utilização de extensômetros em pontes de *Wheatstone* para cada eixo, levando em consideração a disponibilidade de material, área para cimentação, resistência elétrica dos extensômetros, entre outros. A Figura 7 mostra o posicionamento dos extensômetros para medição da deformação mecânica perpendicular.



**Figura 7** Conexão dos extensômetros em configuração de ponte completa: Direção Perpendicular (BALBINOT; MILANI; NASCIMENTO, 2014).

O mesmo procedimento foi adotado para o posicionamento e cimentação dos extensômetros nos eixos lateral e paralelo. Durante o processo de calibração, foi evidenciado um erro de linearidade abaixo de 1%. Por fim, acrescentou-se a etapa de condicionamento dos sinais e, então, foram realizados experimentos tanto em ambiente *indoor* (laboratório com rolo de treinamento) quanto em ambiente *outdoor* (pista de circuito fechado). O resultado do experimento *outdoor* é apresentado na Figura 8 (BALBINOT; MILANI; NASCIMENTO, 2014).

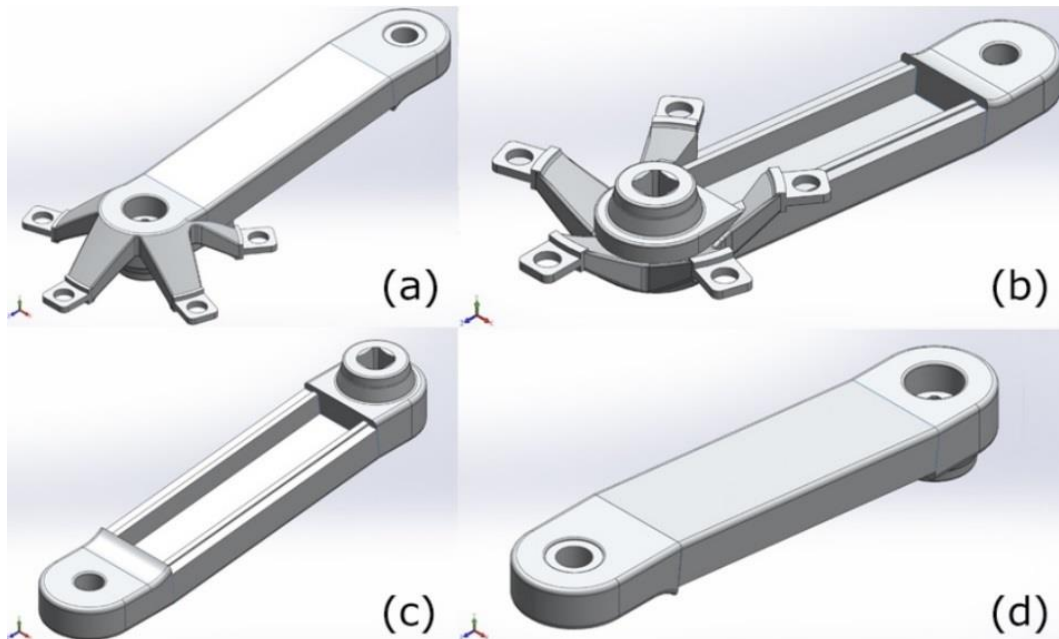


**Figura 8 Resultado do Experimento *Outdoor*, (a) Forças e (b) Torque e Potência Mecânica (BALBINOT; MILANI; NASCIMENTO, 2014).**

A assimetria média entre as forças aplicadas nos pedais esquerdo e direito foi de 51,8%, enquanto que a cadência média ficou em 39,34 RPM, inferior ao resultado *indoor* obtido com o rolo de treinamento. Segundo (SCHMIDT, 2014), as forças de atrito com o terreno e o vento em direção oposta ao movimento influenciam diretamente a cadência da pedalada, uma vez que exigem maior esforço físico por parte do ciclista. Para o intervalo de 5s, a potência mecânica média foi de 98,2W, sendo 64,2W produzidos pela perna esquerda e 34,0W produzidos pela perna direita. A sobreposição dos gráficos permitiu a clara visualização da defasagem de 180° existente entre cada pedal, bem como, os pontos de transição entre as fases de propulsão e recuperação, mencionadas anteriormente (BALBINOT; MILANI; NASCIMENTO, 2014).

De forma complementar, (PIGATTO *et al.*, 2016) propôs uma geometria específica para o pedivela, visando tanto o desacoplamento das forças aplicadas ao conjunto quanto a alocação do circuito de condicionamento, comumente posicionado externamente. Para o lado que possui a coroa, o projeto foi criado respeitando as dimensões da peça original da bicicleta, buscando apenas criar a área necessária para cimentação dos extensômetros e posicionamento da placa

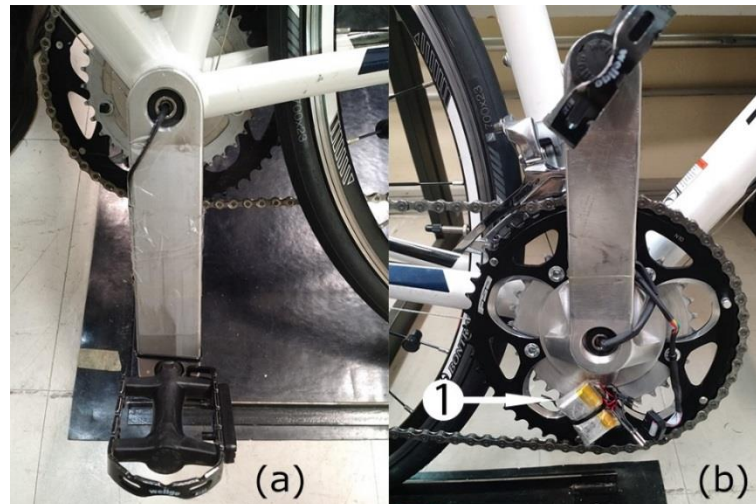
de circuito impresso contendo o circuito de condicionamento. A Figura 9 apresenta o modelo 3D dos pedivelas.



**Figura 9 Modelo 3D dos pedivelas, (a) Pedivela direito vista superior, (b) Pedivela direito vista inferior, (c) Pedivela esquerdo vista inferior e (d) Pedivela esquerdo vista superior (PIGATTO *et al.*, 2016).**

Para adquirir e armazenar os dados dos seis canais do circuito de condicionamento de sinais, foi utilizada uma plataforma de desenvolvimento Arduino Pro Mini (Arduino, 2015) e um *datalogger* externo com cartão de memória SD. Cada canal foi conectado à uma entrada analógica de um microcontrolador e os dados foram coletados periodicamente, sendo, ao término da aquisição, enviados para o *datalogger*. Em seguida foi utilizado um *script* no Matlab 2013 para converter as medições digitais de tensão elétrica em valores de força, cadência, torque, simetria e potência mecânica em função do tempo para um determinado segmento de medições realizadas. A Figura 10 mostra uma foto do sistema de medição montado na bicicleta (PIGATTO *et al.*, 2016).



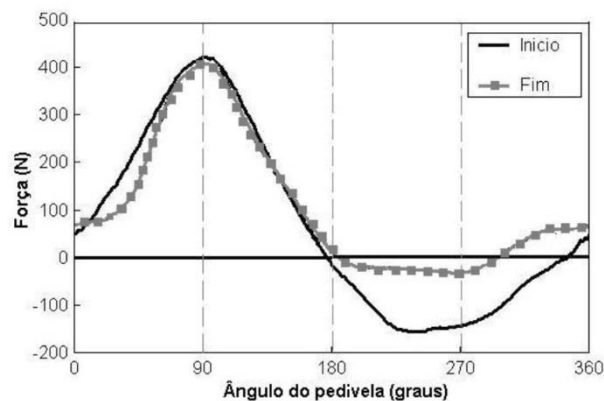


**Figura 10 Foto do Sistema de Medição, (a) Pedivela Esquerdo, (b) Pedivela Direito: (1) Baterias (PIGATTO *et al.*, 2016).**

Com o auxílio de cinco ciclistas amadores, todos do sexo masculino, com idades de  $26 \pm 3$  anos e  $80 \pm 6$ kg de massa, realizou-se 50 repetições com duração de 60s cada, para obtenção dos dados a serem analisados. Cada voluntário foi responsável por 10 repetições onde, através dos dados obtidos, foi possível analisar a simetria da força resultante (soma vetorial das forças paralela, lateral e perpendicular) dos pedais direito e esquerdo. Foi observada uma média resultante de força de  $167,2 \pm 18,97N$  para a perna esquerda e  $163,4 \pm 15,27N$  para a perna direita, enquanto que a média da força efetiva foi  $87,73 \pm 15,45N$  para a perna esquerda e  $35,21 \pm 11,06N$  para a perna direita. A cadência média foi  $56,9 \pm 10,47$  RPM e a potência mecânica total média foi  $125,7 \pm 22,1W$ , sendo  $90,15 \pm 17,09W$  aplicada no pedal esquerdo e  $35,21 \pm 8,576W$  aplicado no pedal direito, representando uma assimetria bilateral de  $59,80 \pm 10,51\%$ . O experimento foi avaliado com base em um Projeto de Experimentos do Tipo Fatorial Completo onde os resultados mostraram que a assimetria não sofre variações significativas somente entre voluntários, mas também entre repetições de uma mesma pessoa (PIGATTO *et al.*, 2016).

Em outra abordagem, (CARPES *et al.*, 2005) utilizou pedais instrumentados com extensômetros para monitorar as componentes normal e tangencial da força aplicada por um

voluntário, além de equipamentos para monitoramento de parâmetros biológicos como consumo de oxigênio ( $VO_2$ ) e frequência cardíaca. O sujeito em questão foi um atleta profissional e o experimento consistiu em analisar o comportamento das forças aplicadas nos pedais ao longo de uma prova simulada de 40km. Relacionando estas variáveis, verificou-se um aumento do consumo de oxigênio ao longo da prova, o que reflete a tática do ciclista em manter um ritmo médio, ao mesmo tempo que as forças aplicadas nos pedais foram reduzindo ao longo da prova. O comportamento da força ao longo do tempo possibilitou compreender a técnica de pedalada, como mostrado na Figura 11, onde se observou a estratégia de “puxar” o pedal na fase de recuperação, reduzindo a força resistiva no terceiro quadrante e tornando-a propulsiva no quarto quadrante.

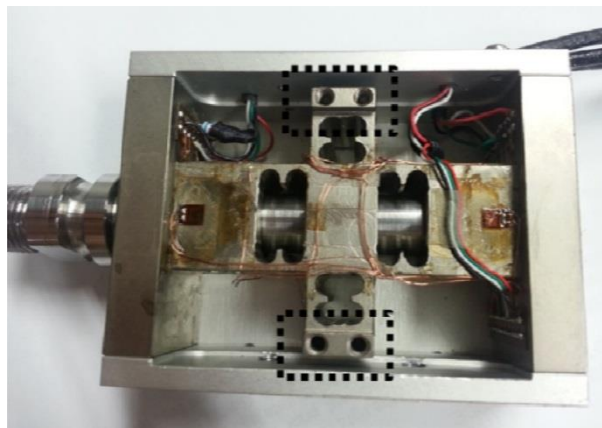


**Figura 11 Comparação entre as forças efetivas no início e no fim de 40km de pedalada (CARPES *et al.*, 2005).**

Para que as análises anteriormente apresentadas possam ser feitas, os projetos na área de Instrumentação devem compreender sistemas que favoreçam as medições nas células de carga. Baseado nessa premissa, o trabalho de (ITURRIOZ; NABINGER; ZARO, 2002) propôs células de carga com geometria específica e dedicada, tendo em vista as principais características desejadas em uma plataforma de força: alta sensibilidade; frequência natural de ressonância alta em relação ao fenômeno que se deseja mensurar; desacoplamento das componentes de força e momento, e independência aos fatores externos como temperatura, por

exemplo. De forma equivalente ao método proposto nesta dissertação, a validação da estrutura ocorreu através do método dos elementos finitos, com a aplicação virtual de vários módulos de força nas direções de interesse (perpendicular, lateral e paralela), com a observação da deformação mecânica na direção principal, assim como, a propagação das forças nos demais eixos. O resultado das simulações permitiu a criação de uma matriz de calibração, a qual possibilitou o cálculo das forças aplicadas em qualquer direção da célula de carga (ITURRIOZ; NABINGER; ZARO, 2002).

No sistema proposto por (LEE *et al.*, 2015), o pedal foi projetado visando adequar internamente os extensômetros, além de maximizar a deformação mecânica em cada eixo através da fragilização da estrutura. Os autores verificaram, no sistema proposto, um erro de linearidade de 0,5%, além de uma sensibilidade de 0,6 a 1mV/V. A Figura 12 apresenta a célula de carga proposta por (LEE *et al.*, 2015) e utilizada nos seus experimentos.



**Figura 12 Pedal para Medição de Força Tridimensional (LEE *et al.*, 2015).**

O trabalho proposto por (ALEXANDER *et al.*, 2007) sugeriu a comparação entre os dados obtidos pelo seu sistema, um pedal instrumentado específico denominado CycPed, e dois sistemas comerciais: *SRM Powermeter* (Schoberer Rad Messtechnik SRM GmbH, 2016) e *PowerForce* (O-Tec, 2016). Para possibilitar a comparação, as forças tangenciais e radiais foram calculadas com base nos dados obtidos para cada eixo do pedal, conforme mostram as Equações (9) e (10):

$$F_{T_X} = F_X \cdot \cos(PA) \quad (9)$$

$$F_{T_Z} = F_Z \cdot \text{sen}(PA) \quad (10)$$

sendo  $F_{T_X}$  e  $F_{T_Z}$  as forças tangenciais das componentes X e Z do CycPed, dadas em [N],  $F_X$  e  $F_Z$  são as componentes de força dos eixos X e Z, respectivamente, dadas em [N], e  $PA$  é o ângulo do pedal. Considerando que  $F_{T_Z}$  é negativo durante a fase da “pisada”, multiplicou-se este fator por -1. Com isto, a força tangencial total foi obtida através da soma vetorial destes dois fatores, conforme mostra a Equação (11):

$$F_{T_{CycPed}} = F_{T_X} + F_{T_Z} \quad (11)$$

As forças radiais foram calculadas apenas trocando o seno pelo cosseno nas Equações (9) e (10). O torque gerado pelos dois pedais foi calculado através da Equação (12):

$$T = (F_{T_{right}} + F_{T_{left}}) \cdot L \quad (12)$$

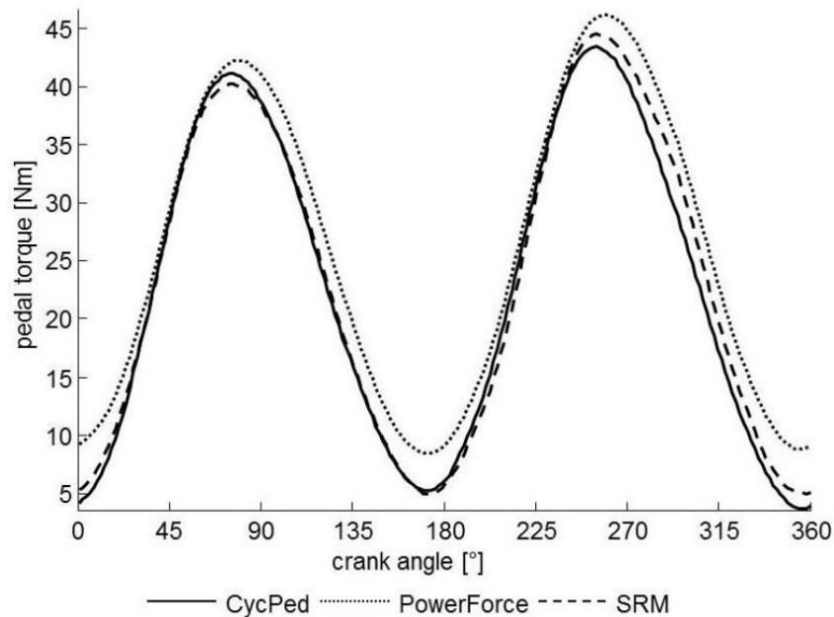
em que  $T$  é o torque total, considerando os pedais direito e esquerdo, em [N.m],  $F_{T_{right}}$  e  $F_{T_{left}}$  são as forças tangencias dos pedais direito e esquerdo, respectivamente, dados em [N] e  $L$  é a distância entre o eixo do pedivela e o eixo do pedal, em [m]. A velocidade angular de rotação do pedivela pode ser associado diretamente com a cadência da pedalada, através da Equação (13):

$$\omega = \frac{CAD \cdot 2\pi}{60} \quad (13)$$

sendo  $\omega$  a velocidade angular de rotação do pedivela, em [rad/s] e  $CAD$  é a cadência da pedalada, dada em [RPM]. Por fim, a potência mecânica foi calculada considerando-se uma revolução do pedivela, como mostrado na Equação (14):

$$P = T \cdot \omega \quad (14)$$

onde  $P$  é a potência mecânica expressa em  $[W]$ ,  $T$  é o torque total considerando os pedais direito e esquerdo, dado em  $[N.m]$ , e  $\omega$  é a velocidade angular de rotação do pedivela, em  $[rad/s]$ . Considerando-se um sujeito produzindo uma potência mecânica de 200W e 70 RPM, a Figura 13 apresenta o comparativo entre os três sistemas (ALEXANDER *et al.*, 2007).



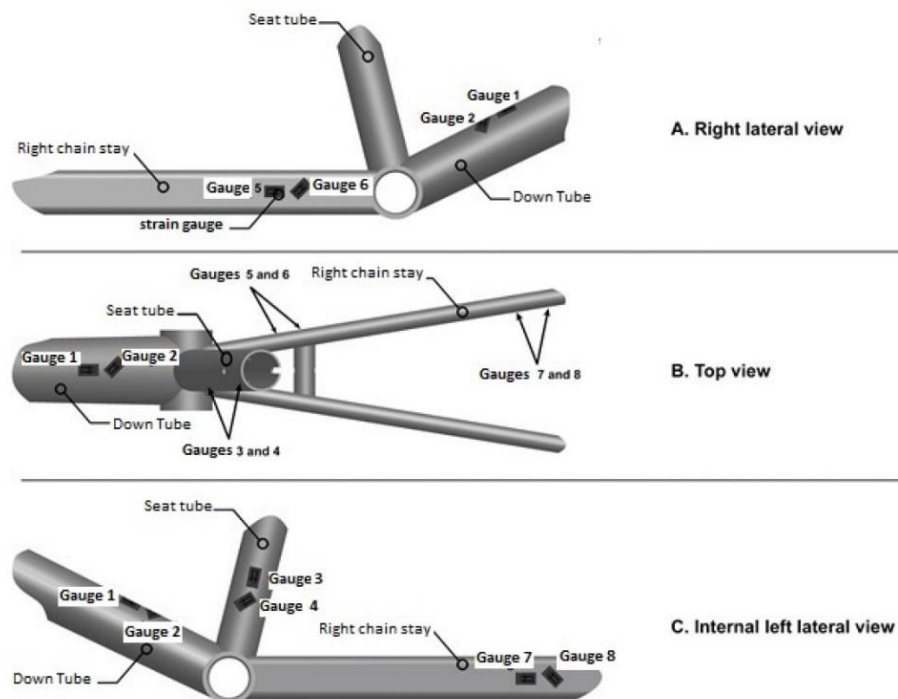
**Figura 13 Comparativo entre o torque mensurado no CycPed, PowerForce e SRM**

(ALEXANDER *et al.*, 2007).

No trabalho de (ALEXANDER *et al.*, 2007), o cálculo da potência mecânica foi realizado considerando-se a média das 30 revoluções do pedivela. Observou-se que as grandezas obtidas com o CycPed estão de acordo com os dados coletados com o SRM *Powermeter* (Schoberer Rad Messtechnik SRM GmbH, 2016), sendo que o desvio percentual foi menor que 3% em praticamente toda faixa considerada, exceto para a condição de 150W e 100 RPM. Estes resultados mostraram que os dados obtidos através da medição com extensômetros nos três eixos podem, de fato, ser utilizados para a projeção das forças tangenciais e radiais que, por sua vez, remetem aos valores de torque e potência mecânica.

Embora muitos trabalhos na área de instrumentação optem por medir deformação mecânica nos pedais e pedivelas, em (MANOLOVA *et al.*, 2015) a medição foi realizada no

quadro de uma bicicleta para competições BMX, em pontos próximos à coroa e ao cubo. O objetivo foi analisar a influência da força aplicada sobre os pedais em relação ao quadro da bicicleta. Os pedais foram instrumentados para medições em três dimensões e a frequência de aquisição da força foi de 250Hz (Sensix, 2015). Para os experimentos, foram propostas duas condições para análise: a primeira consistiu na aplicação de força estática sobre o pedal direito, onde o sujeito permaneceu de pé com carga máxima sobre a estrutura, e a segunda correspondeu à três *sprints* de pedalada com potências mecânicas de 100, 300 e 550W sobre um sistema de treinamento. O monitoramento da cadência e da potência mecânica foi realizado pelo instrumento *BMX Powermeter* (Schoberer Rad Messtechnik SRM GmbH, 2016). Neste trabalho, os autores também utilizaram os resultados da simulação por elementos finitos para caracterização dos pontos para cimentação dos extensômetros, cujo posicionamento foi feito aos pares para medição de tração/compressão (paralelo a cada eixo) e momento de força (45° em relação a cada eixo). O posicionamento destes sensores está apresentado na Figura 14.



**Figura 14** Posicionamento dos extensômetros, (a) Vista Lateral Direita, (b) Vista Superior e (c) Vista Interna da Lateral Esquerda (MANOLOVA *et al.*, 2015).

Para análise estática, utilizou-se a matriz de correlação de coeficientes de Pearson para determinar a significância entre os picos de força no pedal direito, potência mecânica de saída e picos de deformação mecânica. A matriz foi calculada com auxílio do *software* Statistica 7.1 (StatSoft, 2015) utilizando um nível de significância  $p < 0,5$ . Os extensômetros 2, 5, 7 e 8 sofreram compressão, enquanto que os extensômetros 1, 3 e 6 mediram tração, sendo as maiores deformações observadas nos extensômetros 3, 1 e 7 com módulos de 468, 185 e 180 $\mu\text{m}/\text{m}$ , respectivamente. A matriz de correlação de Pearson mostrou que as componentes de força do pedal estão significativamente correlacionadas com a deformação no quadro da bicicleta para quase todos os indicadores. Não foi observada correlação com o extensômetro 1, entre a componente de força do eixo Z (perpendicular) do pedal e a deformação no extensômetro 5, e entre a potência mecânica de saída e a deformação no extensômetro 8 (MANOLOVA *et al.*, 2015).

### 3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O Capítulo 3 apresenta em detalhes o desenvolvimento do projeto, a construção da célula de carga, as simulações realizadas, o circuito referente ao condicionamento dos sinais e a forma com que cada parte do projeto interage com as demais. A Figura 15 apresenta o diagrama geral do sistema.

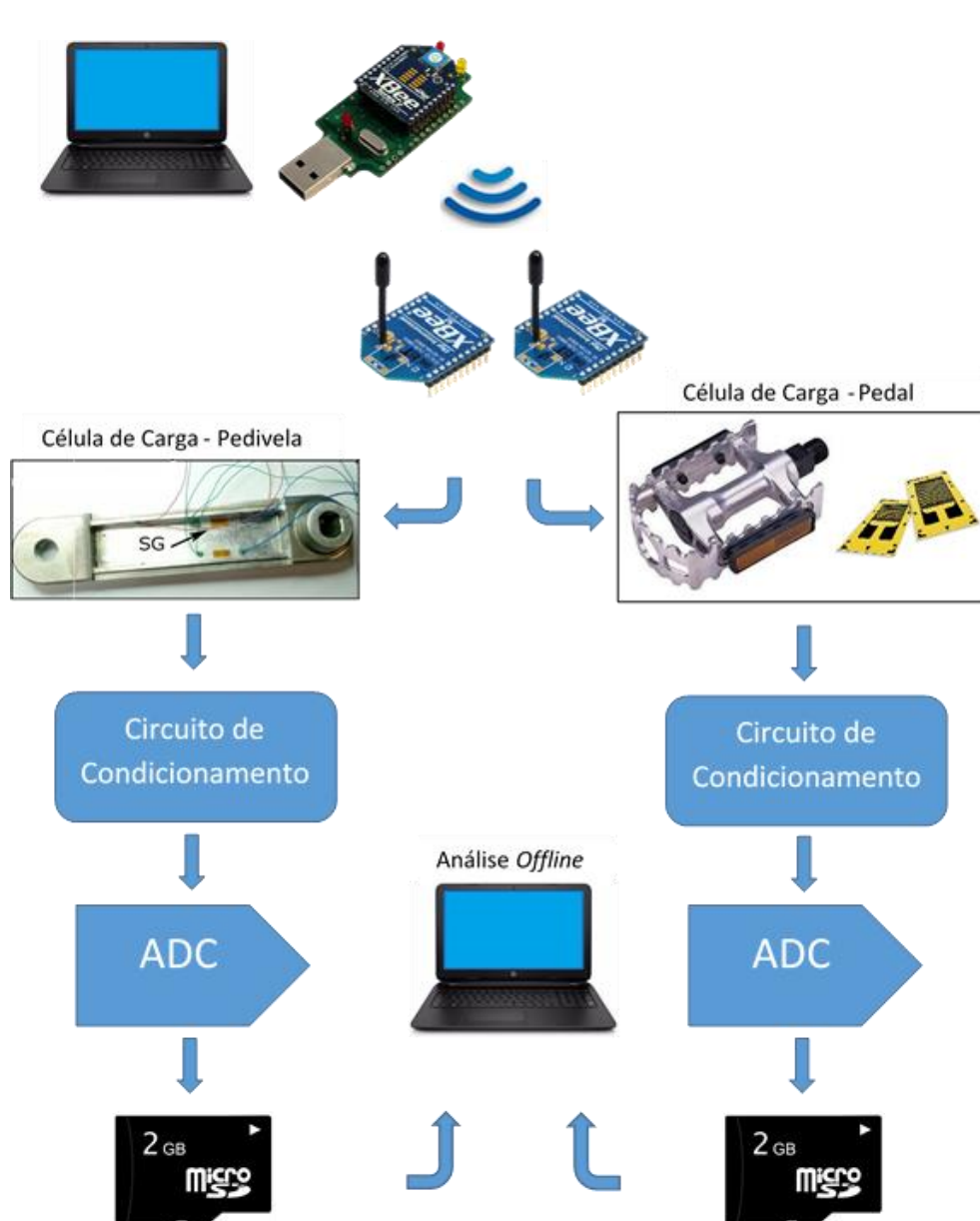


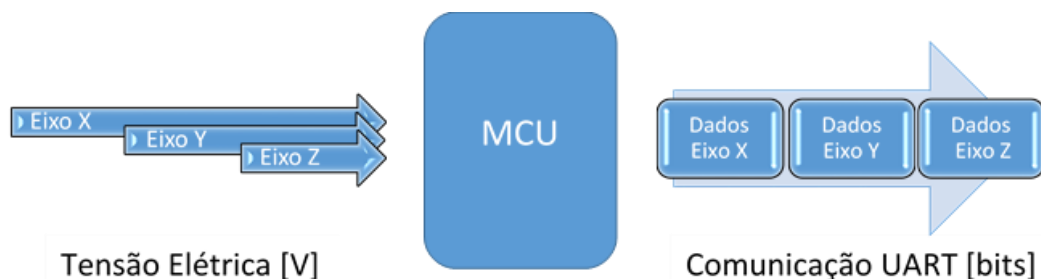
Figura 15 Diagrama Geral do Sistema.

O sistema proposto tem por função medir as forças aplicadas pelo ciclista em dois locais distintos: pedivelas e pedais. Tem-se, portanto, quatro células de carga (dois pedivelas e dois



pedais) para análise. As células de carga denominadas “pedivela” foram projetadas por (PIGATTO *et al.*, 2016), assim como, o circuito de condicionamento que está alocado internamente na estrutura. As demais células de carga são compostas por pedais de Alumínio 9/16 FP-961 PTA onde foram cimentados extensômetros do tipo folha. Para medir a deformação mecânica em cada eixo, optou-se pela utilização de quatro elementos ativos nas pontes de *Wheatstone*, totalizando 12 extensômetros ativos por célula de carga e resultando em três pontes completas por pedal.

Como cada ponte possui uma sensibilidade de  $\mu V/V$ , a etapa de amplificação foi desenvolvida em quatro estágios visando a minimização dos ruídos elétricos. De forma complementar, acrescentou-se um filtro ativo ao condicionamento, responsável pelo bloqueio de frequências e picos indesejados. Por fim, um circuito somador ajusta o *offset* do sinal, tornando-o apto para a aquisição A/D, onde cada célula de carga possui um microcontrolador responsável pela multiplexação e aquisição dos sinais de três eixos (perpendicular, lateral e paralelo) para posterior armazenamento em *dataloggers* locais e presentes em cada circuito de condicionamento do sistema, conforme mostra a Figura 16.



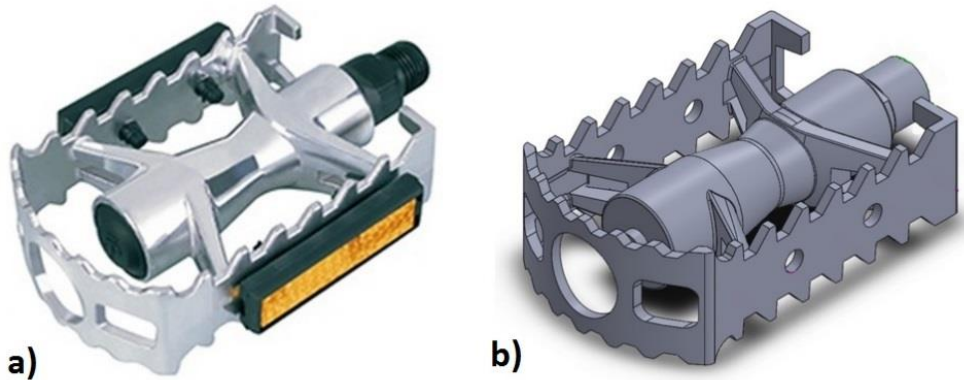
**Figura 16 Bloco Expandido das Aquisições A/D e Comunicação com o Datalogger.**

Devido à limitação imposta por um sistema mecânico que gira e está constantemente em movimento, cada célula de carga foi projetada com seu circuito de condicionamento e armazenamento de dados independente, ou seja, não foi feita interligação por fios entre subsistemas. No entanto, para que os dados pudessem ser corretamente coletados, foi imprescindível que houvesse um sincronismo entre todos os pontos de aquisição de dados, o

qual foi obtido utilizando-se um módulo *XBEE S1* conectado ao computador e responsável por enviar sinais em *broadcast* a todos os elementos do sistema visando determinar o exato momento em que cada módulo deveria iniciar/parar suas coletas de dados. A análise dos dados é realizada posteriormente com auxílio de uma ferramenta computacional e os resultados encontram-se no Capítulo 4.

### 3.1. PROJETO DA CÉLULA DE CARGA

Como premissa de projeto, optou-se pela adequação de pedais utilizados em alguns sistemas comerciais já disponíveis ao invés de usinar uma estrutura própria para realização dos experimentos. As implicações experimentais desta escolha foram discutidas no Capítulo 4, após a apresentação dos resultados obtidos nos ensaios. A Figura 17 apresenta o modelo de pedal considerado nesta dissertação.



**Figura 17 Pedal MTB Alumínio 9/16 FP-961 PTA (Adaptado de Feimin, 2016): a) Foto real; b) Modelo Virtual criado no SolidWorks 2015.**

Para as etapas experimentais, foram retirados os sinaleiros de plástico e os furos sobressalentes das laterais foram utilizados para a passagem dos fios dos extensômetros. As dimensões da peça foram obtidas com auxílio de um paquímetro digital da marca Mitutoyo com as características apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1 Especificações Técnicas do Paquímetro Mitutoyo 500-713-20.**

Paquímetro Digital	
Marca	Mitutoyo
Modelo	500-713-20
Fundo de Escala	200mm
Resolução	0,01mm
Exatidão	$\pm 0,02\text{mm}$
Repetibilidade	0,01mm

FONTE: Adaptado do *datasheet* da Mitutoyo America, 2016.

### 3.1.1 Procedimento para Análise da Célula de Carga Baseada na Simulação Estrutural

O objetivo principal desta análise é verificar os pontos onde ocorrem as maiores deformações mecânicas para a carga aplicada e, com isto, encontrar os melhores pontos para posicionamento dos extensômetros. Todo o procedimento de simulação foi realizado utilizando a ferramenta SolidWorks 2015. A Tabela 2 apresenta as especificações técnicas da liga de Alumínio utilizada no pedal.

**Tabela 2 Especificações Técnicas do Alumínio 6061 T6.**

Alumínio 6061 T6 - Especificações Técnicas	
Peso Específico	2,71 g/cm <sup>3</sup>
Módulo de Elasticidade	70000 MPa
Módulo de Rigidez	26500 MPa
Temperatura de Fusão	580 - 650°C
Coefficiente de Expansão Linear	24E-6 L/°C
Condutibilidade Térmica (25°C)	0,37 Cal/cm °C

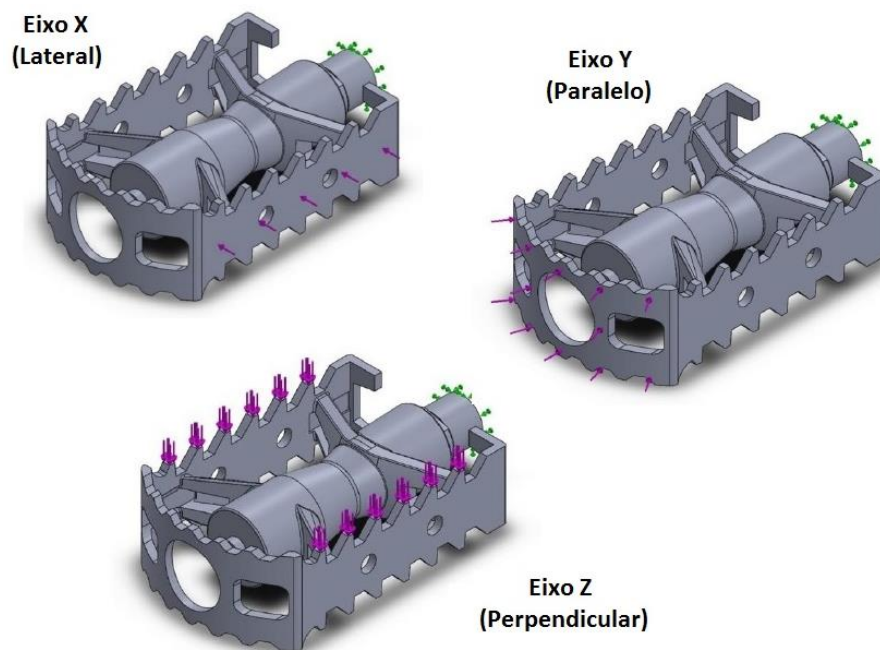
FONTE: Adaptado do *datasheet* da Alumaticopper, 2016.

Primeiramente, foram definidos os eixos para aplicação das forças. O eixo denominado perpendicular é o responsável por suportar a maior carga durante a pedalada, portanto, possui maior módulo na distribuição de forças. Segundo (HULL; NEPTUNE; SMAK, 1999), a carga máxima aplicada na direção perpendicular (Eixo Z), dificilmente transcende o peso do ciclista,

da mesma forma que, para os eixos lateral (Eixo X) e paralelo (Eixo Y), não ultrapassam a metade desta mesma referência. Com isto, optou-se pela aplicação de cargas de acordo com a Tabela 3, enquanto que a Figura 18 apresenta os três eixos mencionados e o ponto de engaste da célula de carga.

**Tabela 3 Carga Máxima Aplicada em cada Eixo dos Pedais.**

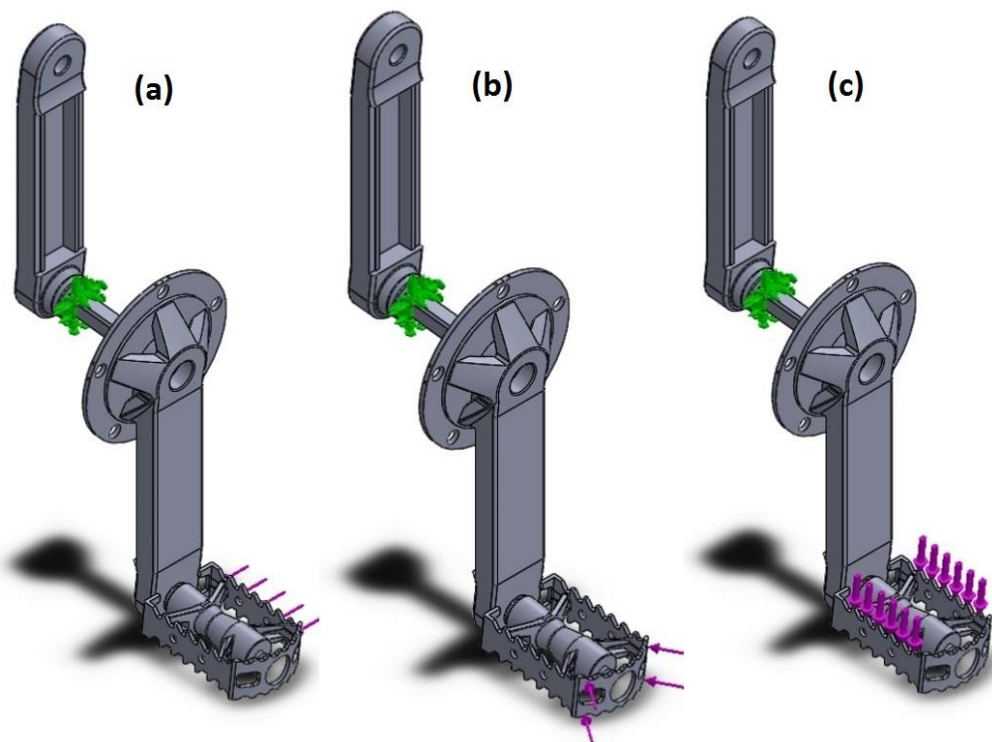
Simulação Virtual dos Pedais	
Eixo	Carga Máxima
Perpendicular - Z	735,75N
Lateral - X	735,75N
Paralelo - Y	343,35N



**Figura 18 Simulação considerando aplicação de forças nos três eixos de interesse do pedal.**

De acordo com a Figura 18 é possível visualizar que a força aplicada no eixo Y (Paralelo) acopla mecanicamente uma parcela de forças ao eixo X (Lateral), justamente pelo seu formato em curva, inerente ao modelo de pedal escolhido. No entanto, a força no eixo paralelo não representa uma força efetiva ao movimento (ARFAOUI; BERTUCCI, W. M.; POLIDORI, 2012), pois está direcionada contra o ponto de engaste do pedal, o que faz com que

seu módulo seja o de menor representação entre os eixos considerados. Em um modelo ideal, o engaste do pedal individual seria o suficiente para o entendimento e análise da deformação mecânica proveniente da pedalada. No entanto, a aplicação de força resulta na deformação elástica de todo o conjunto pedal-pedivela. Isto justifica a necessidade de analisar, também, o conjunto completo em busca do melhor entendimento relacionado à distribuição de forças. Da mesma forma como no pedal individual, realizou-se a simulação mediante aplicação de forças em três direções, conforme mostra a Figura 19.



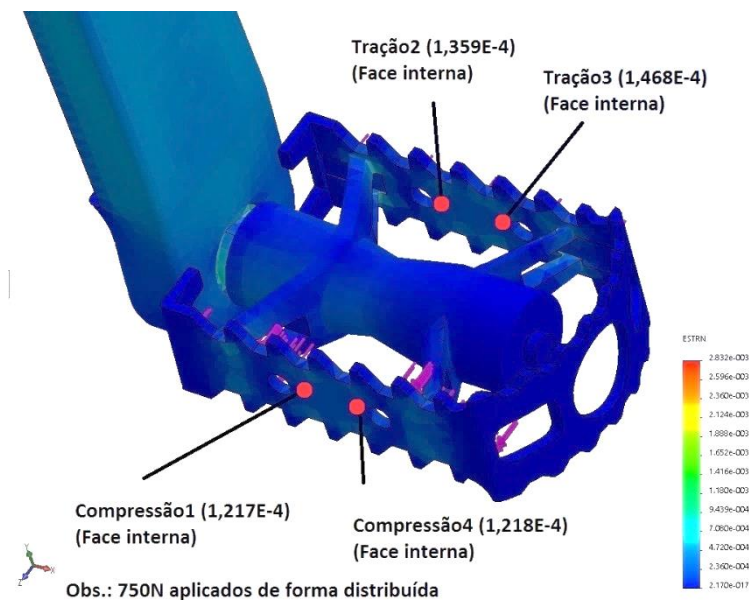
**Figura 19 Simulação do conjunto pedal-pedivela: (a) Eixo Lateral (X); (b) Eixo Paralelo (Y); (c) Eixo Perpendicular (Z).**

Neste caso, o ponto de engaste do conjunto passa a ser o eixo central que une o pedivela ao quadro da bicicleta. Percebe-se, ainda, que a deformação mecânica que antes considerava apenas o pedal, afeta todo o sistema onde o mesmo encontra-se fixado, como o pedivela, a coroa da bicicleta e o próprio eixo central. Esta condição aproxima a simulação de uma situação experimental, de forma que a deformação mecânica possa ser medida em todos os quatro pontos de interesse onde encontram-se as células de carga projetadas. Com isto, finalizou-se a etapa

de simulação, a qual serviu de base para estudo da estrutura, e partiu-se para a etapa de análise, posicionamento e cimentação dos extensômetros.

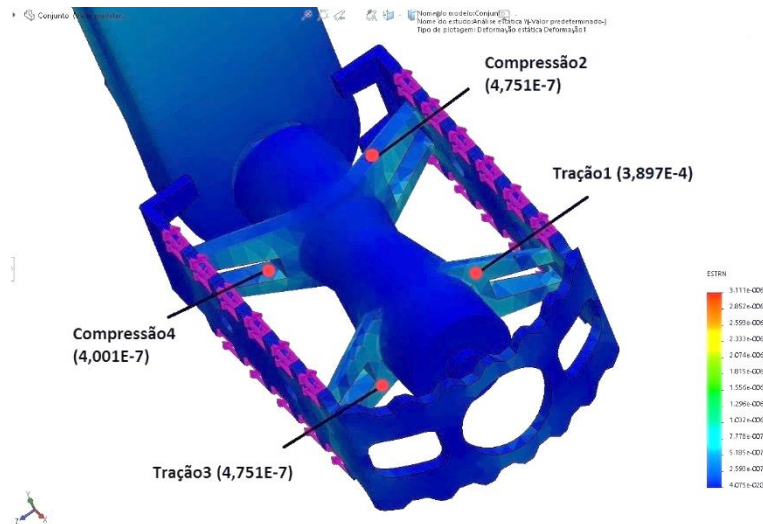
### 3.1.2 Definição e Posicionamento dos Extensômetros

Com base na análise da simulação realizada, descobriu-se os pontos de maior deformação mecânica para cimentação dos extensômetros. A Figura 20 apresenta o posicionamento dos extensômetros referentes à medição de deformações mecânicas no Eixo X (lateral).



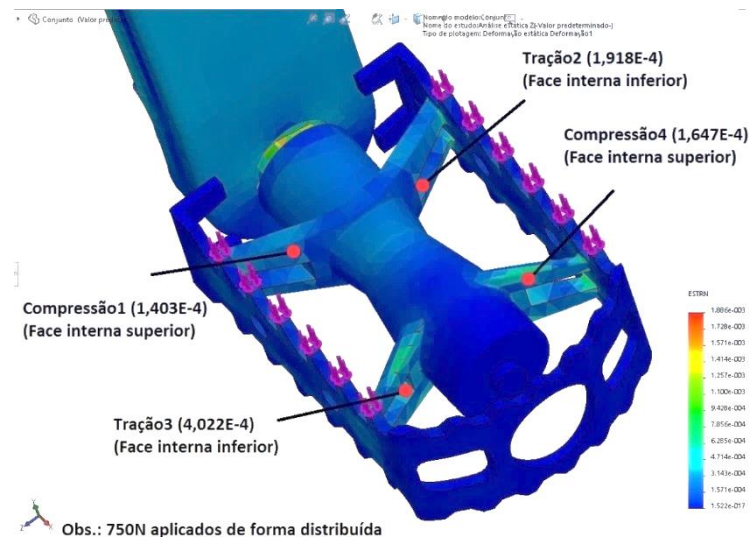
**Figura 20 Modelo simulado apresentando o posicionamento dos extensômetros para deformações no Eixo Lateral (X).**

Considerando a direção em que as forças são aplicadas, dois extensômetros sofrem compressão e outros dois são tracionados. Desta forma, optou-se pela construção de pontes completas de modo a maximizar a amplitude dos sinais elétricos, minimizar os efeitos da temperatura e gerar o maior desbalanço possível nas pontes de *Wheatstone*. A Figura 21 apresenta o posicionamento dos extensômetros para o Eixo Y, correspondente à incidência de forças paralelas.



**Figura 21** Modelo simulado apresentando o posicionamento dos extensômetros para deformações no Eixo Paralelo (Y).

Nesta direção, o formato da peça indica a possibilidade de acoplamento de forças com os demais eixos, visto que os extensômetros não estão simetricamente posicionados em relação ao eixo em questão. A verificação desta hipótese pode ser vista no próximo capítulo, através dos resultados dos ensaios experimentais. Por fim, a Figura 22 apresenta o posicionamento dos extensômetros para medições de deformação no Eixo Z, perpendicular.



**Figura 22** Modelo simulado apresentando o posicionamento dos extensômetros para deformações no Eixo (Z).



Com o posicionamento dos extensômetros definido, utilizou-se o paquímetro para marcação das áreas a serem preparadas para a cimentação, de acordo com todas as regras e cuidados sugeridos por (HOFFMANN, 2012), e divulgados pelo fabricante dos extensômetros (HBM, 2016). Os extensômetros utilizados no projeto são todos de um mesmo modelo, cujas características encontram-se na Tabela 4.

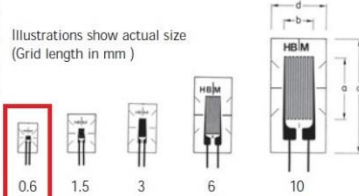
**Tabela 4 Especificações Técnicas do Extensômetro HBM 1-LY13-0.6/120.**

Extensômetro HBM modelo 1-LY13-0.6/120	
Lote	A903/10
Resistência Elétrica	120Ω ± 1,00%
Fator Gage	1,76 ± 1,5%
Sensibilidade Transversal	0,7%
Compensação de Temperatura	Alumínio ( $\alpha=23,0 [10E-6 / K]$ )
Coefficiente de Temperatura do Fator Gage	101 ± 10 [10E-6/K]

FONTE: Catálogo de extensômetros da HBM, 2015.

As dimensões físicas e mais alguns dados técnicos destes extensômetros estão disponíveis no catálogo do fabricante, conforme mostra a Figura 23.

## SG / Y series with 1 measuring grid / linear strain gages

Stock types	Variants	No- minal resis- tance	Dimensions (mm) [1 inch = 25.4 mm]				Max. perm. effective bridge excitation voltage	Solder terminals		
			Measuring grid		Measuring grid carrier					
Steel	Aluminum	Others	Ω	a	b	c	d	V		
1-LY11-0.6/120	1-LY13-0.6/120	1-LY1x-0.6/120#	120	0.6	1	5	3.2	1.5	LS 7	<b>LY11</b> Linear strain gage Temperature response matched to steel with $\alpha = 10.8 \cdot 10^{-6}/K$
1-LY11-1.5/120	1-LY13-1.5/120	1-LY1x-1.5/120	120	1.5	1.2	6.5	4.7	2.5	LS 7	<b>LY13</b> Temperature response matched to aluminum with $\alpha = 23 \cdot 10^{-6}/K$
1-LY11-3/120	1-LY13-3/120	1-LY1x-3/120	120	3	1.4	8.5	4.5	4	LS 7	<b>LY1x</b> Temperature response matching at customer's choice, see page 20
1-LY11-3/120A		1-LY1x-3/120A	120	3	1.4	8.5	4.5	4	LS 7	Illustrations show actual size. (Grid length in mm)
1-LY11-6/120	1-LY13-6/120	1-LY1x-6/120	120	6	2.8	13	6	8	LS 5	
1-LY11-6/120A		1-LY1x-6/120A	120	6	2.8	13	6	8	LS 5	
1-LY11-10/120	1-LY13-10/120	1-LY1x-10/120	120	10	4.9	18.5	9.5	13	LS 5	
1-LY11-10/120A		1-LY1x-10/120A	120	10	4.9	18.5	9.5	13	LS 5	
1-LY11-1.5/350	1-LY13-1.5/350	1-LY1x-1.5/350#	350	1.5	1.2	5.7	4.7	4.5	LS 7	
1-LY11-3/350	1-LY13-3/350	1-LY1x-3/350	350	3	1.5	8.5	4.5	7	LS 7	

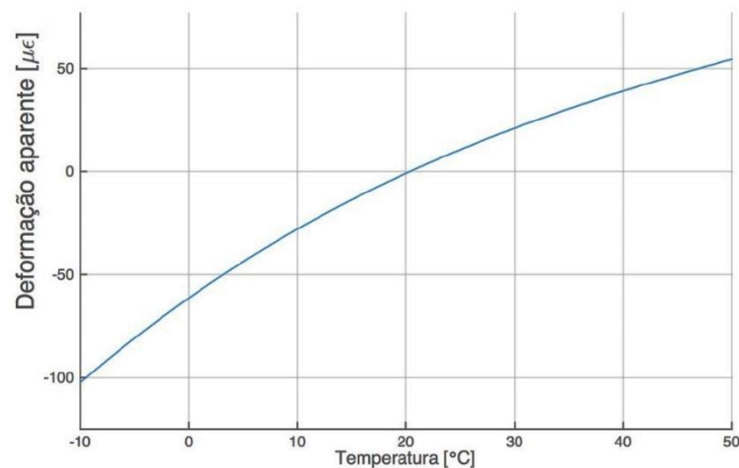
**Figura 23 Dimensões físicas dos extensômetros utilizados no trabalho (adaptado do catálogo de extensômetros da HBM, 2015).**



Foram necessários extensômetros com dimensões reduzidos devido à pequena área disponível para cimentação. Além destas informações, o fabricante (HBM, 2016) disponibiliza a deformação aparente do extensômetro em função da temperatura, a qual pode ser calculada de acordo com a Equação (15):

$$\begin{aligned} \varepsilon_s(T) = & -61,40 + 3,71.T - 3,84.10^{-2}.T^2 + 2,11.10^{-4}.T^3 \pm (T - 20).0,30 \\ & + 0,05.L.(T - 20) \end{aligned} \quad (15)$$

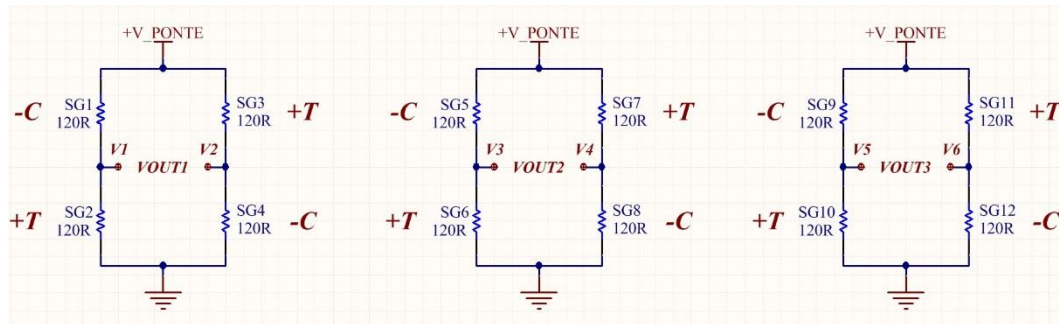
onde  $\varepsilon_s$  é a deformação aparente, em  $[\mu\varepsilon]$ ,  $T$  é a temperatura de operação, em  $[\text{°C}]$ ,  $L$  é o comprimento dos terminais de solda do extensômetro, em  $[m]$ . A Figura 24 apresenta graficamente o comportamento da deformação aparente.



**Figura 24 Deformação Aparente do Extensômetro versus Temperatura (adaptado de HBM, 2015).**

A relação da deformação aparente, da Figura 24, mostra que a temperatura é uma variável a ser considerada na aplicação, visto que pode influenciar os resultados experimentais. A deformação aparente na faixa entre  $-10^{\circ}\text{C}$  e  $50^{\circ}\text{C}$  (com um *span* aproximado de  $150\mu\varepsilon$ ), corresponde, aproximadamente, ao fundo de escala da aplicação proposta, ou seja, uma fonte considerável de variabilidade. A utilização de pontes completas é uma das formas de minimizar os efeitos provenientes destas variações. A Figura 25 apresenta a configuração das pontes de *Wheatstone* utilizadas para cada eixo das células de carga (configuração utilizada de forma

idêntica nos pedais), onde “-C” faz menção à deformação mecânica de compressão (negativa) e “+T” identifica a deformação mecânica de tração (positiva). Esta configuração possibilita o maior fundo de escala possível para o sinal proveniente dos extensômetros.



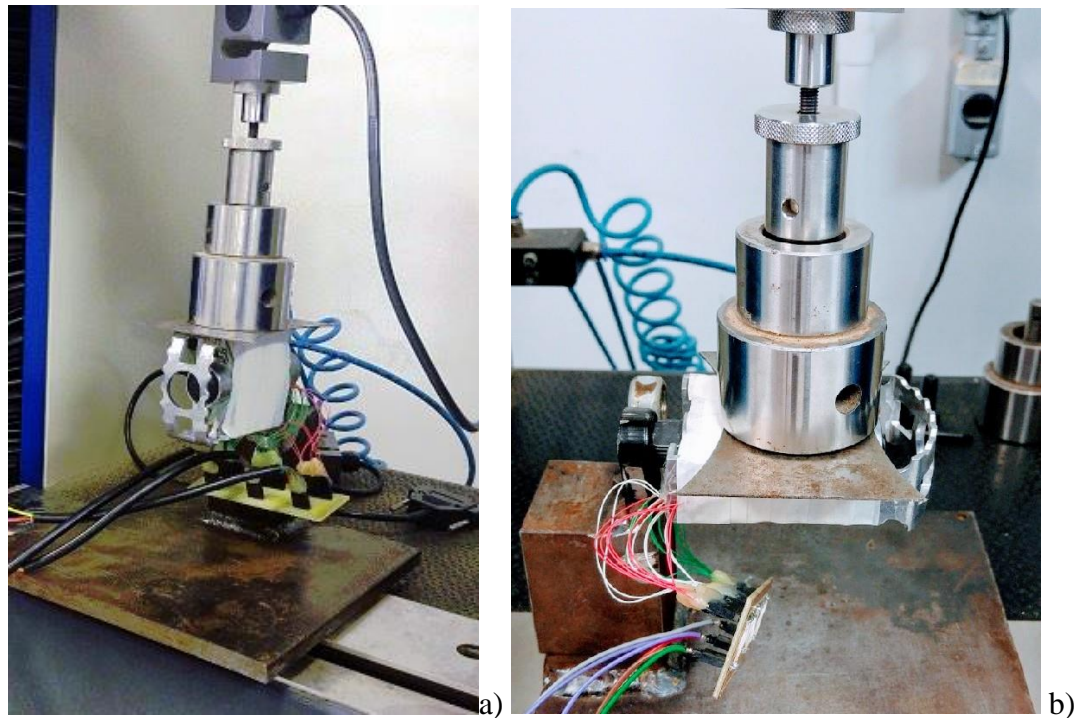
**Figura 25** Esquema de ligação das Pontes de *Wheatstone* utilizada para os pedais: (a) direção perpendicular, (b) direção lateral e (c) direção paralela.

### 3.2. DETERMINAÇÃO DAS FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA EXPERIMENTAIS

Determinar as funções de transferência experimentais de cada célula de carga é fundamental para o desenvolvimento das etapas posteriores. Realizada a cimentação dos extensômetros, é possível obter a primeira etapa da Cadeia de Medição, a qual é detalhadamente apresentada nas próximas subseções.

#### 3.2.1 Medição da Deformação Mecânica

Nesta etapa, serão abordados os procedimentos para realização dos ensaios de deformação mecânica da célula de carga através da aplicação de cargas estáticas. Para viabilizar a aplicação de cargas, construiu-se um suporte para engaste do pedal de forma que sua deformação mecânica possa ser considerada desprezível frente ao esperado para a célula de carga. Para as etapas experimentais, foram utilizados tanto pesos padrões com resolução de 5kg quanto a máquina de compressão modelo DL 2000 do fabricante Instron EMIC (Instron EMIC, 2015), conforme fotos da Figura 26. Os dois sistemas permitem a realização dos ensaios e foram utilizados conforme a disponibilidade ao longo das etapas do trabalho.



**Figura 26** Foto do ensaio Experimental com a Máquina de Compressão Modelo DL 2000 para medição de deformação mecânica: (a) no Eixo X e (b) no Eixo Z.

Foram aplicadas cargas com resolução de 49,05N em cada um dos três eixos, observando os limites determinados na Tabela 3, página 44. A aquisição de dados foi realizada utilizando a placa de aquisições NI 9237 cujas características encontram-se na Tabela 5.

**Tabela 5** Especificações Técnicas da Placa de Aquisições Utilizada na Determinação da Deformação Mecânica.

Especificações Técnicas da Placa de Aquisição	
Fabricante	National Instruments
Modelo	NI 9237
Resolução ADC	24 bits
Tipo de ADC	Delta Sigma
Modo de Aquisição	Simultâneo
Frequência	12,8MHz
Taxa de Aquisição	50kS/s
Incerteza de Medição	0,20%

FONTE: Adaptado do *datasheet* da DAQ NI 9237 da National Instruments, 2015.

Em conjunto com a placa de aquisições, criou-se um instrumento de medida virtual (VI) no *software* LabView 2014, disponível no APÊNDICE A, para armazenar e analisar os dados posteriormente. Foram coletadas 100 amostras com uma frequência de aquisição de 1kHz por canal. A partir dos dados coletados, utilizando-se o método dos mínimos quadrados (usando regressão linear) foram determinadas as funções de transferência experimentais de cada um dos eixos em que as forças foram aplicadas. Por fim, foram calculados os erros de linearidade através da Equação (16):

$$\text{Erro de Linearidade (\%)} = \frac{Diff_{Max}}{FE} \cdot 100 \quad (16)$$

onde o *Erro de Linearidade* representa o erro percentual gerado pela maior distância entre a função de transferência ideal e a função de transferência experimental obtida com os ensaios,  $Diff_{Max}$  é a maior distância entre as duas funções de transferência e  $FE$  é o fundo de escala na unidade utilizada na correspondente aplicação (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2011).

### 3.2.2 Medição da Tensão Elétrica de Saída das Pontes

Com os dados referentes à deformação mecânica dados em micro *strains* [ $\mu\epsilon$ ], obteve-se a primeira etapa da cadeia de medição. Para que o circuito de condicionamento possa ser projetado, é necessário o conhecimento da variação de tensão elétrica nas saídas das pontes de *Wheatstone* de cada eixo. Em função disso, foi realizado um ensaio experimental semelhante ao ensaio da seção anterior, com aplicação de cargas com resolução de 49,05N na máquina de compressão já mencionada, porém, considerando medidas de tensão elétrica diretamente na saída das pontes. A Tabela 6 apresenta as especificações técnicas dos multímetros utilizados nas medições.

**Tabela 6 Especificações Técnicas do Multímetro Digital de Bancada.**

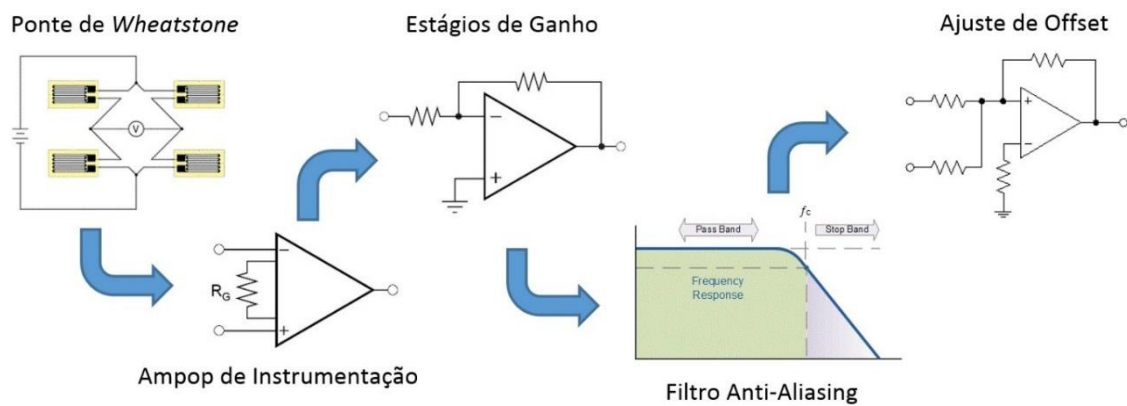
Especificações Técnicas do Multímetro Digital de Bancada	
Fabricante	Tektronix
Modelo	DMM 4050
Resolução	6,5 Dígitos
Rejeição de Modo Comum	140 dB em 50/60 Hz $\pm 0,1\%$
Método de Medição	A/D Multi rampa
Linearidade A/D	0,0002% da medição + 0,0001% do range
Corrente de Fuga de Entrada	< 30pA a 25°C
Incerteza de Medição - 100mV	0,0037 + 0,0035
Incerteza de Medição - 1V	0,0025 + 0,0007
Incerteza de Medição - 10V	0,0024 + 0,0005
Incerteza de Medição - 100 $\Omega$	0,01 + 0,004
Incerteza de Medição - 1k $\Omega$	0,01 + 0,001

FONTE: Adaptado do *datasheet* da Tektronix, 2013.

As funções de transferência experimentais de saída das pontes foram obtidas utilizando o método dos mínimos quadrados (usando regressão linear), de forma semelhante ao procedimento da seção anterior. Com elas, foi possível calcular os erros de linearidade percentuais e embasar o projeto do circuito de condicionamento de sinais para cada canal.

### 3.3. PROJETO DO CIRCUITO CONDICIONADOR DE SINAIS

A topologia utilizada nos circuitos de condicionamento de sinais considera os trabalhos desenvolvidos por (BALBINOT; MILANI; NASCIMENTO, 2014; PIGATTO *et al.*, 2016). A entrada em carga mecânica do circuito de condicionamento possui 735,75N como fundo de escala para as direções perpendicular e lateral, e 343,35N para a direção paralela. Cada direção possui uma função de transferência experimental específica, a qual permite um cálculo prévio dos ganhos necessários em cada estágio de amplificação. A Figura 27 apresenta o diagrama de blocos sugerido.



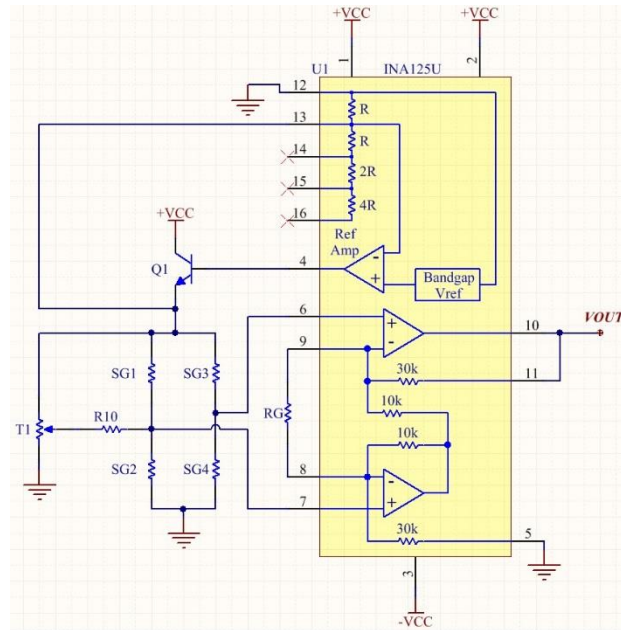
**Figura 27 Diagrama de Blocos Sugerido para o Circuito de Condicionamento.**

A proposta visa trabalhar com ganhos abaixo de 50 em cada estágio e realizar um condicionamento e amplificação graduais do sinal. Ao contrário de (BALBINOT; MILANI; NASCIMENTO, 2014; PIGATTO *et al.*, 2016), o objetivo é prover módulos independentes que possam ser facilmente replicados em propostas futuras, já que cada módulo possui fonte de alimentação elétrica e circuitos de condicionamento totalmente desvinculados um do outro.

### 3.3.1 Tensão Elétrica de Referência para as Pontes de *Wheatstone*

Embora utilizadas em larga escala em projetos de instrumentação, as pontes de *Wheatstone* necessitam alguns cuidados especiais relacionados aos pontos que podem afetar diretamente sua tensão elétrica de saída. Para um funcionamento adequado, é fundamental que a tensão elétrica de alimentação seja termicamente estável (MURRAY; MILLER, 1992). Por este motivo, alguns fabricantes optaram por integrar em um mesmo componente uma referência de tensão que atenda estas necessidades, ao mesmo tempo que forneça a possibilidade de um primeiro estágio de amplificação diferencial, especificamente projetado para utilizações com pontes de *Wheatstone*. Algumas características fundamentais como baixa corrente quiescente ( $460\mu A$ ), estabilidade térmica ( $< 2\mu V/^{\circ}C$ ) e elevada rejeição de modo comum (mínimo 100dB) justificam a escolha do amplificador diferencial. As especificações técnicas deste

componente estão disponíveis no ANEXO A. A configuração utilizada neste trabalho, com o componente INA125U, é apresentada pela Figura 28.



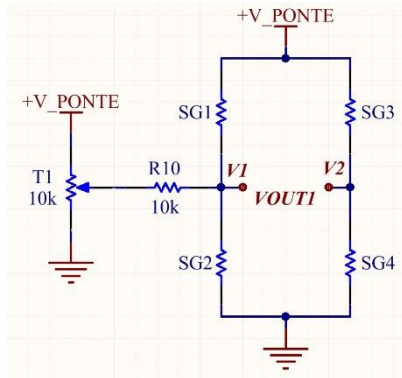
**Figura 28** Esquema do circuito utilizado para gerar a tensão elétrica de referência das pontes de *Wheatstone*.

Por recomendação do fabricante (HBM, 2015), a máxima tensão elétrica de referência que pode ser utilizada na alimentação das pontes para o modelo de extensômetro escolhido é +1,5V. Exceder os limites impostos pelo fabricante do extensômetro pode acarretar na destruição das grades dos mesmos e inviabilizar sua utilização. Através do pino 13 do INA125U, foi possível obter uma referência de tensão elétrica de +1,25V, a qual, acrescida de um transistor NPN (Q1, na Figura 28), disponibiliza a corrente elétrica necessária para excitação do circuito, a qual é calculada na seção 3.3.2.

### 3.3.2 Ponte de *Wheatstone* e o Circuito de Ajuste de Zero

Para realizar a calibração de cada um dos eixos das células de carga, deve-se considerar os ajustes de *offset* e ganho de cada direção. O *offset* trata do ajuste que garantirá uma saída de tensão elétrica nula nos terminais centrais das pontes de *Wheatstone* quando não houver aplicação de carga. O eventual desbalanço quando a célula de carga está em repouso ocorre

devido à tolerância associada à cada extensômetro e definida pelo fabricante (HBM, 2015), neste caso,  $\pm 1\%$  ( $\pm 1,2\Omega$ ). Uma sugestão de topologia apresentada em (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2011), e adotada neste trabalho, prevê a utilização de um trimpot em um dos braços resistivos da ponte, responsável por balancear a tensão elétrica diferencial dos pontos centrais, conforme mostra a Figura 29.



**Figura 29** Esquema do Circuito de Ajuste de Zero.

Neste caso, a recomendação é que todos os componentes utilizados possuam incertezas associadas menores que a incerteza dos extensômetros, além de estabilidade térmica, visando minimizar o impacto nas medições. Considerando a tensão elétrica de referência apresentada na Seção 3.3.1, foi possível calcular a corrente elétrica nos extensômetros através da Equação (17):

$$I_2 = \frac{+V\_PONTE}{SG3 + SG4} = \frac{1,25V}{120\Omega + 120\Omega} \cong 5,21mA \quad (17)$$

onde  $I_2$  é a corrente que flui pelo segundo braço da Ponte de *Wheatstone*, em [A],  $V\_PONTE$  é a tensão elétrica de alimentação da ponte, em [V],  $SG3$  e  $SG4$  são as resistências elétricas dos extensômetros que compõem o segundo braço da ponte, em [ $\Omega$ ]. Para o cálculo da incerteza padrão de componentes foi considerada a tolerância determinada por cada fabricante e considerou-se que o valor experimental da grandeza em questão segue uma distribuição retangular com infinitos graus de liberdade (Tipo B). Sendo assim, a Equação (18) representa a expressão utilizada para o cálculo da incerteza padrão de cada componente utilizado:



$$\sigma = \frac{VN.Tolerância}{\sqrt{3}} \quad (18)$$

onde  $\sigma$  é a incerteza padrão do componente,  $VN$  é o Valor Nominal do componente e *Tolerância* representa o valor da tolerância percentual do componente, informada pelo fabricante do mesmo. Considerando a incerteza padrão do amplificador operacional INA125U e dos extensômetros de um mesmo braço da ponte, calcula-se a incerteza combinada da corrente elétrica (desconsiderando possíveis termos correlacionados) que circula pelos mesmos através da Equação (19):

$$\mu_{c_{I_2}} = \sqrt{\left(\frac{\partial I_2}{\partial V_{CC}}\right)^2 \cdot (\sigma_{V_{CC}})^2 + \left(\frac{\partial I_2}{\partial SG3}\right)^2 \cdot (\sigma_{SG3})^2 + \left(\frac{\partial I_2}{\partial SG4}\right)^2 \cdot (\sigma_{SG4})^2} \quad (19)$$

$$\mu_{c_{I_2}} = \sqrt{\left(\frac{1}{240}\right)^2 \cdot \left(\frac{0,00625}{\sqrt{3}}\right)^2 + 2 \cdot \left(-\frac{1,25}{(240)^2}\right)^2 \cdot \left(\frac{1,2}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad (20)$$

$$\mu_{c_{I_2}} = 0,026mA \quad (21)$$

Logo, considerando o fator de expansão  $k = 2$  para infinitos graus de liberdade e uma distribuição normal, é possível obter a incerteza expandida  $U = 0,052mA$ , resultando no valor de corrente indicado pela Equação (22):

$$I_2 = 5,21mA \pm 0,052mA \quad (22)$$

Desta forma, nota-se que as correntes elétricas que circulam pelos extensômetros estão abaixo do limite estipulado pelo fabricante (HBM, 2015). A corrente elétrica total consumida pela ponte, considerando os dois braços resistivos, foi calculada pela Equação (23):

$$I_{Ponte} = I_2 \times 2 = 5,21mA \times 2 = 10,42mA \quad (23)$$

Considerando as incertezas padrão para cada braço da ponte de *Wheatstone* calculadas na Equação (22), é possível obter as incertezas combinada e expandida para a ponte completa, conforme apresentado na Equação (24):

$$\mu_{c_{I_{Ponte}}} = \sqrt{\left(\frac{\partial I_{Ponte}}{\partial I_2}\right)^2 \times (\sigma_{I_2})^2} \quad (24)$$

$$\mu_{c_{I_{Ponte}}} = \sqrt{(2)^2 \times (0,052mA)^2} = 0,104mA \quad (25)$$

Considerando uma distribuição normal, com um fator de expansão  $k = 2$ , a incerteza expandida é  $U = 0,208mA$ , logo, a corrente elétrica da ponte de *Wheatstone* é dada pela Equação (26):

$$I_{Ponte} = 10,42mA \pm 0,208mA \quad (26)$$

Sendo assim, a corrente elétrica fornecida pelo INA125U, utilizando circuito de *boost*, está adequada para alimentar as pontes de *Wheatstone*, já que a corrente elétrica em cada extensômetro não ultrapassa o valor máximo indicado pelo fabricante. A tensão elétrica de saída da ponte, considerando a deformação relativa, pode ser calculada de acordo com a Equação (27):

$$V_{OUT1} = V_1 - V_2 = V_{PONTE} \cdot \frac{\Delta R}{R_0} = VCC \cdot FG \cdot \varepsilon = (1,25) \cdot (1,76) \cdot \varepsilon = +(2,2\varepsilon)V \quad (27)$$

onde  $V_{PONTE}$  é a tensão elétrica de alimentação da ponte, em [V],  $FG$  é o fator *gage* dos extensômetros e  $\varepsilon$  é a deformação relativa no ponto de cimentação, dado em *strains*. Outro parâmetro importante que deve ser determinado é a sensibilidade da ponte de *Wheatstone*, a qual é apresentada pela Equação (28):

$$S_{Ponte} = \frac{dV_{OUT1}}{d\varepsilon} = 2,2V/\varepsilon = +2,2\mu V/\mu\varepsilon \quad (28)$$

### 3.3.3 Estágios de Amplificação

A ordem de grandeza da tensão elétrica de saída das pontes de *Wheatstone* é de microvolts ( $\mu V$ ). Para que esta tensão elétrica possa ser adequadamente adquirida por um conversor A/D, é necessário que o sinal seja amplificado e ajustado para possibilitar o uso de todo o *range* de conversão, que neste caso é de 0 a 3,3V. Tendo em vista que os ganhos aplicados são da ordem de  $10^3$  e  $10^4$ , de acordo com os procedimentos experimentais relatados na Seção 3.3.2, optou-se pelo cascadeamento de 4 estágios, visando principalmente manter a integridade do sinal e minimizar os efeitos do ruído elétrico presente no sistema. A primeira etapa de amplificação é realizada pelo circuito integrado INA125U citado anteriormente na Seção 3.3.1, que também é o responsável por prover a tensão elétrica de referência para a ponte de *Wheatstone*. A função de transferência, dada pelo fabricante (Texas Instruments, 1998), é apresentada pela Equação (29):

$$V_O = (V_{IN}^+ - V_{IN}^-) \cdot G1 \quad (29)$$

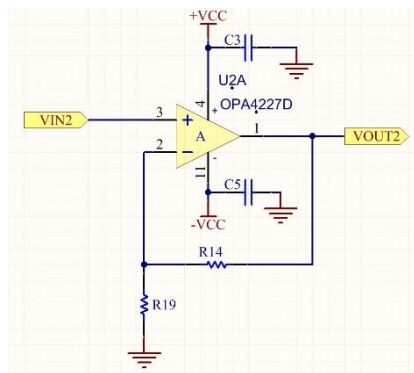
onde  $V_O$  é a tensão elétrica de saída, em [V],  $V_{IN}^+$  e  $V_{IN}^-$  são as tensões de entrada diferenciais, em [V], e  $G1$  é o ganho do amplificador, em [V/V]. No entanto, para facilitar a aplicação e o ajuste de ganho em *hardware*, o fabricante (Texas Instruments, 1998) propõe o cálculo do ganho através da Equação (30):

$$G1 = 4 + \frac{60k\Omega}{RG} \quad (30)$$

sendo  $G1$  o ganho do amplificador, em [V/V], e  $RG$  é o resistor conectado entre os pinos 8 e 9 do INA125U, conforme indicado na Figura 28. Optou-se pela utilização de resistores de  $60,4k\Omega$ , com tolerância de 1%, resultando num ganho que foi calculado como mostra a Equação (31):

$$G1 = 4 + \frac{60k\Omega}{RG} = 4 + \frac{60k\Omega}{60,4k\Omega} = 4,99 \cong 5 \quad (31)$$

Os estágios posteriores de amplificação utilizam circuitos integrados modelo OPA4227 com nível de ruído elétrico de  $3\eta V/\sqrt{Hz}$ , rejeição de modo comum de 138dB e máxima tensão elétrica de *offset* de  $75\mu V$  para garantir a menor propagação de ruído elétrico possível. Outras características técnicas deste componente são apresentadas no ANEXO B. O segundo estágio utiliza um amplificador na configuração não inversor (CARTER; BROWN, 2001), conforme mostra a Figura 30.



**Figura 30 Esquema do Amplificador na Configuração Não Inversor.**

A função de transferência teórica desta configuração é apresentada pela Equação (32):

$$VOUT2 = VIN2. \left( 1 + \frac{R14}{R19} \right) \quad (32)$$

Da mesma forma como no primeiro estágio, foi estabelecido um ganho fixo e igual para todos os canais, que foi calculado pela Equação (33):

$$G2 = 1 + \frac{R14}{R19} = 1 + \frac{10k\Omega}{2,2k\Omega} \cong 5,54 \quad (33)$$

### 3.3.4 Terceiro Estágio de Amplificação e Filtragem do Sinal

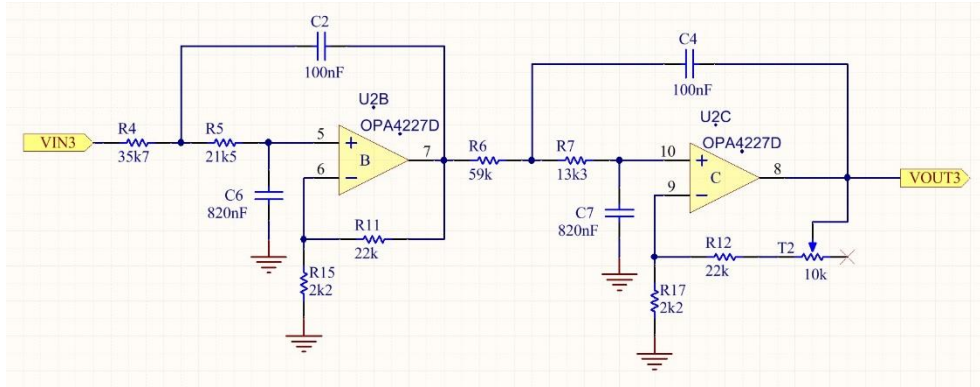
O terceiro estágio possui duas funções principais: amplificar e filtrar o sinal de entrada do seu bloco. O filtro foi utilizado com o intuito de preservar o sinal de interesse, impedindo

que efeitos de *aliasing* distorçam e acrescentem ruído elétrico às aquisições que serão realizadas posteriormente. Sua configuração é Passa-Baixas e a frequência de corte deve estar acima da frequência do fenômeno a ser medido, no caso, a pedalada do ciclista. Posteriormente, ajusta-se a frequência de amostragem de acordo com a ordem do filtro para que as componentes espectrais de frequência superior à de interesse possuam atenuação da ordem de 40dB por década. Uma das opções mais utilizadas e que contempla as necessidades apresentadas acima é o filtro *Butterworth* (SCHUBERT; KIM, E. M., 2016). A topologia adotada foi a *Sallen-Key*, de quarta ordem e com ganho não unitário. Devido às características do fenômeno de estudo, definiu-se a frequência de corte de 20Hz para todos os canais das células de carga. A Tabela 7 apresenta algumas das principais características do filtro utilizado.

**Tabela 7 Principais Características do Filtro Projetado no Terceiro Estágio.**

Características do Filtro <i>Butterworth</i> de 4° Ordem	
Resposta	<i>Butterworth</i>
Topologia	<i>Sallen-Key</i>
Ordem	4
Número de Estágios	2
Ganho	100V/V (40dB)
Frequência de Corte	20Hz
Atenuação na Frequência de Corte	37dB
Fator de Qualidade do 1° Estágio	0,54
Fator de Qualidade do 2° Estágio	1,31

A topologia padrão deste filtro é a mesma para todos os canais, o ganho do primeiro estágio é fixo e a variação ocorre apenas no ganho do segundo estágio, ajustado individualmente de acordo com a especificação para cada eixo. A Figura 31 apresenta o circuito do filtro Passa-Baixas *Butterworth* de 4° ordem.



**Figura 31** Esquema da Topologia Padrão do Filtro Passa-Baixas Ativo de 4° Ordem.

O ganho em cada estágio foi dado pela Equação (34):

$$G3 = \frac{R4 + R3}{R3} = \frac{22k\Omega + 2,2k\Omega}{2,2k\Omega} = 11 \quad (34)$$

A função de transferência do primeiro estágio é dada pela Equação (36):

$$H_{E1}(s) = \frac{G3}{S^2 + \left( \frac{1}{C2 \cdot R4} + \frac{1}{C2 \cdot R5} + \frac{1 - G3}{C6 \cdot R5} \right) \cdot S + \frac{1}{C2 \cdot C6 \cdot R5 \cdot R4}} \quad (35)$$

$$H_{E1}(s) = \frac{174772}{S^2 + 178,013 \cdot S + 15888,374} \quad (36)$$

De forma análoga, a função de transferência do segundo estágio é apresentada pela Equação (38):

$$H_{E2}(s) = \frac{G4}{S^2 + \left( \frac{1}{C4 \cdot R6} + \frac{1}{C4 \cdot R7} + \frac{1 - G}{C7 \cdot R7} \right) \cdot S + \frac{1}{C4 \cdot C7 \cdot R7 \cdot R6}} \quad (37)$$

$$H_{E2}(s) = \frac{170952}{S^2 + 4,445 \cdot S + 15541,126} \quad (38)$$

A  $H(s)$  que descreve o filtro completo é definida pela composição dos estágios 1 e 2 do filtro, definida pela Equação (41), com seu diagrama de bode apresentado pela Figura 32.

$$H(s) = H_{E1}(s) \cdot H_{E2}(s) \quad (39)$$

$$H(s) = \frac{174772}{s^2 + 178,013 \cdot s + 15888,374} \cdot \frac{170952}{s^2 + 4,445 \cdot s + 15541,126} \quad (40)$$

$$H(s) = \frac{29877622944}{s^4 + 182,458 \cdot s^3 + 32220,768 \cdot s^2 + 2837146,285 \cdot s + 246923222,269} \quad (41)$$

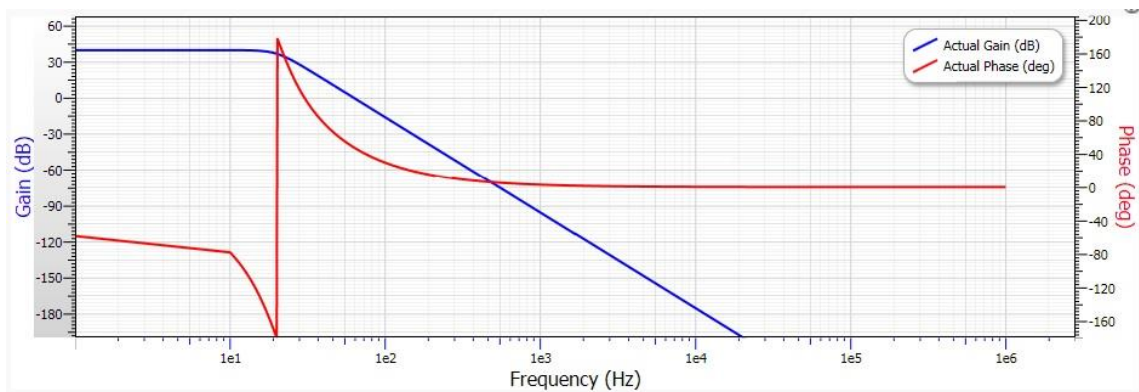


Figura 32 Diagrama de Bode e de Fase do Filtro Projetado.

### 3.3.5 Circuito de Ajuste de *Offset*

Tendo em vista a alimentação elétrica simétrica dos amplificadores, foi considerado um circuito para ajuste de *offset* do sinal, com o objetivo de eliminar a parte negativa. A Figura 33 apresenta a topologia desta etapa do circuito.

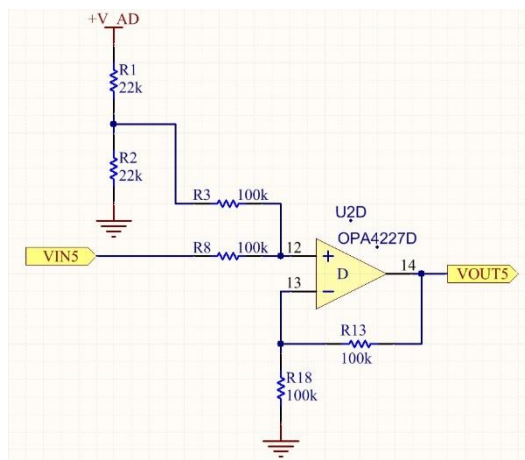


Figura 33 Esquema do Circuito de Ajuste de *Offset* do sinal condicionado.

Esta topologia permite, ainda, algum ajuste de ganho que se faça necessário, através dos resistores R13 e R18. Em sua configuração padrão, o ganho deste estágio é 2. A função de transferência teórica deste estágio foi dada pela Equação (42):

$$V_{OUT5} = \left( V_{IN5} + \frac{+V_{AD}}{2} \right) \cdot 2 \quad (42)$$

onde  $V_{OUT5}$  é a tensão elétrica de saída do estágio de ajuste de *offset*, em [V],  $V_{IN5}$  é a tensão elétrica de entrada deste estágio, em [V] e  $+V_{AD}$  é a tensão elétrica de alimentação do conversor A/D, em [V].

### 3.3.6 Função de Transferência Teórica Proposta

Após o último estágio do circuito de condicionamento, é possível determinar a função de transferência teórica de cada canal de cada célula de carga, conforme mostra a Equação (43):

$$V_{OUT6} = V_{OUT1} \cdot G1 \cdot G2 \cdot G3 \cdot G4 \cdot G5 + \frac{(+V_{AD})}{2} \quad (43)$$

$$V_{OUT6} = 2,2 \cdot \varepsilon \cdot 5 \cdot 5,54 \cdot 11 \cdot G4 \cdot 2 + \frac{3,3}{2} \quad (44)$$

$$V_{OUT6} = 1340,68 \cdot \varepsilon \cdot G4 + 1,65 \quad (45)$$

onde  $V_{OUT6}$  é a tensão elétrica de saída do circuito de condicionamento, dada em [V],  $\varepsilon$  é a deformação relativa dos extensômetros no ponto de cimentação, em micro *strains* [ $\mu\varepsilon$ ] e  $G4$  é o ganho ajustável no quarto estágio, o qual varia de eixo para eixo e é ajustado na calibração.

## 3.4. FONTE DE ALIMENTAÇÃO ELÉTRICA

Cada célula de carga possui sua própria fonte de alimentação elétrica simétrica. Visando a maior autonomia possível do sistema, optou-se pela utilização de baterias LiFePo4 (Lítio Ferro Fosfato), cujas características são apresentadas na Tabela 8. Como os circuitos funcionam



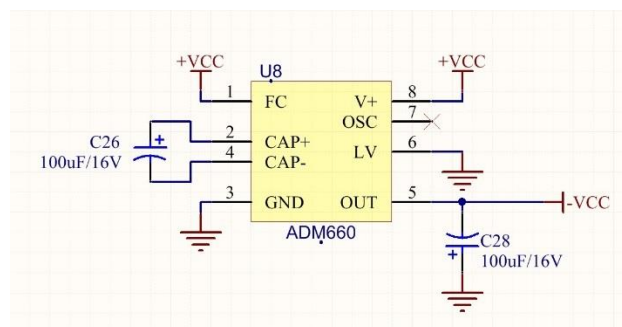
com tensão elétrica máxima de +5V (+VCC dos circuitos de condicionamento) e +3,3V (+V\_AD dos microcontroladores), foi utilizada uma bateria LiFePo4 de +7,4V/850mAh por célula de carga, com reguladores de tensão lineares MIC29310 para regular +5V e MIC5205-3.3 para regular a tensão em +3,3V.

**Tabela 8 Especificações Técnicas da Bateria LiFePo4.**

Especificação da Bateria Utilizada na Alimentação do Sistema	
Fabricante	Zippy
Modelo	<i>Flightmax Transmitter pack</i>
Composição	LiFePo4
Tensão Nominal	2S / 7,4V
Capacidade	850mAh
Descarga	25c
Peso	44g
Dimensões	56mm x 30mm x 14mm

FONTE: Adaptado de Zippy, 2016.

Para prover alimentação elétrica simétrica aos amplificadores operacionais, foram utilizados circuitos conversores de tensão capazes de gerar -5V (-VCC) a partir dos +5V (+VCC) usuais ao invés de agregar uma segunda bateria ao sistema que acarretaria em custos e mais peso ao sistema. A Figura 34 apresenta o circuito conversor de tensão elétrica para geração da tensão elétrica negativa.



**Figura 34 Esquema do Circuito Conversor para Tensão Elétrica Simétrica.**

Para estimar a autonomia de cada célula de carga, foi realizada uma simulação do circuito completo de condicionamento no *software* Multisim Versão 14.0 *Trial* (National Instruments, 2015b) para análise e desenvolvimento de circuitos eletrônicos. O mesmo estimou o consumo em aproximadamente 75mA. A este valor, somou-se o consumo médio do microcontrolador (30mA), do *datalogger* (6mA) e do módulo *ZigBee* (45mA) resultando em uma corrente elétrica total de 156mA. Com isto, estima-se que o sistema completo possua autonomia de 5,48 horas.

### 3.5. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

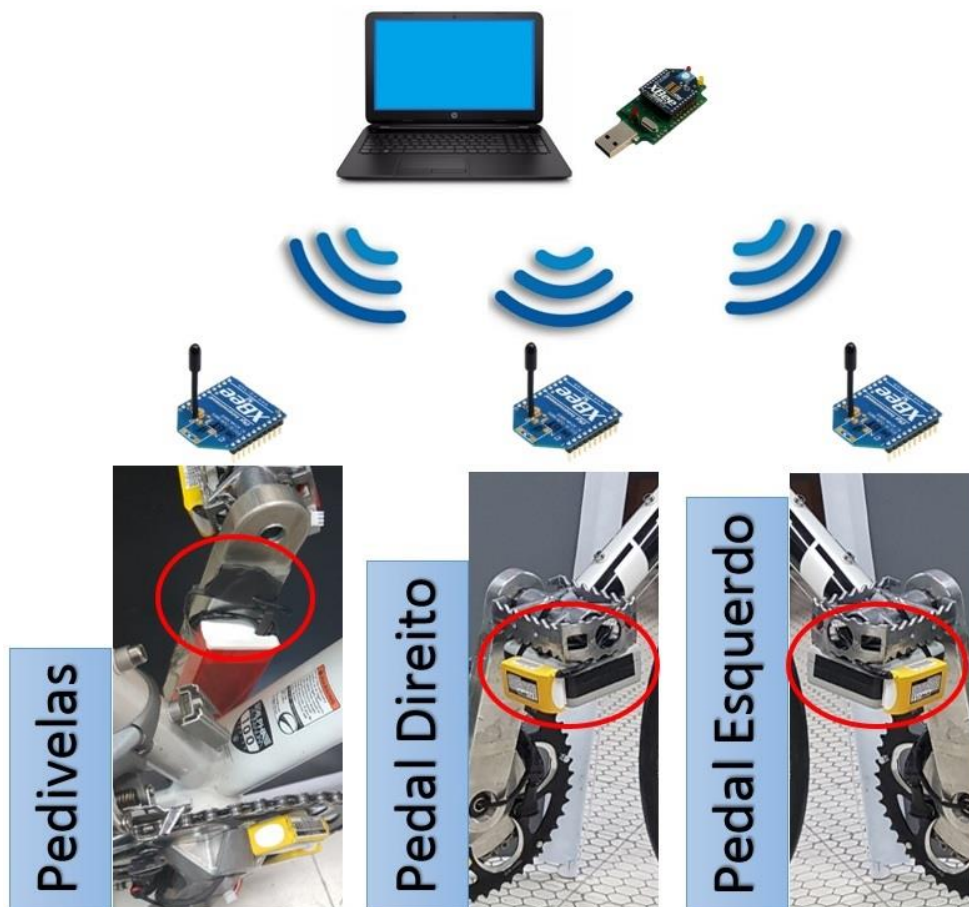
Para sincronizar, adquirir e armazenar os dados de cada célula de carga, criou-se um *software* em C# com uma interface bastante simplificada cuja finalidade é enviar um breve comando com a função de gatilho (*trigger*) para que todas as células de carga iniciem suas aquisições no mesmo instante de tempo. Como cada módulo possui sua própria interface *ZigBee*, um comando em *broadcast* é o suficiente para colocar todos os módulos em modo de aquisição contínua e, da mesma forma, fazer com que todos interrompam suas aquisições de forma síncrona. Os módulos *ZigBee* utilizados são do modelo *XBEE SI*, cujas especificações técnicas são apresentadas na Tabela 9.

**Tabela 9** Especificações Técnicas dos Módulos *XBEE SI*.

Especificação Técnica do Módulo <i>XBEE SI</i>	
Fabricante	Digi
Modelo	XB24-AWI-001
Taxa de Transmissão de Dados	250kbps
Potência de Transmissão	1mW
Tensão de Alimentação Elétrica	2,8 a 3,4V
Interface de Comunicação	3,3V CMOS UART
Frequência de Transmissão	2,4GHz
Corrente de Transmissão	45mA

FONTE: Adaptado do datasheet de *XBEE SI*, da Digi International, 2016.

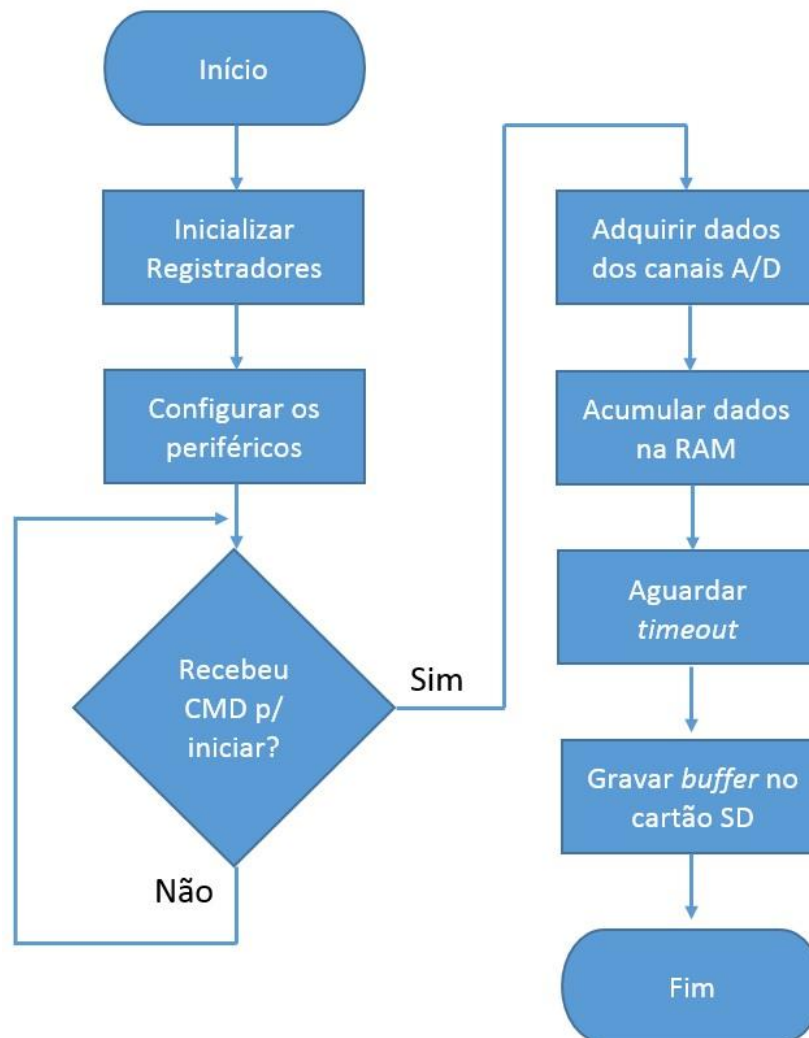
Com o intuito de facilitar a visualização do sistema proposto para aquisição sincronizada de dados, foi proposto o diagrama de blocos da Figura 35.



**Figura 35 Sistema Proposto para Aquisição Simultânea de Dados através dos Módulos ZigBee.**

Ao todo são utilizados três módulos ZigBee, sendo um para os pedivelas, já que estas duas células de carga possuem uma única placa eletrônica para processamento e armazenamento dos dados coletados, e outros dois módulos ZigBee, sendo um para cada pedal, já que estes constituem sistemas totalmente independentes. A comunicação entre os módulos e suas respectivas centrais de controle é realizada através de um periférico de comunicação UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*). O *firmware* que gerencia todo o processo de aquisição de dados foi desenvolvido em linguagem C para microcontroladores ARM Cortex M0+, modelo STM32L071KB, utilizando a interface de programação Keil uVision5, cujo código fonte é único e está presente em todas as células de carga, incluindo os

pedivelas, ou seja, garante-se que as mesmas linhas de código estejam sendo executadas para todas as placas eletrônicas do sistema. O fluxograma da Figura 36 apresenta a lógica de funcionamento para o *firmware* padrão.



**Figura 36 Fluxograma do *Firmware* utilizado nas células de carga.**

Inicialmente, o processador e seus periféricos foram inicializados e os módulos existentes na rede foram pareados. Esta função foi executada apenas na inicialização do módulo mestre, o qual fica plugado em um PC à uma distância de um metro do sistema da bicicleta. Após o envio do comando em *broadcast*, cada módulo inicia as aquisições de dados em sua respectiva célula de carga com frequência de 50Hz (20ms), gravando, em seguida, o tempo e os dados resultantes da conversão A/D coletados no cartão de memória. Esta frequência de

aquisição foi escolhida tendo em vista a frequência do fenômeno de interesse ( $\sim 2\text{Hz}$ ), onde não se faz necessário aquisições em mais alta frequência para a reconstrução do sinal, além de otimizar a quantidade de gravações nos cartões de memória. O sinal analógico de tensão elétrica possui fundo de escala de  $+3,3\text{V}$ . Considerando que os microcontroladores possuem conversores A/D com resolução de 12 bits, o resultado da aquisição será dado pela Equação (46):

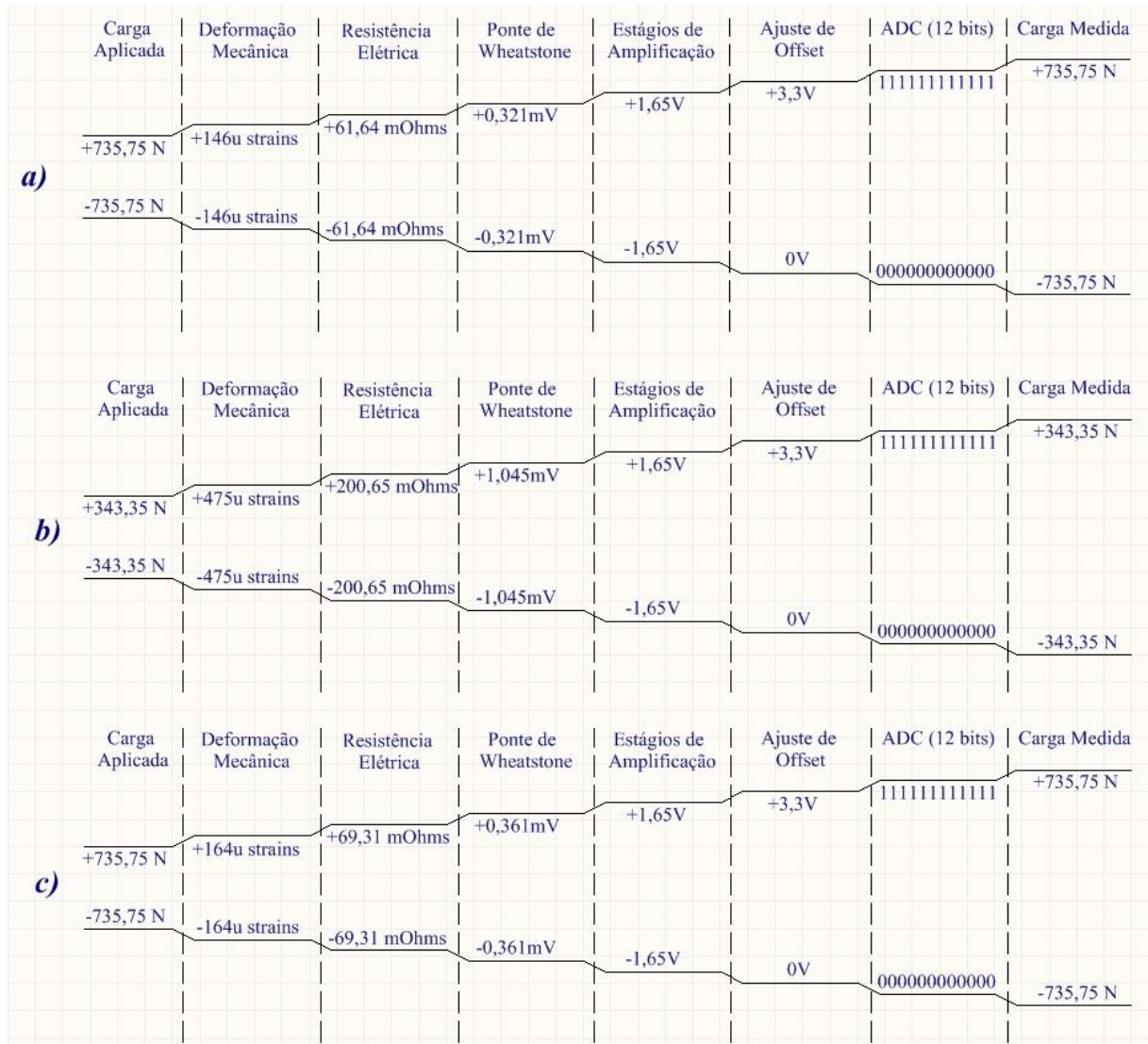
$$V_{DIGITAL} = \left( \frac{V_{IN\_ANALÓGICO}}{3,3} \right) \cdot (2^{12} - 1) \quad (46)$$

onde  $V_{DIGITAL}$  é a tensão elétrica de entrada representada na forma digital, em  $[bits]$  e  $V_{IN\_ANALÓGICO}$  é a tensão elétrica analógica de entrada, em  $[V]$ .

### 3.6. CADEIAS DE MEDIÇÃO PROPOSTAS

A cadeia de medição apresenta cada uma das etapas presentes localmente nas células de carga, partindo desde o fenômeno físico de interesse, no caso a força aplicada pelo ciclista, até a transformação em dados digitais a serem posteriormente analisados. Inicialmente, o ciclista aplicou uma carga que varia ao longo do ciclo da pedalada e é proporcional a sua massa. Como fundo de escala, considerou-se  $\pm 75\text{kg}$  (equivalente à  $\pm 735,75\text{N}$ ) para os eixos lateral (X) e perpendicular (Z), e  $\pm 35\text{kg}$  (equivalente à  $\pm 343,35\text{N}$ ) para o eixo paralelo (Y), tendo em vista o ciclo completo da pedalada. Esta carga provoca a deformação mecânica das células de carga, que por sua vez deformam proporcionalmente os extensômetros e alteram sua resistência elétrica. As deformações mecânicas teóricas foram obtidas por meio de simulações virtuais baseadas no método dos elementos finitos. Para isto, utilizou-se o *software* SolidWorks 2015. Considerando as características dos extensômetros utilizados e fornecidas pelo fabricante (HBM, 2016), foi possível obter a resistência elétrica em função da deformação mecânica simulada, a qual possibilita calcular a tensão elétrica de saída da ponte de *Wheatstone*. Como

cada canal possui uma deformação mecânica específica, foram sugeridas três cadeias de medição propostas, sendo uma para cada eixo, conforme apresenta a Figura 37.



**Figura 37 Cadeias de Medição Propostas para os Pedais: a) Eixo Lateral (X); b) Eixo Paralelo (Y); c) Eixo Perpendicular (Z).**

Com base na deformação mecânica simulada, obteve-se *ranges* de tensão elétrica de saída máximos para as pontes de *Wheatstone* de  $\pm 1,045\text{mV}$  para os eixos paralelos (Y). Considerando o fundo de escala de  $+1,65\text{V}$  ( $+V_{AD}/2$ ), verificou-se que os ganhos totais para os eixos lateral, paralelo e perpendicular devem ser 5140, 1578 e 4570, respectivamente. Como as cargas no sentido contrário não foram ensaiadas, assumiu-se o mesmo comportamento obtido

no ciclo positivo da pedalada. A Tabela 10 apresenta os ganhos teóricos para cada estágio de amplificação.

**Tabela 10 Relação de Ganhos Teóricos por Estágio de Amplificação**

Eixo	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3	Estágio 4	Estágio 5	Ganho Total
Lateral	5	5,54	11	8,43	2	5140
Paralelo	5	5,54	11	2,58	2	1578
Perpendicular	5	5,54	11	7,5	2	4570

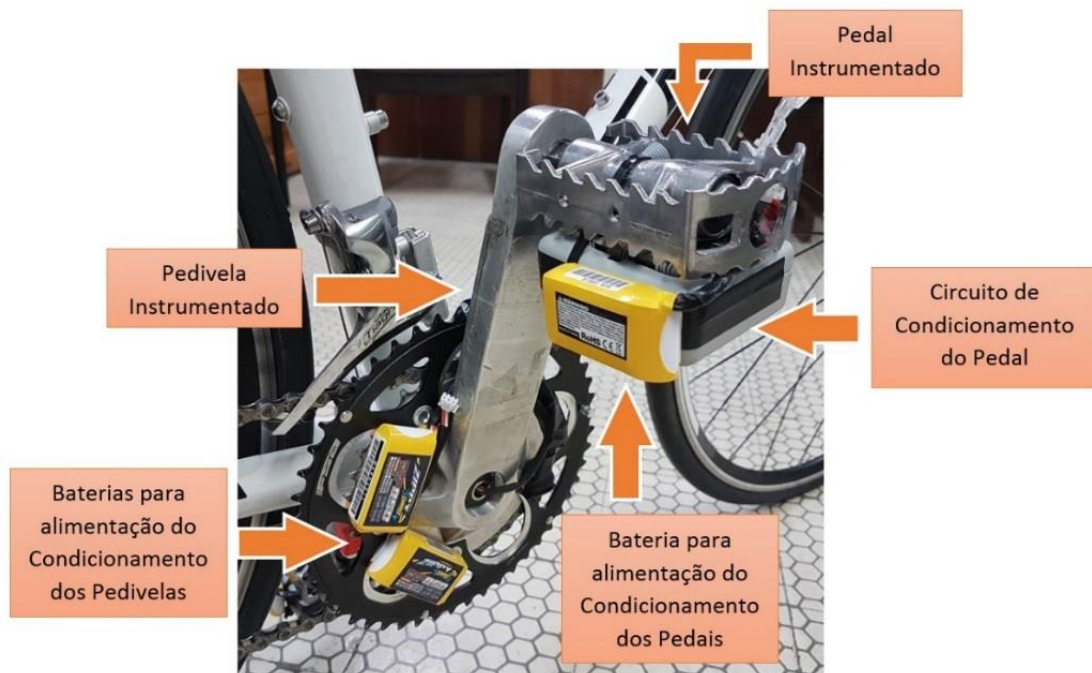
Antes de realizar a conversão de analógico para digital em 12 bits, foi adicionado um *offset* fixo de  $+1,65V$  para que o zero, ou posição onde o sistema não está exposto a nenhuma carga mecânica, ficasse posicionado exatamente no meio da faixa de medição (entre 0 e  $+3,3V$ ), possibilitando que os sinais excursionassem positiva e negativamente. O circuito de condicionamento atua sobre os sinais até o ajuste do *offset*. A partir deste ponto, os mesmos são convertidos para sinais digitais que, por sua vez, servem de base para toda a análise do trabalho e cálculo das demais grandezas de interesse que correlacionam os pedais com os pedivelas.

### **3.7. CALIBRAÇÃO ESTÁTICA DAS CÉLULAS DE CARGA E MONTAGEM NA BICICLETA**

Antes de montar as células de carga na bicicleta, foram realizados os procedimentos para calibração estática que consistiram na aplicação de cargas nos três eixos de cada célula de carga, da mesma forma como fora realizado na Seção 3.1.1. Agora com os extensômetros conectados no circuito de condicionamento e um ganho fixo sendo aplicado, realizou-se um ajuste fino para acertar a amplitude desejada da tensão elétrica em relação ao fundo de escala proposto. Com auxílio da máquina de compressão, foram aplicadas cargas com resolução de 49,05N variando de 0 a 735,75N para os eixos perpendicular e lateral, e 343,35N para o eixo paralelo. O circuito de condicionamento foi alimentado externamente com tensão elétrica de  $+7,4V$  (para coincidir com a tensão nominal da bateria) e as medições foram realizadas com o multímetro digital de bancada DMM 4050, com especificações já apresentadas na Tabela 6,



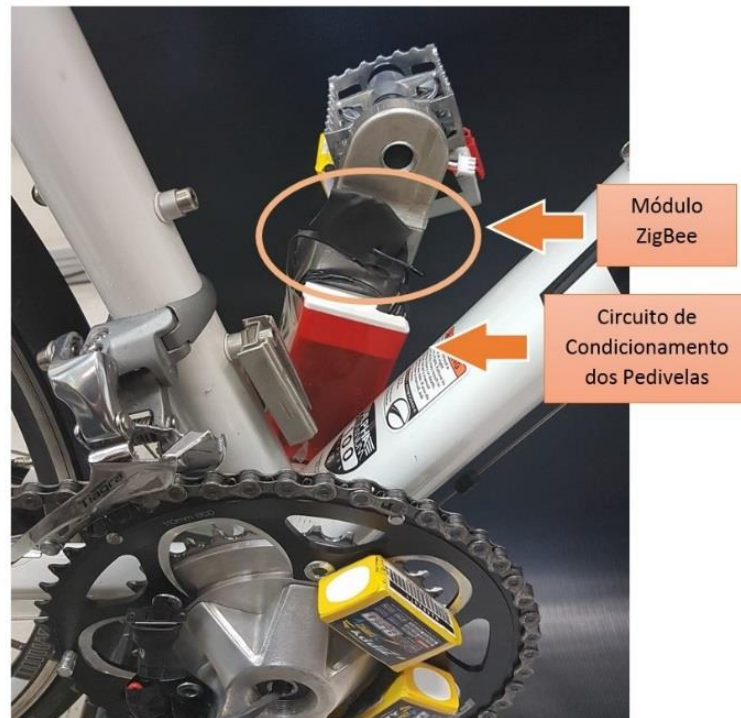
página 53. Após realizar a calibração de cada célula de carga, cada sistema independente foi testado sobre a bancada de modo a garantir seu correto funcionamento antes que fosse montado na bicicleta. O circuito de condicionamento dos pedais foi alocado em uma caixa injetada em ABS, cuja fixação foi feita junto ao pedal com abraçadeiras plásticas, conforme mostra a Figura 38.



**Figura 38 Circuitos de Condicionamento acoplados aos Pedais da Bicicleta.**

Já o circuito de condicionamento dos pedivelas foi alocado na parte interna dos mesmos. A placa eletrônica que realiza a aquisição e armazenamento dos dados foi fixada externamente ao pedivela esquerdo, de modo a facilitar o acesso ao cartão de memória. Conforme já mencionado, o circuito de condicionamento dos pedivelas foi feito e alocado por (PIGATTO *et al.*, 2016), enquanto que a placa de aquisições desenvolvida para este trabalho foi alocada externamente na mesma estrutura. As baterias que alimentam os circuitos foram fixadas na própria coroa da bicicleta. A foto com o sistema completo dos pedivelas é mostrada na Figura 39.

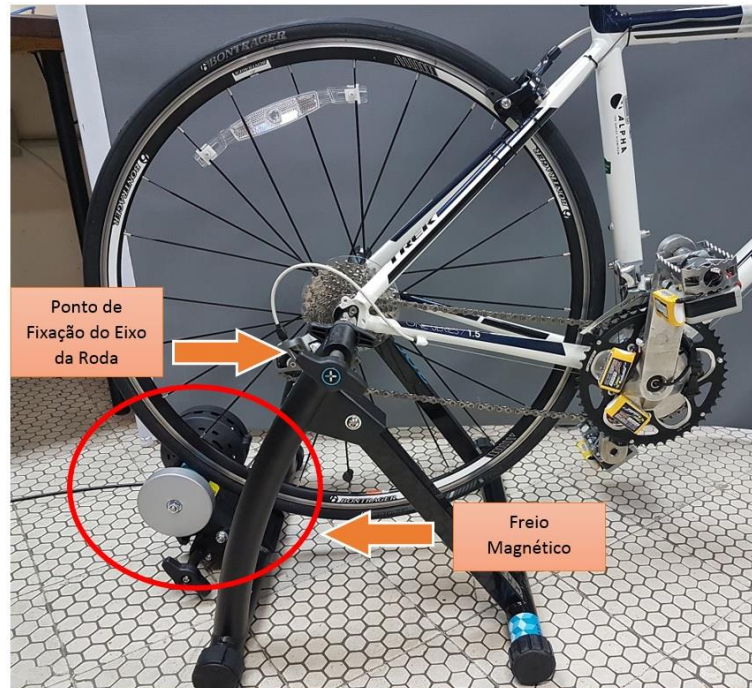




**Figura 39** Circuito de Condicionamento acoplado ao Pedivela.

### 3.8. PROCEDIMENTO PARA ENSAIOS E ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS

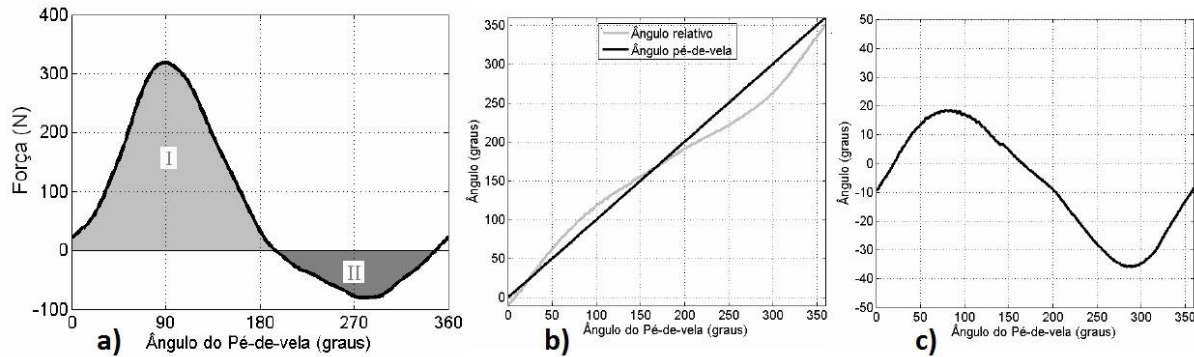
O procedimento para realização dos ensaios considerou pedaladas em ambiente controlado *indoor*, em laboratório, onde a bicicleta foi fixada em um rolo de treinamento com freios magnéticos de modo que o voluntário necessitasse imprimir força ao longo de toda a *sprint*. Um total de 10 voluntários amadores e saudáveis com idade ( $28,90 \pm 6,21$ ) anos, estatura ( $1,79 \pm 0,075$ ) m e massa corporal ( $73,40 \pm 9,98$ ) kg realizaram 20 *sprints* cada, sendo 10 repetições na marcha 1 e outras 10 repetições na marcha 2, com duração de um minuto para cada *sprint*. As coletas de dados foram realizadas com uma frequência de 50Hz (período de 20ms) e de forma simultânea entre todas as células de carga, onde cada *sprint* gerou um total de 3001 aquisições por célula de carga para um intervalo de 60s. A foto da Figura 40 mostra o sistema utilizado no procedimento experimental.



**Figura 40 Sistema utilizado no Ensaio Experimental com Voluntários em Laboratório.**

Conforme estudos apresentados por (BINI; CARPES, 2012; ITURRIOZ; NABINGER; ZARO, 2002), para que uma análise mais robusta possa ser realizada em relação às características da pedalada, é necessário que os dados referente ao ângulo do pedivela (referência global) e ângulo relativo dos pedais sejam considerados. Em razão das limitações mecânicas do protótipo desenvolvido, optou-se por estimar o ângulo dos pedivelas através do cálculo com base nos pontos de máxima força presentes nos ciclos das pedaladas. Estudos realizados por (BALBINOT; MILANI; NASCIMENTO, 2014; PIGATTO *et al.*, 2016) indicaram a possibilidade de aproximar o ângulo do pedivela com base em dados conhecidos, como Ponto Morto Superior ( $0^\circ$ ), Ponto de Máxima Força Efetiva Positiva ( $90^\circ$ ) e Ponto Morto Inferior ( $180^\circ$ ) (ver Figura 3). Durante experimentos para comparação entre critérios biomecânicos para análise do torque e potência gerados, (BERTUCCI, W. *et al.*, 2008) encontrou a mesma característica para a forma de onda padrão mencionada nos demais experimentos avaliados. De forma similar, o ângulo relativo dos pedais foi estimado com base

em estudos apresentados por (ITURRIOZ; NABINGER; ZARO, 2002), que descreveram as características observadas através de experimentos realizados, conforme mostra a Figura 41.



**Figura 41** Referência angular utilizada para: a) **Ângulo do pedivela**; c) **Ângulo dos pedais em relação ao ângulo do pedivela**; b) **Ângulo relativo dos pedais com informação de amplitude angular** (adaptado de NABINGER, 2006).

Com base nos experimentos já realizados e citados anteriormente, criou-se um novo vetor angular para utilização nas análises de dados, o qual, em complemento ao vetor tempo obtido experimentalmente, permitiu estimar o comportamento das forças efetiva e resultante em função da posição angular do pedivela. Considerando-se que as *sprints* têm duração de 60s e que cada uma gerou uma matriz de dados de 3000x4 (um vetor de tempo mais um vetor de dados para cada eixo da célula de carga), estimou-se um novo vetor de 3000 pontos com as informações angulares do pedivela com base nos pontos conhecidos e citados anteriormente. Conhecendo a posição do ponto de máxima força aplicada no vetor tempo e a posição do próximo ponto de interesse, estimou-se os valores angulares intermediários para todos os pontos obtidos através das coletas de dados. De forma similar, estimou-se o mesmo vetor angular para os pedais, tendo em vista o comportamento angular aproximado obtido experimentalmente por (NABINGER, 2006). De posse destes vetores angulares, foi possível estabelecer a relação entre os ângulos do pedal, relativos e do pedivela, conforme apresenta a Equação (47):

$$\beta = \alpha - \theta \quad (47)$$

onde  $\beta$  é o ângulo do pedal,  $\alpha$  é o ângulo relativo entre pedal e pedivela e  $\theta$  é o ângulo do pedivela. Com isto, foi possível calcular a força efetiva nos pedais, através da Equação (48):

$$F_E = F_{LAT} \cdot \cos(\alpha) - F_{PERP} \cdot \sin(\alpha) \quad (48)$$

onde  $F_E$  é a força efetiva aplicada na célula de carga, em [N],  $F_{LAT}$  é a força lateral medida diretamente no eixo lateral, em [N],  $\alpha$  é o ângulo relativo entre o pedal e o pedivela, e  $F_{PERP}$  é a força perpendicular aplicada na célula de carga, também em [N]. Os dados referentes a cada *sprint* foram coletados e armazenados ainda em níveis digitais nos cartões de memória. Com estas aquisições, uma série de parâmetros relevantes às análises puderam ser calculados para que, posteriormente, fizessem parte dos resultados e discussões presentes no próximo capítulo. A conversão dos dados digitais para tensão elétrica foi feita de acordo com a Equação (49):

$$V_{AD} = (AD) \cdot \frac{V}{RES} \quad (49)$$

onde  $V_{AD}$  é a tensão elétrica em [V] que corresponde aos valores A/D gravados ao longo dos experimentos,  $AD$  é o valor em níveis A/D como resultado direto das conversões,  $V$  é a tensão elétrica de alimentação do conversor A/D em [V] e  $RES$  é a resolução do mesmo conversor A/D. Com a tensão elétrica, é possível calcular a força efetiva aplicada nas células de carga com base no coeficiente angular das funções de transferência experimentais adquiridas no processo de calibração, conforme mostra a Equação (50):

$$F_{ef} = \frac{V_{AD}}{\tan \theta} \quad (50)$$

onde  $F_{ef}$  é a força efetiva, em [N],  $V_{AD}$  é a tensão elétrica proporcional ao valor A/D adquirido, em [V] e  $\tan \theta$  é a inclinação da função de transferência experimental adquirida durante o processo de calibração. A força resultante é a composição das forças lateral, perpendicular e paralela, a qual é calculada a cada instante de tempo ao longo da pedalada, de acordo com a Equação (51):

$$F_R = \sqrt{F_L^2 + F_P^2 + F_{PAR}^2} \quad (51)$$

onde  $F_R$  é a força resultante, em [N],  $F_L$  é a força lateral,  $F_P$  é a força perpendicular e  $F_{PAR}$  é a força paralela, todas em [N]. Com estes dados, é possível calcular o índice de efetividade da pedalada do voluntário, que corresponde à relação entre a força efetiva e a força resultante, como pode ser visto na Equação (52):

$$I_{Eff} = \frac{F_{ef}}{F_R} \quad (52)$$

onde  $I_{Eff}$  representa o Índice de Efetividade,  $F_{ef}$  é a Força Efetiva do eixo principal (perpendicular), em [N], e  $F_R$  é a Força Resultante, em [N]. O torque pode ser calculado utilizando a força efetiva, através da Equação (53):

$$T = F_{ef} \cdot L \quad (53)$$

onde  $T$  é o torque gerado na célula de carga, em [N.m],  $F_{ef}$  é a força efetiva (correspondente ao eixo perpendicular), em [N] e  $L$  é o comprimento do pedivela em [m]. Outro parâmetro relevante e já mencionado anteriormente, é a cadência instantânea, que consiste no número de ciclos por minuto, dada em RPM, e que pode ser calculada através da análise do comportamento periódico da forma de onda que representa a pedalada. De posse da cadência e do torque, calcula-se a potência instantânea gerada pelo voluntário, conforme mostra a Equação (54):

$$P = \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot T \cdot C \quad (54)$$

sendo  $P$  a potência instantânea gerada pelo voluntário, em [W],  $T$  é o torque, em [N.m] e  $C$  é a cadência, em [RPM]. Todos estes parâmetros foram analisados para cada *sprint*, onde buscou-se calcular valores médios que pudessem ser utilizados como variáveis de resposta em um teste de hipóteses. Neste caso, foi elaborado um Projeto de Experimentos Sequencial devido à disponibilidade de tempo dos voluntários, além de limitações no procedimento para



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 DETERMINAÇÃO DAS FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DAS CÉLULAS DE CARGA

A primeira etapa antes de calibrar o circuito de condicionamento de sinais para cada eixo das células de carga foi verificar a deformação mecânica, em *strains*, que ocorre nos extensômetros em função da aplicação das cargas. Conforme mencionado no Capítulo 3, utilizou-se uma placa de aquisições e de condicionamento destinada à área de Extensometria modelo NI 9237, da *National Instruments*, onde foram coletadas 100 amostras a uma frequência de 1kHz. Enquanto que o modelo virtual, cuja simulação foi realizada no *software* SolidWorks 2015, apresentou um *range* máximo de deformação mecânica de  $475\mu\epsilon$ , o modelo experimental obteve  $425\mu\epsilon$  como máxima variação, ambas no eixo paralelo. Para fins comparativos, o trabalho proposto por (MANOLOVA *et al.*, 2015), mencionado no Capítulo 2 e que utilizou, também, o método dos elementos finitos para simulação e análise da deformação mecânica, apresentou valores máximos de  $300\mu\epsilon$  para a mesma faixa de medição, a qual foi realizada no quadro da bicicleta, próximo à região do cubo e dos pedivelas.

Os dados absolutos não foram considerados, tendo em vista que, diferente do modelo virtual onde o sistema em repouso não possui qualquer deformação mecânica, no modelo experimental foram medidas deformações mecânicas diferentes de zero para a mesma condição, tornando necessário que a análise fosse feita de forma relativa. Segundo (HOFFMANN, 2012), fatores como temperatura ambiente, a qual provoca dilatação do material sob análise, a cimentação dos extensômetros e incertezas relacionadas aos componentes físicos que compõem o sistema, podem justificar os efeitos iniciais percebidos experimentalmente. As diferenças entre os dados experimentais e virtuais obtidos podem estar vinculadas, também, ao projeto virtual da célula de carga, que possui uma complexidade considerável em função da existência de formas orgânicas (curvas e ângulos), as quais foram obtidas através do uso de um paquímetro

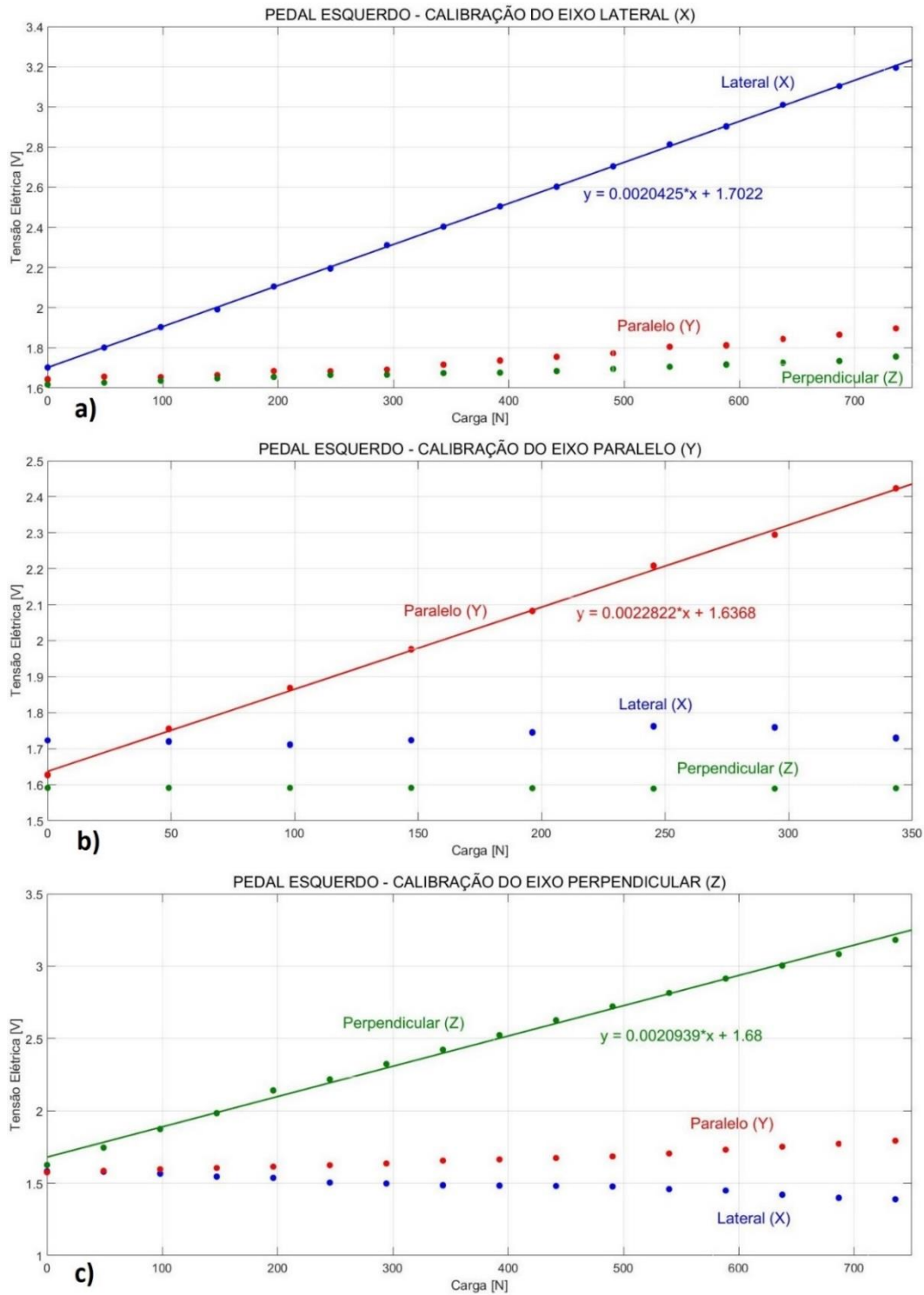
digital com características apresentadas na Tabela 1. Além disso, existem variabilidades devido ao algoritmo empregado no próprio simulador utilizado, cujo uso é mais indicado como um indicador das deformações quando comparado à outras ferramentas, como por exemplo, o ANSYS, entre outras, que são consideradas ferramentas mais robustas do que a ferramenta utilizada neste trabalho.

A partir dos dados coletados e, utilizando o método dos mínimos quadrados, foram determinadas as funções de transferência experimentais para a deformação mecânica dos eixos em que as forças foram aplicadas. As tabelas e gráficos podem ser vistos nos APÊNDICES B e C para os pedais esquerdo e direito, respectivamente. Para realizar a calibração, foram aplicadas cargas com resolução de 49,05N e fundo de escala de 735,75N nos eixos perpendicular (Z) e lateral (X), e 343,35N no eixo paralelo (Y). Desta forma, foram ajustados os ganhos de modo a ajustar o fundo de escala com a resolução máxima do conversor A/D. Os dados referentes à calibração nos pedais esquerdo e direito foram medidos com duas repetições para cada carga aplicada, os quais podem ser vistos nos APÊNDICE D e E, respectivamente. As medições foram realizadas de forma completamente aleatorizada e nos três eixos. Contudo, para fins de calibração, apenas os eixos principais onde houveram cargas aplicadas foram levados em consideração nas análises.

As deformações mecânicas visualizadas nos eixos secundários (que não são o eixo onde a carga foi aplicada) refletem os efeitos do acoplamento mecânico presente na estrutura sob análise. Desta forma, foram percebidas deformações tanto de tração (positivas) quanto de compressão (negativas), refletidas sobre os demais eixos, as quais não necessariamente são lineares e estão diretamente correlacionadas com a estrutura mecânica da célula de carga. Para evitar este efeito, o trabalho proposto por (LEE *et al.*, 2015) (ver Figura 12) sugeriu a construção de uma célula de carga específica e com formato baseado em ângulos retos, os quais eliminaram esta característica do sistema sob análise, além de obter erros de linearidade de 0,5%. Sendo



assim, com os dados obtidos, foi possível obter as funções de transferência experimentais através da regressão linear. Como exemplo, os dados experimentais para o pedal esquerdo são apresentados na Figura 42.



**Figura 42 Funções de Transferência da Calibração do Pedal Esquerdo: a) Eixo Lateral (X); b) Eixo Paralelo (Y); c) Eixo Perpendicular (Z).**

Os erros de linearidade para cada eixo são calculados conforme as Equações (55), (56) e (57):

$$Erro_{PEX}(\%) = \frac{(3,2050V - 3,1950V) \times 100}{3,1950V} \cong 0,31\% \quad (55)$$

$$Erro_{PEY}(\%) = \frac{(2,3087V - 2,2950V) \times 100}{2,2420V} \cong 0,61\% \quad (56)$$

$$Erro_{PEZ}(\%) = \frac{(2,1410V - 2,0912V) \times 100}{3,1810V} \cong 1,56\% \quad (57)$$

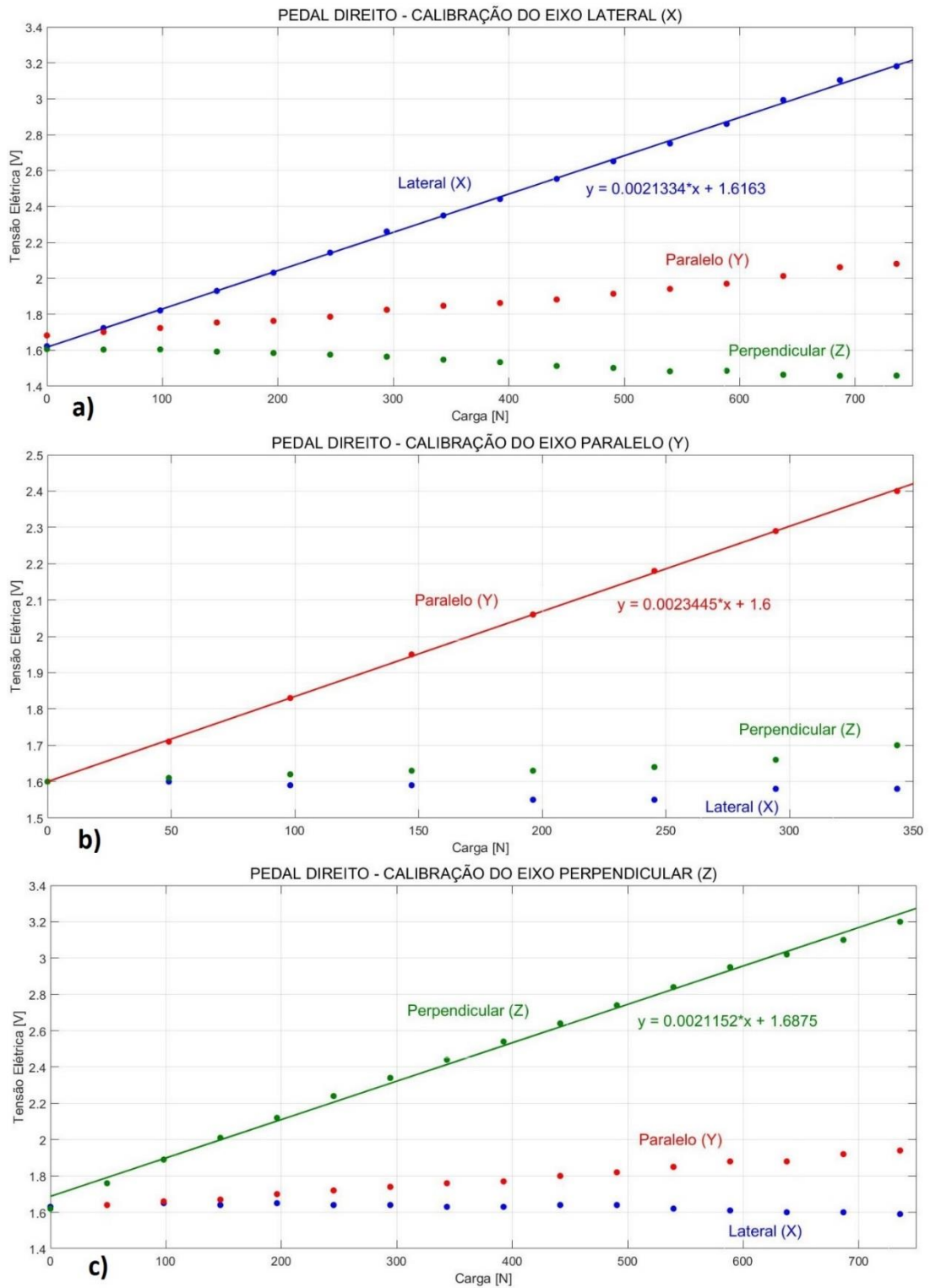
É possível observar que o maior erro de linearidade está no eixo perpendicular (Z). Os demais eixos apresentam erro de linearidade inferior a 1%. A hipótese relacionada a esta análise está vinculada à forma como a calibração foi realizada onde, neste caso, utilizou-se pesos padrão fixados por cabos na célula de carga. Esta fixação permitiu a movimentação dos pesos padrão durante as medições, além de prejudicar a posição do centro de massa que impede a aplicação uniforme das cargas de prova utilizadas nas medições. Outro importante parâmetro a ser considerado é a sensibilidade de cada eixo, a qual é calculada através das Equações (58), (59) e (60):

$$S_{PEX} = \frac{d(0,0020425x + 1,7022)}{dx} \cong 0,00204 V/N = 2,04 mV/N \quad (58)$$

$$S_{PEY} = \frac{d(0,0022822x + 1,6368)}{dx} \cong 0,00228 V/N = 2,28 mV/N \quad (59)$$

$$S_{PEZ} = \frac{d(0,0020939x + 1,6800)}{dx} \cong 0,00209 V/N = 2,09 mV/N \quad (60)$$

De forma análoga, adotou-se o procedimento para calibração dos eixos do pedal direito. As funções de transferência experimentais encontram-se na Figura 43.



**Figura 43 Funções de Transferência da Calibração do Pedal Direito: a) Eixo Lateral (X); b) Eixo Paralelo (Y); c) Eixo Perpendicular (Z).**

Os erros de linearidade dos três eixos do pedal direito são calculados através das Equações (61), (62) e (63):

$$Erro_{PDX}(\%) = \frac{(3,1100V - 3,0853V) \times 100}{3,182V} \cong 0,78\% \quad (61)$$

$$Erro_{PDY}(\%) = \frac{(2,0802V - 2,0670V) \times 100}{2,451V} \cong 0,54\% \quad (62)$$

$$Erro_{PDZ}(\%) = \frac{(3,1595V - 3,123V) \times 100}{3,254V} \cong 1,12\% \quad (63)$$

Assim como na calibração do pedal esquerdo, o maior erro de linearidade encontrado foi no eixo perpendicular (Z), enquanto que nos demais eixos o erro permanece abaixo de 1%. Resultados similares foram encontrados em (PIGATTO *et al.*, 2016), onde os erros de linearidade ficaram na faixa de 1,8% nos eixos perpendiculares e abaixo de 1% nos demais eixos dos pedivelas. Assim como mencionado anteriormente, percebeu-se que a forma como a calibração foi realizada interferiu diretamente nos resultados obtidos, pois foram utilizados pesos padrão fixados por cabos na célula de carga, os quais permitiram a movimentação dos pesos padrão durante as medições, além de prejudicar a posição do centro de massa que impede a aplicação uniforme das cargas de prova utilizadas nas medições. Isto faz com que as cargas possuam maior módulo nos pontos de contato com a célula de carga, gerando maiores deformações nos extensômetros que estão cimentados mais próximos a estes locais. Além disto, esta variação no posicionamento dos cabos dificulta a reprodução do processo de calibração, o que pode inserir novas fontes de variabilidade no sistema como um todo.

Como proposta para projetos futuros, sugere-se a utilização de um sistema de compressão com certificado de calibração válido, e que aplique de forma uniforme as cargas mecânicas sobre os pontos de interesse. Este método aproxima a situação experimental do

procedimento utilizado na validação virtual da célula de carga. Uma segunda hipótese para análise dos erros de linearidade está relacionada ao projeto mecânico estrutural das células de carga, o qual não elimina os acoplamentos mecânicos existentes entre os eixos durante as medições de deformação mecânica, conforme verificado na etapa inicial para escolha dos pontos de fixação dos extensômetros. Por fim, foram calculadas as sensibilidades dos três eixos do pedal direito, conforme apresentam as Equações (64), (65) e (66):

$$S_{PDx} = \frac{d(0,0021334x + 1,6163)}{dx} \cong 0,00213 \text{ V/N} = 2,13 \text{ mV/N} \quad (64)$$

$$S_{PDY} = \frac{d(0,0023445x + 1,6000)}{dx} \cong 0,00234 \text{ V/N} = 2,34 \text{ mV/N} \quad (65)$$

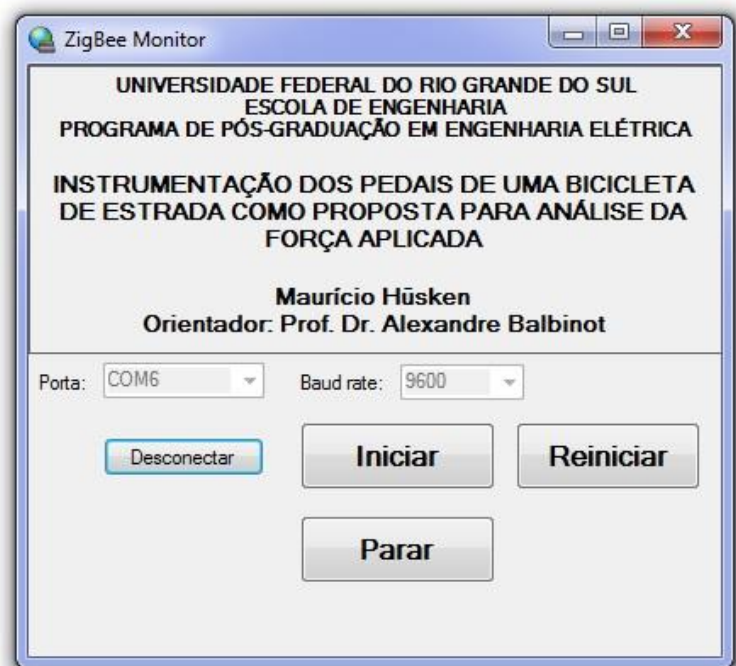
$$S_{PDZ} = \frac{d(0,0021152x + 1,6875)}{dx} \cong 0,00211 \text{ V/N} = 2,11 \text{ mV/N} \quad (66)$$

A sensibilidade máxima do pedal esquerdo foi de  $2,28 \text{ mV/N}$ , presente no eixo paralelo (Y), enquanto que o pedal direito obteve  $2,34 \text{ mV/N}$  no mesmo eixo. Isto ocorre em função do projeto estrutural mecânico da célula de carga, cuja deformação mecânica é maior nestes eixos em relação aos demais para as mesmas cargas aplicadas. Percebe-se, também, que as sensibilidades não são iguais entre os pedais e que o pedal direito apresentou diferenças de até  $+0,09 \text{ mV/N}$  em relação ao mesmo eixo do pedal esquerdo. Considerando a sensibilidade da cadeia de medição proposta, onde foi sugerido um valor de  $2,24 \text{ mV/N}$  com base nas simulações realizadas e nos cálculos teóricos para as deformações mecânicas dos extensômetros, verifica-se que os resultados experimentais estão de acordo com o projeto

teórico proposto, tendo em vista uma variação máxima de  $0,1mV/N$  entre os valores teóricos e práticos.

#### 4.2 AVALIAÇÃO DO SISTEMA PARA AQUISIÇÃO E SINCRONIZAÇÃO DOS DADOS

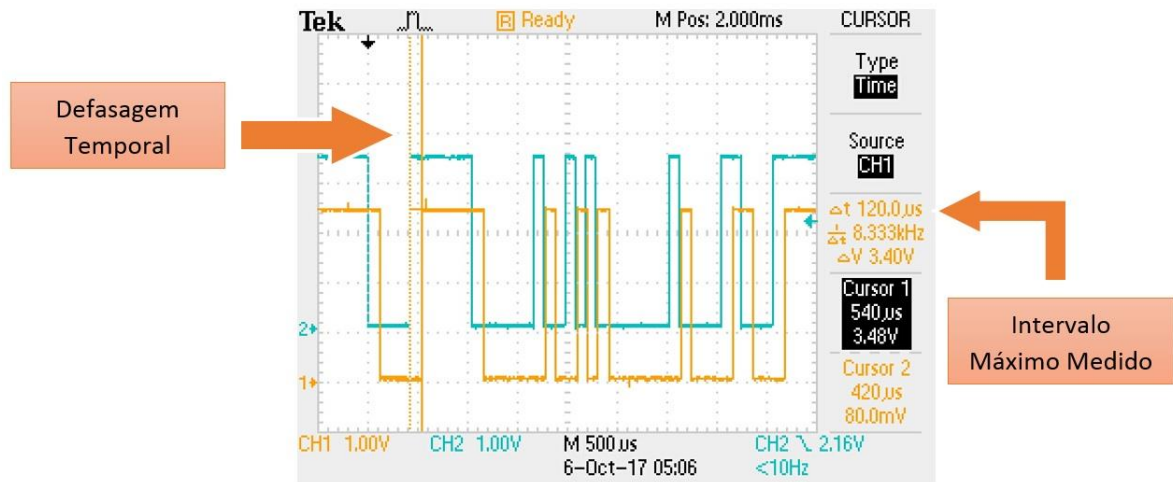
Para garantir o sincronismo entre as aquisições, uma vez que cada célula de carga possui um sistema independente dos demais, foi criada uma interface em linguagem de programação C#, utilizando o *software* Visual Studio 2015 onde, com o auxílio de um módulo XBEE e um notebook, enviou-se comandos para início, pausa e término das aquisições. Desta forma, foi possível garantir que cada subsistema começasse suas aquisições no mesmo instante de tempo, de forma a manter o sincronismo temporal do conjunto como um todo. A Figura 44 apresenta a interface simplificada que foi criada para a realização dos procedimentos experimentais.



**Figura 44 Interface criada em C# para realizar a Sincronização das Aquisições.**

Para validar o sincronismo no início das coletas de dados, foram realizados ensaios experimentais que consistiam em, basicamente, verificar o exato momento em que os comandos para início das coletas eram entregues aos microcontroladores responsáveis por gerenciar o

sistema de aquisições das células de carga. A Figura 45 apresenta, como exemplo, um dos resultados com as maiores defasagens encontradas.



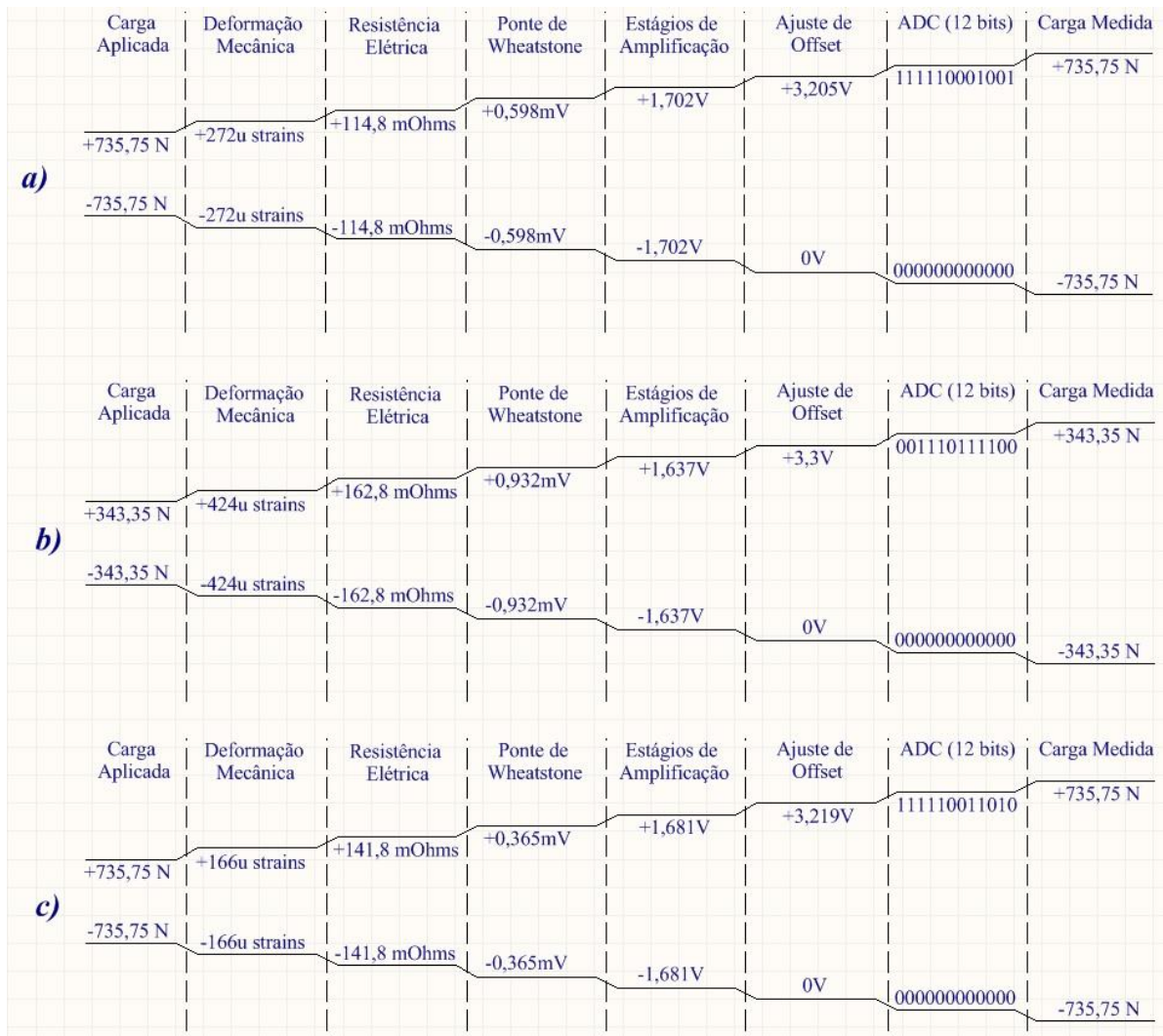
**Figura 45** Medição do *Delay* para Sincronismo entre as Aquisições de Dados.

O envio de comandos *wireless* via módulos *XBEE* foi repetido 30 vezes e os sinais elétricos foram medidos simultaneamente nos módulos receptores para verificar o exato momento em que as coletas de dados deveriam ser iniciadas. Estes sinais foram interpretados por microcontroladores ARM Cortex M0+, os quais possuem exatamente o mesmo *firmware* gravado, rodando em uma frequência de 32MHz, cuja excitação é detectada através de pinos de interrupção digitais com alta prioridade. Com isto, buscou-se garantir que o processo fosse iniciado imediatamente após a transição de borda gerada pelo recebimento dos *bytes* de comando. Ao término das medições, utilizou-se a repetição de maior *delay* como parâmetro para avaliação, onde foi obtido 120µs como maior tempo de defasagem ao longo de todas as repetições. Considerando que o fenômeno de interesse, que é a pedalada realizada pelos voluntários, possui tempo médio na ordem de ±1s por ciclo (cadência de ±60 RPM), a defasagem máxima de 120µs foi considerada insignificante, tendo em vista a diferença entre as ordens de grandeza dos dados fatores considerados.

### 4.3 DETERMINAÇÃO DA CADEIA DE MEDIÇÃO EXPERIMENTAL

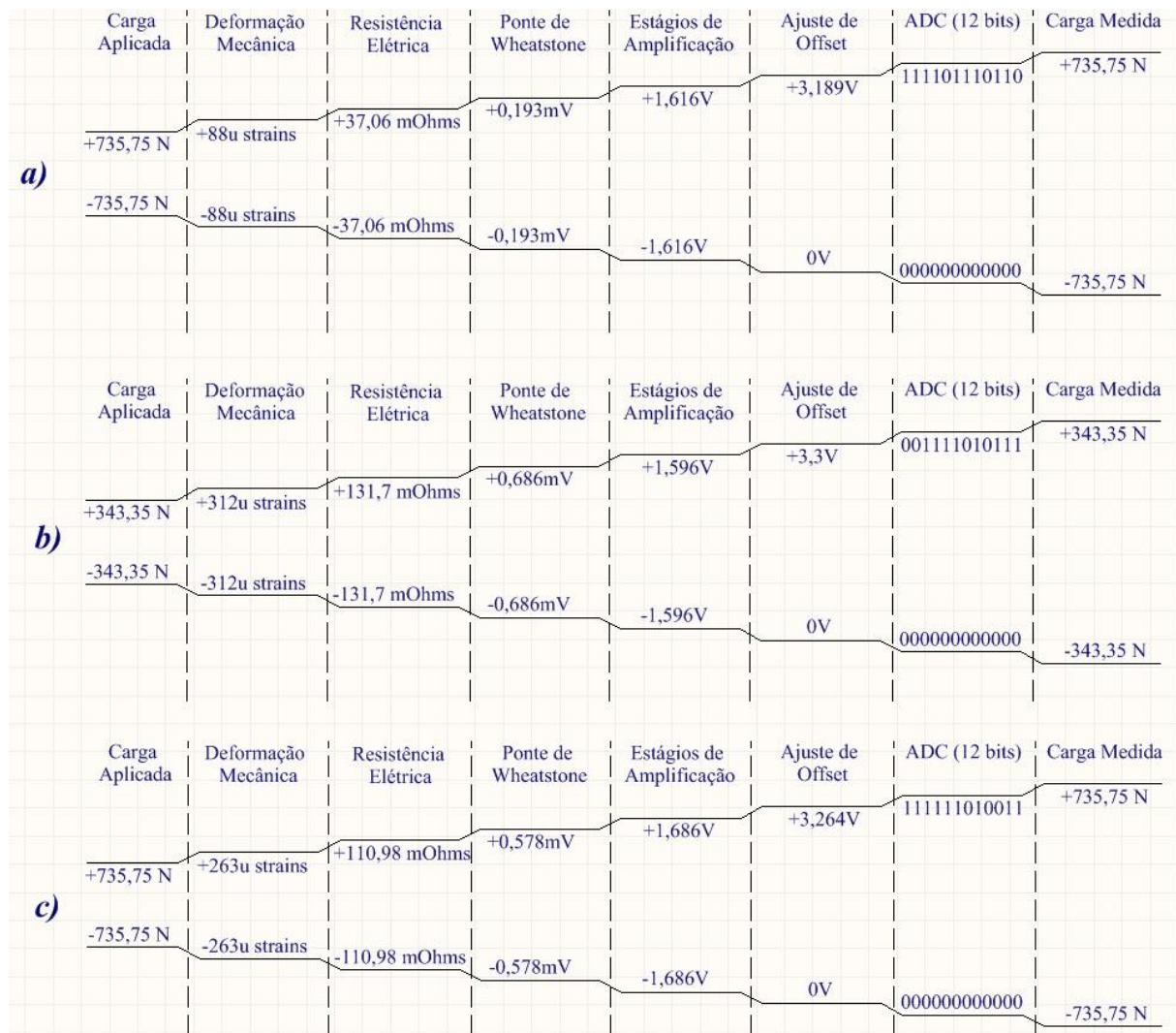
Com a realização da calibração estática e a obtenção das funções de transferência experimentais (ver Figura 42 e Figura 43), foi possível determinar as cadeias de medição experimentais de cada eixo das células de carga. Primeiramente, foram medidas as deformações mecânicas em cada eixo, de acordo com o procedimento detalhado no Capítulo 3, de modo a verificar os valores experimentais em *strains* e compará-los aos valores simulados previamente, discutindo eventuais diferenças. Feito isto, o mesmo procedimento foi repetido para que fossem medidas as tensões elétricas nas saídas das pontes de *Wheatstone*. Considerando que, com exceção do quarto estágio, todos os demais estágios de amplificação possuem ganho fixo, foi possível realizar o ajuste fino através de *trimpots* visando adequar o ganho ao fundo de escala dos conversores A/D. Nesta mesma etapa, foram ajustados os *offsets* para posicionar o ponto zero (referência para o sistema em repouso) no centro da escala de medição (+1,65V), permitindo que o sinal possa excursionar nos dois semiciclos da pedalada. Desta forma, verificou-se que as alterações entre canais ficaram restritas ao ajuste de *offset* e ao ganho aplicado no quarto estágio de amplificação (único ganho com possibilidade de ajuste) em função da variabilidade existente entre as pontes de *Wheatstone*, cimentação dos extensômetros e deformações mecânicas iniciais. Percebeu-se, também, que o fundo de escala não atingiu o *range* máximo do conversor A/D no penúltimo estágio da cadeia de medição experimental, já que foi considerado como boa prática reservar uma margem de  $\pm 0,15V$  a fim de evitar possíveis saturações durante os ensaios experimentais. Considerando todas as premissas e definições citadas anteriormente para a etapa experimental, foram determinadas as cadeias de medição experimentais para cada um dos três eixos do pedal esquerdo, conforme apresentado pela Figura 46.





**Figura 46 Cadeias de Medição Experimentais do Pedal Esquerdo: a) Eixo Lateral (X); b) Eixo Paralelo (Y); c) Eixo Perpendicular (Z).**

Considerando o mesmo procedimento para determinação das cadeias de medição experimentais para o pedal direito, foi possível realizar a análise e comparação entre os dados experimentais de ambas as células de carga, verificando as diferenças construtivas e mecânicas existentes em cada estrutura, além de verificar as diferenças relacionadas à cadeia de medição proposta no Capítulo 3. Sendo assim, as cadeias de medição experimentais referentes a cada um dos três eixos do pedal direito são apresentadas na Figura 47.



**Figura 47 Cadeias de Medição Experimentais do Pedal Direito: a) Eixo Lateral (X); b) Eixo Paralelo (Y); c) Eixo Perpendicular (Z).**

Os resultados mostram diferenças máximas de  $\pm 184\mu\epsilon$  entre a segunda etapa das cadeias de medição experimentais para o eixo paralelo em relação aos valores obtidos nas simulações com o SolidWorks 2015. Assim como foi discutido na seção 4.1, estas variações foram atreladas às diferenças construtivas dos pedais que, apesar de serem do mesmo modelo, não são exatamente iguais. Além disto, o procedimento de calibração foi realizado de forma independente para cada célula de carga onde, em cada caso, se procurou manter o posicionamento dos pesos padrão o mais próximo possível, mas que evidentemente não são iguais e acabaram inserindo erros e variações nas cargas aplicadas para cada calibração. Como

a tensão elétrica na saída das pontes de *Wheatstone* está diretamente relacionada com a deformação mecânica dos extensômetros, percebe-se que o *range* varia de canal para canal e, também, entre células de carga. Desta forma, fica evidente que estas variações afetam diretamente o ajuste de ganho ao longo dos estágios de calibração, os quais foram definidos conforme valores apresentados na Tabela 11.

**Tabela 11 Relação de Ganhos Experimentais por Estágio de Amplificação**

Eixo	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3	Estágio 4	Estágio 5	Ganho Total
Pedal Esquerdo - Lateral	5	5,54	11	4,67	2	2846
Pedal Esquerdo - Paralelo	5	5,54	11	2,88	2	1756
Pedal Esquerdo - Perpendicular	5	5,54	11	7,56	2	4605
Pedal Direito - Lateral	5	5,54	11	13,74	2	8373
Pedal Direito - Paralelo	5	5,54	11	3,82	2	2326
Pedal Direito - Perpendicular	5	5,54	11	4,79	2	2917

As diferenças verificadas entre as deformações mecânicas virtuais e experimentais que estão no início da cadeia de medição (segunda etapa) e que refletem nos valores das etapas posteriores, são responsáveis pelas diferenças evidenciadas entre os ganhos teóricos e experimentais. Contudo, os valores teóricos foram imprescindíveis para avaliação da ordem de grandeza dos ganhos que seriam necessários em cada canal, os quais fundamentaram na íntegra o projeto do circuito de condicionamento. Para fins de comparação, o projeto das células de carga criado por (PIGATTO *et al.*, 2016) e que faz parte da avaliação realizada nesta dissertação, obteve ganhos entre 730 e 2230V/V, considerando os mesmos fundos de escala para as cargas aplicadas. No entanto, é importante salientar que nos pedivelas os extensômetros foram cimentados em uma estrutura plana e desenvolvida especificamente para esta análise de deformações mecânicas e medição de forças.

#### 4.4 ANÁLISE DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Nesta etapa, foram analisadas as propagações das incertezas de medição para os circuitos analógicos. Para facilitar a análise, os circuitos foram divididos em blocos, apresentados em subseções.

##### 4.4.1 Análise da Incerteza de Medição para a Ponte de *Wheatstone*

A função de transferência para uma ponte de *Wheatstone* completa com quatro elementos ativos é dada pela Equação (67):

$$VOUT1 = (+V\_PONTE) \cdot \frac{SG3 \cdot SG2 - SG1 \cdot SG4}{(SG1 + SG2) \cdot (SG3 + SG4)} \quad (67)$$

onde  $VOUT1$  é a tensão elétrica de saída da ponte, em [V],  $+V\_PONTE$  é a tensão elétrica de alimentação da ponte, em [V], e  $SG1, SG2, SG3$  e  $SG4$  são as resistências elétricas dos extensômetros, em [ $\Omega$ ]. Considerando a característica da tensão de alimentação da ponte de *Wheatstone* que é fornecida pelo circuito integrado INA125U ( $1,25V \pm 0,5\%$ ) e os dados referentes aos extensômetros utilizados ( $120\Omega \pm 1\%$ ), calculou-se as incertezas padrão do Tipo B, considerando distribuições retangulares com infinitos graus de liberdade, além da descorrelação entre as variáveis, as quais resultam na incerteza combinada, conforme apresentam as Equações (68) e (69):

$$\mu_{c\_VOUT1} = \sqrt{\left(\frac{\partial(VOUT1)}{\partial(+V\_PONTE)}\right)^2 \cdot (\sigma_{(+V\_PONTE)})^2 + \left(\frac{\partial(VOUT1)}{\partial SG1}\right)^2 \cdot (\sigma_{SG1})^2 + \left(\frac{\partial(VOUT1)}{\partial SG2}\right)^2 \cdot (\sigma_{SG2})^2 + \left(\frac{\partial(VOUT1)}{\partial SG3}\right)^2 \cdot (\sigma_{SG3})^2 + \left(\frac{\partial(VOUT1)}{\partial SG4}\right)^2 \cdot (\sigma_{SG4})^2} \quad (68)$$

$$\mu_{C\_VOU1} = \sqrt{0 + \left(-\frac{1}{480}\right)^2 \cdot \left(\frac{1,2}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{1}{480}\right)^2 \cdot \left(\frac{1,2}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{1}{480}\right)^2 \cdot \left(\frac{1,2}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(-\frac{1}{480}\right)^2 \cdot \left(\frac{1,2}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad (69)$$

$$\mu_{C\_VOU1} = 2,89mV \quad (70)$$

Considerando uma distribuição gaussiana e um intervalo de confiança de 95%, utilizou-se o fator de expansão  $k = 2$  para infinitos graus de liberdade, o qual possibilitou obter a incerteza expandida  $U = 5,78mV$ . Desta forma, a tensão elétrica de saída da ponte de *Wheatstone* é dada pela Equação (71):

$$VOU1 = 1,65V \pm 5,78mV \quad (71)$$

Para analisar a incerteza de medição da sensibilidade da ponte em função da deformação mecânica relativa, realizou-se a derivada da função de transferência, conforme apresentado na Equação (72):

$$S_{VOU1} = \frac{\partial((+V\_PONTE) \cdot FG \cdot \varepsilon)}{\partial \varepsilon} = (+V\_PONTE) \cdot FG \quad (72)$$

onde  $S_{VOU1}$  é a sensibilidade da ponte de *Wheatstone*, em  $[V/\varepsilon]$ ,  $+V\_PONTE$  é a tensão elétrica de alimentação da ponte, em  $[V]$ ,  $FG$  é o fator *gage* informado pelo fabricante do extensômetro e  $\varepsilon$  é a deformação mecânica relativa, em  $[strains]$ . Sendo assim, a incerteza combinada da sensibilidade da ponte é dada pela Equação (73):

$$\mu_{C\_SVOU1} = \sqrt{\left(\frac{\partial S_{VOU1}}{\partial(+V\_PONTE)}\right)^2 \cdot (\sigma_{(+V\_PONTE)})^2 + \left(\frac{\partial S_{VOU1}}{\partial FG}\right)^2 \cdot (\sigma_{FG})^2} \quad (73)$$

$$\mu_{C\_SVOU1} = \sqrt{(1,76)^2 \cdot \left(\frac{1,25 \cdot 0,005}{\sqrt{3}}\right)^2 + (1,25)^2 \cdot \left(\frac{1,76 \cdot 0,015}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad (74)$$

$$\mu_{C_{S_{VOUT1}}} = 0,0201 V/\varepsilon \quad (75)$$

Logo, a incerteza expandida, considerando um fator de expansão  $k = 2$  para infinitos graus de liberdade, distribuição gaussiana, descorrelação entre as variáveis e intervalo de confiança de 95%, é dada pela Equação (76):

$$U_{S_{VOUT1}} = 0,0402 V/\varepsilon \quad (76)$$

Estes valores calculados representam a incerteza de medição para todos os eixos das células de carga, já que todos os extensômetros são de mesmo modelo, com valores e tolerâncias nominais iguais. Sendo assim, a sensibilidade das pontes de *Wheatstone* é dada pela Equação (77):

$$S_{VOUT1} = (2,2 \pm 0,0402) \frac{V}{\varepsilon} = 2,2 \frac{V}{\varepsilon} \pm 1,83\% \quad (77)$$

#### 4.4.2 Análise da Incerteza de Medição para o Circuito de Condicionamento

Considerando a tensão elétrica de saída da ponte de *Wheatstone* em função da deformação mecânica, tem-se a função de transferência para a tensão elétrica de saída do circuito de condicionamento. Os cálculos foram demonstrados para o eixo lateral do pedal esquerdo, mas posteriormente foram calculados para os demais canais, conforme apresentado pela Equação (78), enquanto que a sensibilidade é dada pela Equação (79):

$$V_{OUT6\_LE} = V_{OUT1\_LE} \cdot FG \cdot \varepsilon \cdot \left(4 + \frac{60000}{RG}\right) \cdot \left(1 + \frac{R_{14}}{R_{19}}\right) \cdot \left(1 + \frac{R_{11}}{R_{15}}\right) \cdot \left(1 + \frac{R_{12} + T_2}{R_{17}}\right) \cdot \left(1 + \frac{R_{13}}{R_{18}}\right) + \frac{+V_{AD}}{2} \quad (78)$$

$$S_{V_{OUT6\_LE}} = V_{OUT1\_LE} \cdot FG \cdot \left(4 + \frac{60000}{RG}\right) \cdot \left(1 + \frac{R_{14}}{R_{19}}\right) \cdot \left(1 + \frac{R_{11}}{R_{15}}\right) \cdot \left(1 + \frac{R_{12} + T_2}{R_{17}}\right) \cdot \left(1 + \frac{R_{13}}{R_{18}}\right) \quad (79)$$

onde  $VOUT6\_LE$  é a tensão elétrica de saída do circuito de condicionamento do eixo lateral do pedal esquerdo, em [V],  $VOUT1\_LE$  é a tensão elétrica de alimentação da ponte, em [V],  $FG$  é o fator *gage* dos extensômetros,  $\varepsilon$  é a deformação mecânica relativa dos extensômetros, em [strains],  $R_{(X \in \mathbb{R})}$  são as resistências elétricas de cada estágio de amplificação, em [ $\Omega$ ],  $+V\_AD$  é a tensão elétrica de referência para o conversor A/D, em [V], e  $S_{VOUT1\_LE}$  é a sensibilidade da ponte referente ao eixo lateral do pedal esquerdo, em [V/ $\varepsilon$ ]. A incerteza combinada para a sensibilidade de saída do circuito de condicionamento para o eixo paralelo do pedal esquerdo, considerando a descorrelação entre as variáveis e um índice de confiança de 95%, é apresentada na Equação (80):

$$\mu_{C\_S_{VOUT6\_LE}} = \sqrt{\left(\frac{\partial S_{VOUT6\_LE}}{\partial VOUT1\_LE}\right)^2 \cdot (\sigma_{VOUT1\_LE})^2 + \left(\frac{\partial S_{VOUT6\_LE}}{\partial FG}\right)^2 \cdot (\sigma_{FG})^2 + \left(\frac{\partial S_{VOUT6\_LE}}{\partial R_G}\right)^2 \cdot (\sigma_{R_G})^2 + \left(\frac{\partial S_{VOUT6\_LE}}{\partial R_{14}}\right)^2 \cdot (\sigma_{R_{14}})^2 + \left(\frac{\partial S_{VOUT6\_LE}}{\partial R_{19}}\right)^2 \cdot (\sigma_{R_{19}})^2 + \left(\frac{\partial S_{VOUT6\_LE}}{\partial R_{11}}\right)^2 \cdot (\sigma_{R_{11}})^2 + \left(\frac{\partial S_{VOUT6\_LE}}{\partial R_{15}}\right)^2 \cdot (\sigma_{R_{15}})^2 + \left(\frac{\partial S_{VOUT6\_LE}}{\partial R_{12}}\right)^2 \cdot (\sigma_{R_{12}})^2 + \left(\frac{\partial S_{VOUT6\_LE}}{\partial T_2}\right)^2 \cdot (\sigma_{T_2})^2 + \left(\frac{\partial S_{VOUT6\_LE}}{\partial R_{17}}\right)^2 \cdot (\sigma_{R_{17}})^2 + \left(\frac{\partial S_{VOUT6\_LE}}{\partial R_{13}}\right)^2 \cdot (\sigma_{R_{13}})^2 + \left(\frac{\partial S_{VOUT6\_LE}}{\partial R_{18}}\right)^2 \cdot (\sigma_{R_{18}})^2} \quad (80)$$

$$\mu_{C\_S_{VOUT6\_LE}} = \sqrt{(5008,78)^2 \cdot (0,0036)^2 + (3557,73)^2 \cdot (0,01524)^2 + (0,021)^2 \cdot (0,0003)^2 + (0,514)^2 \cdot (57,74)^2 + (2,335)^2 \cdot (12,70)^2 + (0,259)^2 \cdot (127,02)^2 + (2,587)^2 \cdot (12,70)^2 + (1,341)^2 \cdot (5,774)^2 + (1,341)^2 \cdot (15,415)^2 + (4,920)^2 \cdot (5,774)^2 + (0,031)^2 \cdot (577,35)^2 + (0,031)^2 \cdot (577,35)^2} \quad (81)$$

$$\mu_{C\_S_{VOUT6\_LE}} = 95,6 \text{ V}/\varepsilon \quad (82)$$

Logo, a incerteza expandida, considerando um fator de expansão  $k = 2$  para infinitos graus de liberdade, intervalo de confiança de 95% e descorrelação entre as variáveis é  $U_{S_{VOUT6,LE}} = 191,13 V/\varepsilon$ , resultando na sensibilidade apresentada pela Equação (83):

$$S_{VOUT6,LE} = (6260,98 \pm 191,13) \frac{V}{\varepsilon} = 6260,98 \frac{V}{\varepsilon} \pm 3,05\% \quad (83)$$

As incertezas expandidas para os demais canais foram calculadas de forma similar ao procedimento adotado para o eixo lateral do pedal esquerdo, cujos valores são apresentados na Tabela 12:

**Tabela 12 Sensibilidade e Incerteza de Medição para cada Eixo**

Eixo	Sensibilidade do Eixo [V/ε]	Incerteza de Medição da Sensibilidade do Eixo [V/ε]
Pedal Esquerdo - Lateral	6260,98	±191 (±3,05%)
Pedal Esquerdo - Paralelo	3861,16	±115 (±2,98%)
Pedal Esquerdo - Perpendicular	10135,54	±316 (±3,12%)
Pedal Direito - Lateral	18420,94	±586 (±3,18%)
Pedal Direito - Paralelo	5121,40	±155 (±3,02%)
Pedal Direito - Perpendicular	6421,86	±196 (±3,06%)

A incerteza de medição da saída de tensão das pontes de *Wheatstone* e das etapas de ganho é ocasionada, entre outros fatores, pela utilização de extensômetros e componentes (resistores) com tolerância de 1%. Embora a tensão elétrica de alimentação das pontes também seja um dos fatores que contribuem para a incerteza combinada, verificou-se que esta incerteza padrão pode ser considerada insignificante frente às incertezas dos resistores. É importante ressaltar, também, que os resistores não devem possuir tolerância superior à tolerância dos extensômetros, já que estes são os responsáveis por medir a deformação mecânica que está diretamente relacionada com a grandeza de interesse que é a carga aplicada sobre as células de carga. Além disto, foram desconsiderados os circuitos internos dos amplificadores operacionais, capacitores e canais de conversão A/D, para facilitar a análise. A profundidade



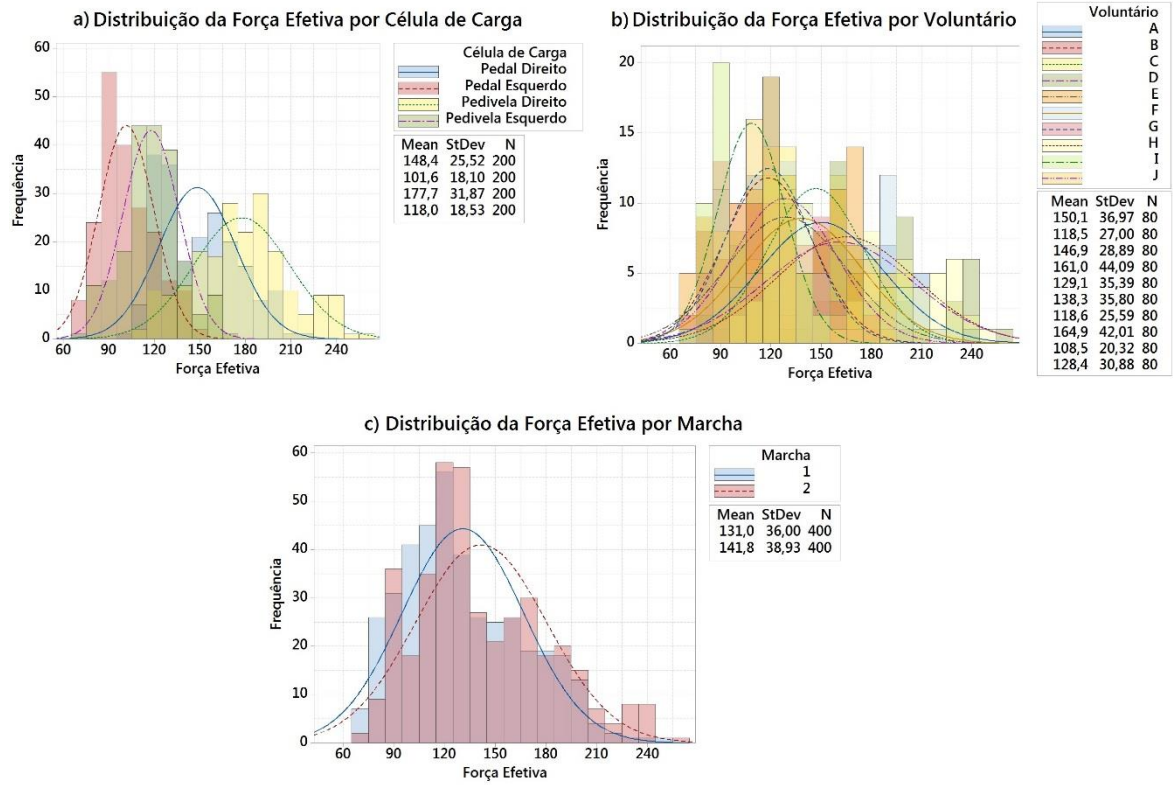
desta avaliação pode ser tão abrangente quanto for desejado, onde torna-se possível avaliar, inclusive, os modelos elétricos de cada componente, características vinculadas ao ruído elétrico gerado, entre outras, as quais afetam a incerteza de medição, mas que não são o foco desta dissertação.

#### **4.5 ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS**

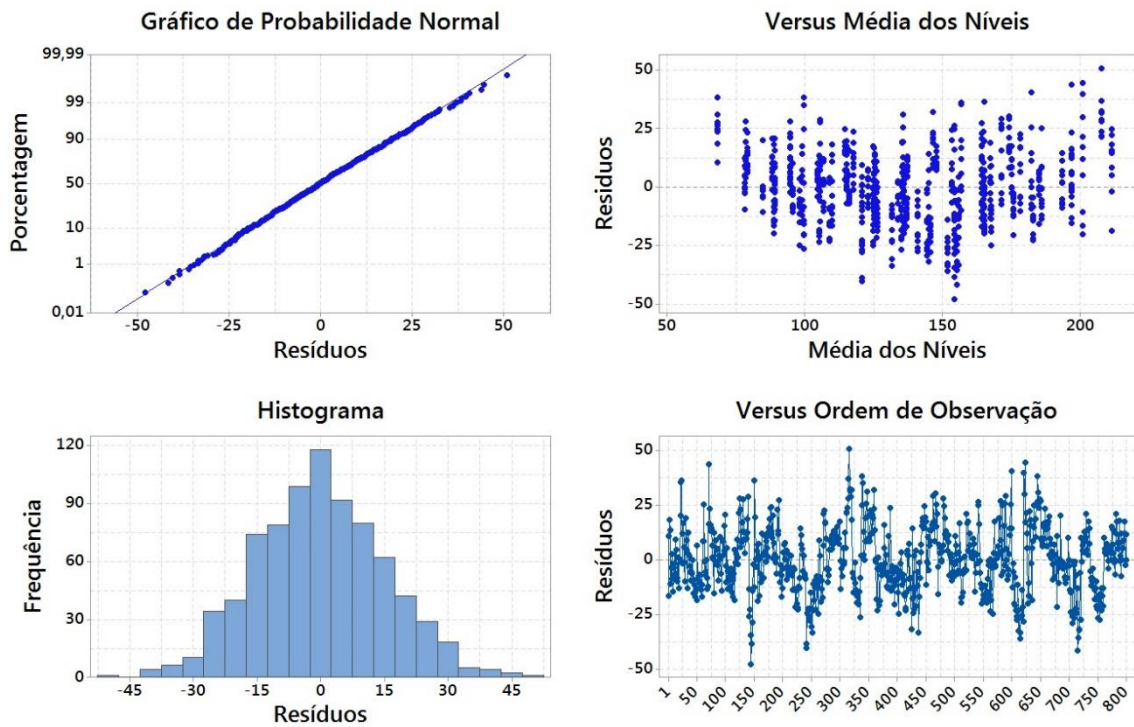
Antes de conduzir a análise estatística, foram verificadas algumas premissas básicas referentes aos dados coletados, as quais permitem validar estatisticamente o modelo proposto para a correspondente análise. Feito isto, foram realizadas as Análises de Variância considerando três fatores analisados: Voluntários, Células de Carga e Marcha da Bicicleta. Como variáveis de resposta, foram consideradas: Força Efetiva, Força Resultante e Potência Mecânica. Para os dados que apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre si através das Tabelas de Análise de Variância, foram realizadas comparações através de gráficos com o intuito de facilitar a compreensão e visualização entre os mesmos.

##### **4.5.1 Análise Estatística dos Dados para a Força Efetiva**

Primeiramente, foi verificado se os dados referentes à força efetiva seguem uma distribuição gaussiana. Para isto, foi utilizada a ferramenta de análise estatística *Minitab 17 Stats Tool*, a qual possibilitou comprovar que, de fato, os dados seguem a distribuição mencionada, conforme apresentado pela Figura 48. Além disso, é importante avaliar, seja através da análise dos resíduos, que foi o método escolhido para esta dissertação, se as médias dos níveis não seguem modelos óbvios ou se possuem correlações que descaracterizem o princípio da aleatoriedade dos erros. Para isto, foi verificado se nenhum dos gráficos de média dos níveis ou ordem de observação dos dados seguem qualquer comportamento sistemático, o qual indicaria a existência de alguma variável extra que influenciou os dados coletados, de modo a prejudicar os resultados obtidos. A análise dos resíduos é apresentada pela Figura 49.

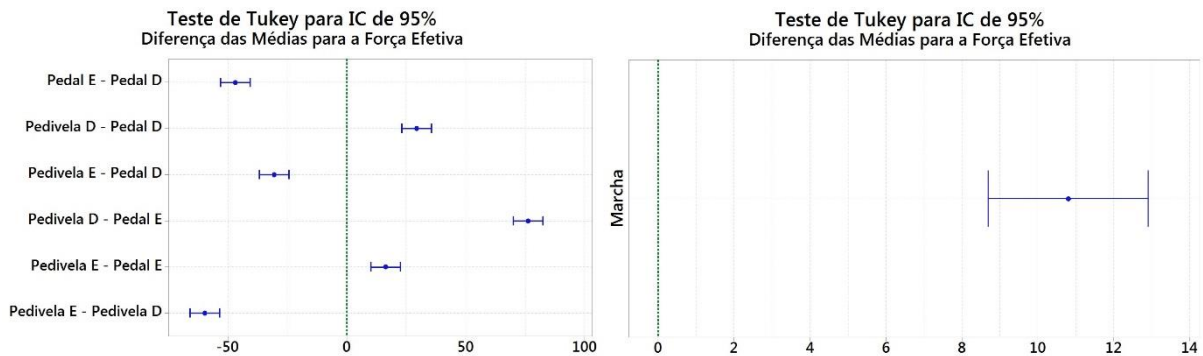


**Figura 48** Avaliação da distribuição da Força Efetiva por: a) Célula de Carga; b) Voluntário; c) Marcha.



**Figura 49** Análise dos Resíduos para verificação de uso do modelo para Força Efetiva.

Através da análise de resíduos e dos histogramas da Figura 48, verificou-se o comportamento de uma distribuição normal para os dados da força efetiva, além de ser descorrelacionado e não óbvio, ou seja, sem nenhuma estrutura aparente. Sendo assim, confirma-se a hipótese de aleatoriedade dos erros referentes à força efetiva, além da variância ser considerada constante para todos os níveis do fator analisado. Ainda como parte da análise, foi proposta, também, a verificação das médias através do Método de Comparação Múltipla de *Tukey*, conforme apresentado na Figura 50.



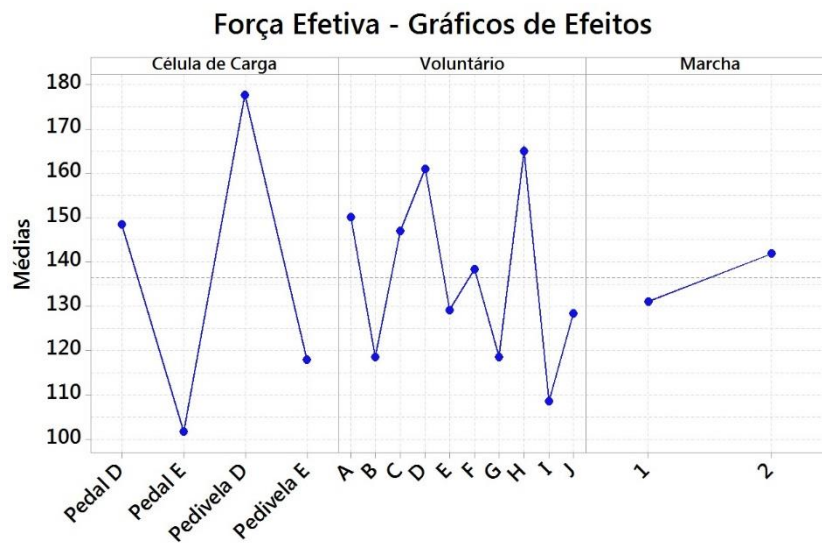
**Figura 50 Avaliação das Médias da Força Efetiva através do Método de Comparação Múltipla de *Tukey*.**

Pelo método proposto, é possível afirmar que todas as médias das forças efetivas se diferem significativamente, tendo em vista que excluem o zero. Além disso, não é verificada nenhuma interação entre os fatores. Por fim, com a verificação das premissas básicas, tornou-se possível realizar a Análise de Variância, a qual é apresentada na Tabela 13.

**Tabela 13 Resultado da Análise de Variância para a Força Efetiva.**

<b>Análise de Variância - Força Efetiva</b>						
<b>Fatores Controláveis</b>	<b>Graus de Liberdade</b>	<b>Soma dos Quadrados</b>	<b>Médias Quadráticas</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor P</b>	<b>Hipótese</b>
Voluntário	9	260517	28946	125,45	0,000	H1 (Signif.)
Célula de Carga	3	679714	226571	981,97	0,000	H1 (Signif.)
Marcha	1	23316	23316	101,05	0,000	H1 (Signif.)
Erro	786	181354	231			
Total	799	1144902				

Pela análise de variância, o valor-p (0,000) fornece evidência suficiente de que a força efetiva aplicada é diferente para pelo menos um dos fatores controláveis em relação aos demais, quando  $\alpha = 0,05$ , ou seja, a força efetiva é dependente do voluntário, da célula de carga e da marcha. É importante ressaltar que, considerando que os três fatores analisados foram bloqueados, não foram consideradas interações entre os fatores. Para uma melhor compreensão dos resultados, a Figura 51 apresenta o gráfico com as análises dos efeitos por fator analisado.



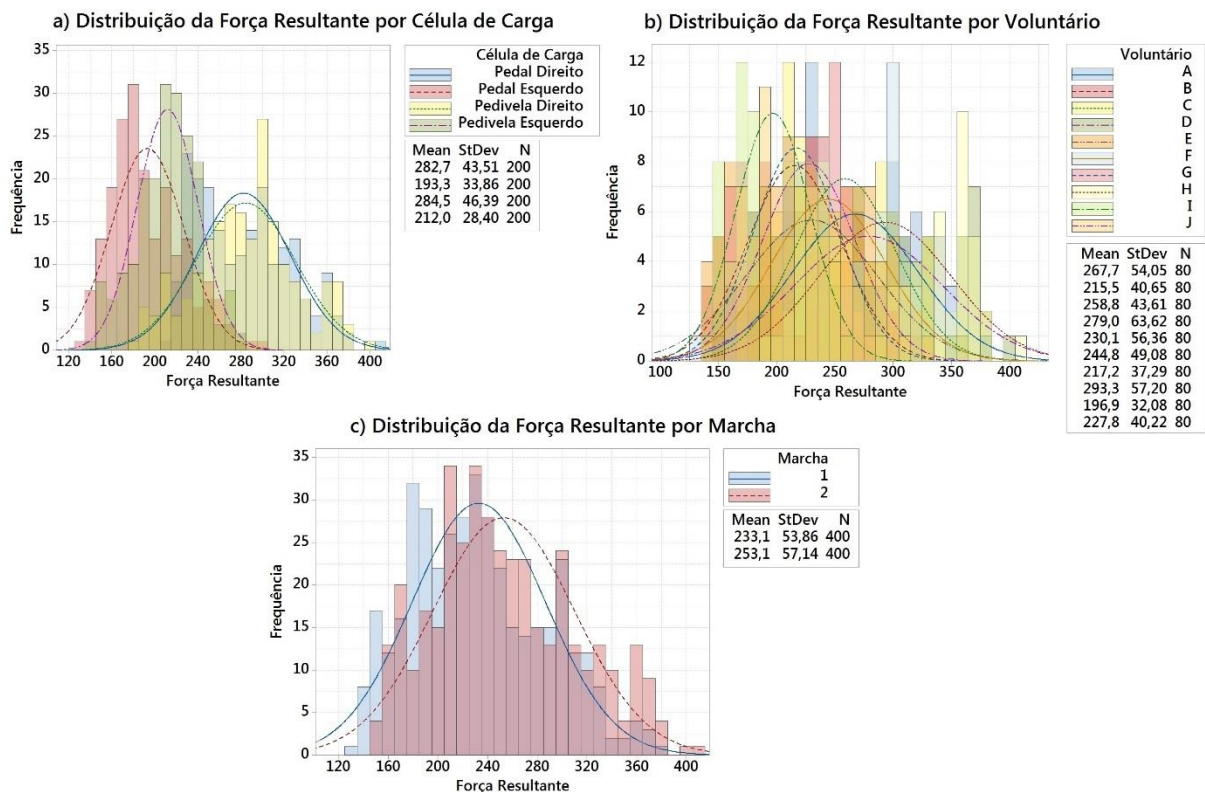
**Figura 51 Análise dos Efeitos para a Força Efetiva.**

Pelo gráfico de efeitos principais, percebe-se que cada célula de carga possui uma força efetiva diferente, sendo que, para as duas células de carga do lado direito da bicicleta as médias de forças efetivas foram maiores do que as forças do lado esquerdo. Fica claro que, mesmo para as células de carga que estão do mesmo lado da bicicleta, existem diferenças significativas nas forças medidas em cada uma, sendo que, em média, os pedivelas apresentaram forças efetivas em torno de 20% maiores do que os pedais. Percebe-se, também, que os voluntários aplicaram forças médias distintas ao longo das *sprints*, sendo que o Voluntário H aplicou a maior média de força, enquanto que o Voluntário I a menor média entre todos os voluntários presentes neste estudo. Por fim, verificou-se que as marchas também afetam de forma significativa a força efetiva aplicada, sendo que, em média, os maiores módulos de força foram medidos na marcha

2, a qual impõe maior atrito na pedalada. Para melhor compreensão, foi proposta uma discussão e análise mais aprofundada a partir da Seção 4.5.4.

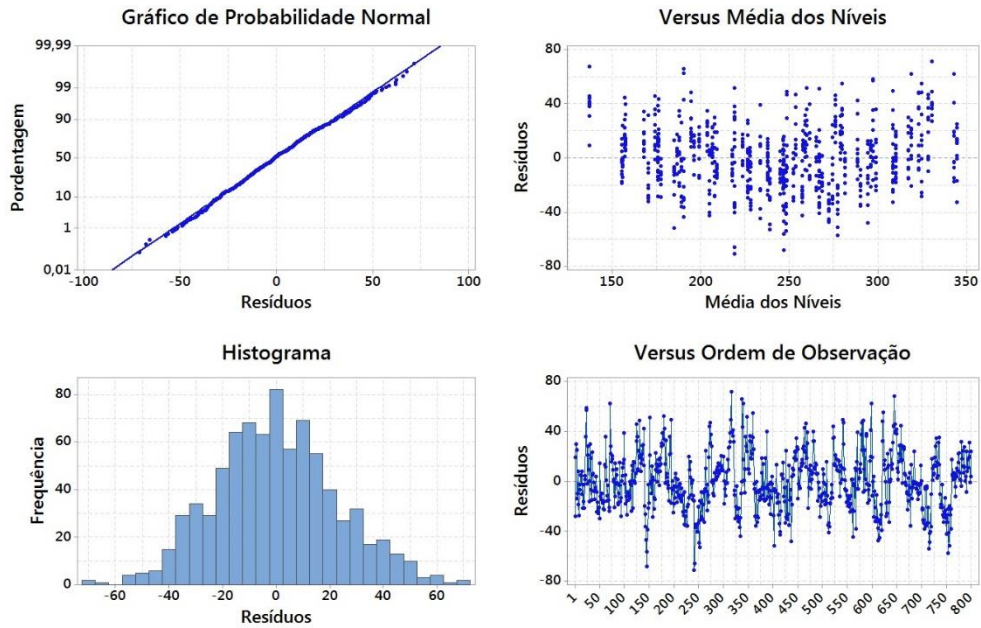
#### 4.5.2 Análise Estatística dos Dados para a Força Resultante

Assim como na seção anterior, foi realizada a verificação da distribuição dos dados, agora para a força resultante, conforme apresenta a Figura 52. Considerando que as forças resultantes seguem uma distribuição normal para os três fatores controláveis analisados, realizou-se a análise dos resíduos, com o intuito de verificar as premissas básicas para a utilização dos métodos estatísticos propostos onde, conforme já mencionado, a distribuição dos erros deve seguir um comportamento aleatório e sem nenhum modelo aparente. O resultado desta verificação é apresentado pela Figura 53.



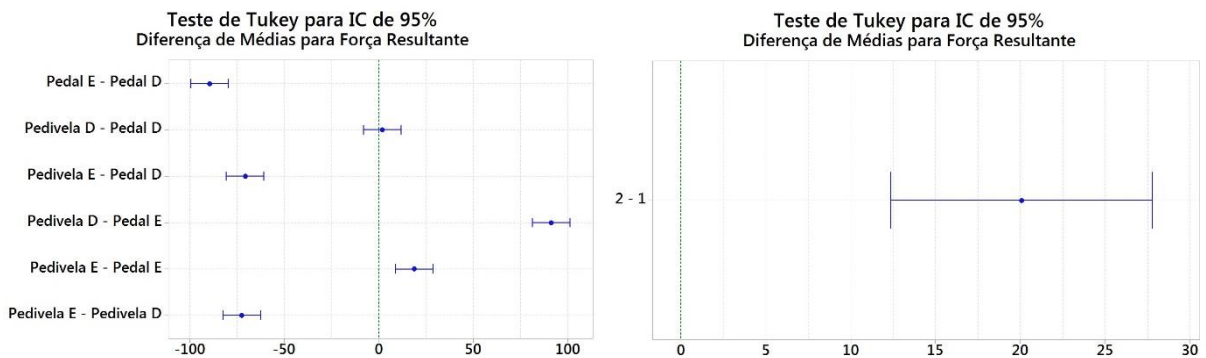
**Figura 52** Avaliação da distribuição da Força Resultante por: a) Célula de Carga; b) Voluntário;

c) Marcha.



**Figura 53** Análise dos Resíduos para verificação de uso do modelo para Força Resultante.

Através da análise de resíduos, verifica-se o comportamento de uma distribuição normal, além de ser descorrelacionado e não óbvio, ou seja, sem nenhuma estrutura aparente. Da mesma forma como observado com a força efetiva, confirma-se a hipótese de aleatoriedade dos erros referentes à força resultante, além da variância ser considerada constante para todos os níveis do fator analisado. A verificação das médias foi realizada através do Método de Comparação Múltipla de *Tukey*, o qual é apresentado na Figura 54.



**Figura 54** Avaliação das Médias da Força Resultante através do Método de Comparação Múltipla de *Tukey*.

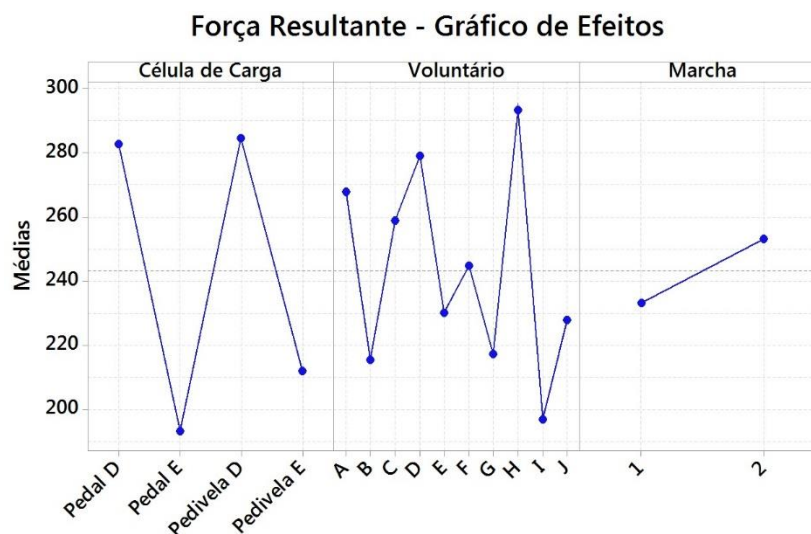


Pelo método proposto, verifica-se que, para um intervalo de confiança de 95%, apenas as médias de forças resultantes no pedal e pedivela direitos não podem ser consideradas significativas, ou seja, não é possível descartar a hipótese nula. Todas as demais médias se diferem significativamente, tendo em vista que excluem o zero, tanto entre células de carga quanto entre as marchas consideradas. A Análise de Variância, é apresentada na Tabela 14.

**Tabela 14 Resultado da Análise de Variância para a Força Resultante.**

<i>Análise de Variância - Força Resultante</i>						
<i>Fatores Controláveis</i>	<i>Graus de Liberdade</i>	<i>Soma dos Quadrados</i>	<i>Médias Quadráticas</i>	<i>Valor F</i>	<i>Valor P</i>	<i>Hipótese</i>
Voluntário	9	690810	76757	142,86	0	H1 (Signif.)
Célula de Carga	3	1347215	449072	835,79	0	H1 (Signif.)
Marcha	1	80471	80471	149,77	0	H1 (Signif.)
Erro	786	422317	537			
Total	799	2540813				

Assim como na análise realizada para a força efetiva, o valor-p (0,000) fornece evidência suficiente de que a força resultante aplicada é diferente para pelo menos um dos fatores controláveis em relação aos demais, quando  $\alpha = 0,05$ , ou seja, a força resultante é dependente das células de carga, dos voluntários e das marchas. Para uma melhor compreensão dos resultados, a Figura 55 apresenta o gráfico com as análises dos efeitos por fator analisado.



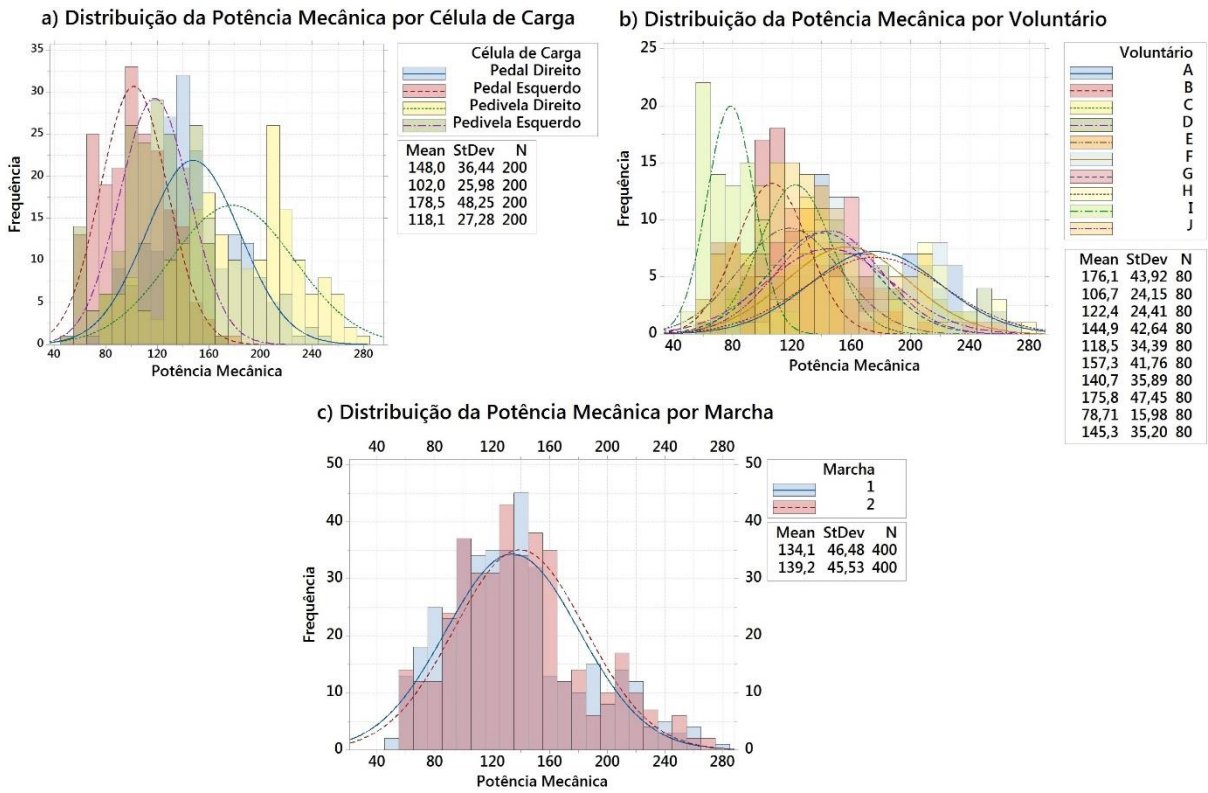
**Figura 55 Análise dos Efeitos para a Força Resultante.**

Assim como na ocorrência com a análise da força efetiva, percebeu-se que as células de carga do lado direito da bicicleta obtiveram maiores módulos de força em relação às células de carga do lado esquerdo. No entanto, não fica clara a mesma diferença próxima aos 20% que foi evidenciada na força efetiva, quando se avalia as células de carga do lado esquerdo. Como hipótese, considerou-se diferenças vinculadas à cimentação dos extensômetros e ao processo de calibração das pontes de *Wheatstone*, as quais são discutidas de forma mais relevante e completa na Seção 4.5.4. As forças resultantes possuem um comportamento similar aos dados verificados para as forças efetivas quando avaliadas sob o ponto de vista dos voluntários, de forma que os maiores efeitos continuam sendo produzidos pelo Voluntário H, enquanto que os menores módulos de força foram obtidos pelo Voluntário I. O mesmo pode ser constatado para as marchas, uma vez que o maior atrito foi vinculado à marcha 2, a qual resulta na maior aplicação de forças para a manutenção da velocidade e cadência.

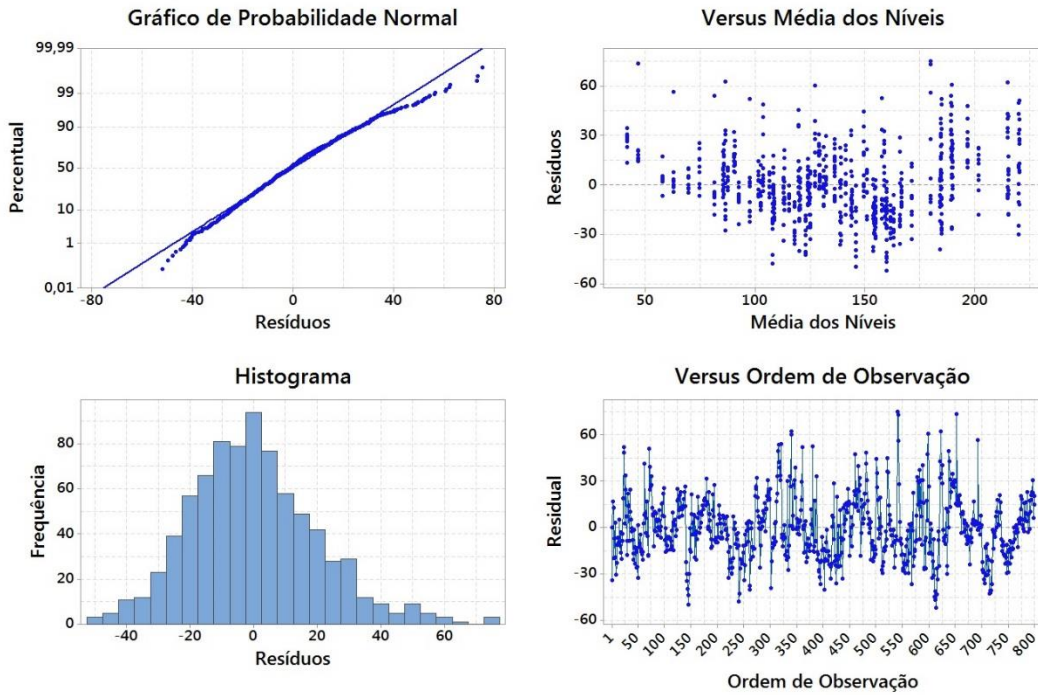
#### **4.5.3 Análise Estatística dos Dados para a Potência Mecânica**

A terceira e última análise estatística é realizada para a potência mecânica calculada com base no torque e nas forças efetivas medidas. Assim como na seção anterior, foi realizada a verificação da distribuição dos dados, conforme apresenta a Figura 56. Considerando que a potência mecânica segue uma distribuição normal para os três fatores controláveis analisados, realizou-se a análise dos resíduos, com o intuito de verificar as premissas básicas para a utilização dos métodos estatísticos propostos onde, conforme já mencionado, a distribuição dos erros deve seguir um comportamento aleatório e sem nenhum modelo aparente. O resultado desta verificação é apresentado pela Figura 57.



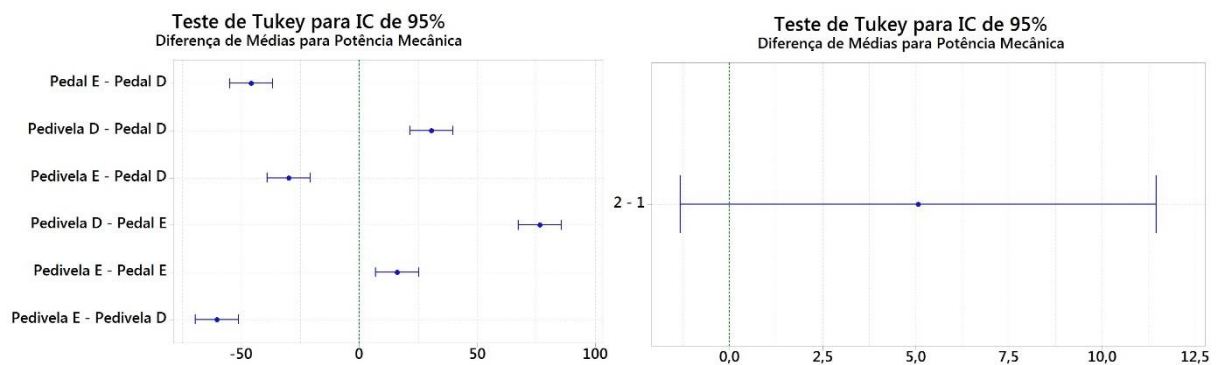


**Figura 56** Avaliação da distribuição da Potência Mecânica por: a) Célula de Carga; b) Voluntário; c) Marcha.



**Figura 57** Análise dos Resíduos para verificação de uso do modelo para a Potência Mecânica.

Através da análise de resíduos e dos histogramas da Figura 56, verificou-se o comportamento de uma distribuição normal para os dados da potência mecânica, além de ser descorrelacionado e não óbvio, ou seja, sem nenhuma estrutura aparente. Sendo assim, confirma-se a hipótese de aleatoriedade dos erros, além da variância ser considerada constante para todos os níveis do fator analisado. Ainda como parte da análise, foi proposta, também, a verificação das médias através do Método de Comparação Múltipla de *Tukey*, conforme apresentado na Figura 58.



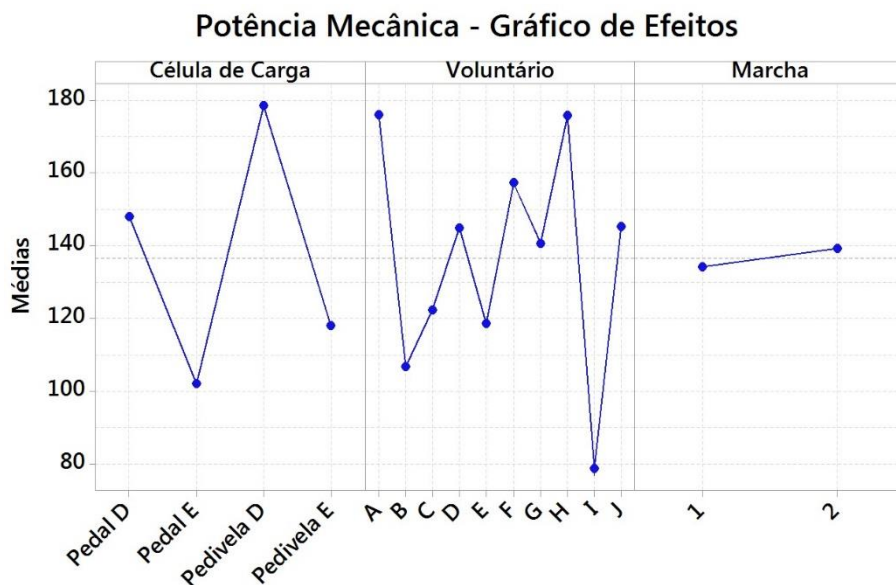
**Figura 58 Avaliação das Médias da Potência Mecânica através do Método de Comparação Múltipla de *Tukey*.**

Para um intervalo de confiança de 95%, as diferenças entre as médias da potência mecânica entre as células de carga podem ser consideradas significativas, ou seja, é possível descartar a hipótese nula já que excluem o zero. Por outro lado, a hipótese nula não pode ser descartada para as médias por marchas, o que requer uma análise mais detalhada através da análise de variância, a qual é apresentada na Tabela 15.

**Tabela 15 Resultado da Análise de Variância para a Potência Mecânica.**

<b>Análise de Variância - Potência Mecânica</b>						
<b>Fatores Controláveis</b>	<b>Graus de Liberdade</b>	<b>Soma dos Quadrados</b>	<b>Médias Quadráticas</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor P</b>	<b>Hipótese</b>
Voluntário	9	676449	75161	179,95	0	H1 (Signif.)
Célula de Carga	3	684611	228204	546,38	0	H1 (Signif.)
Marcha	1	5110	5110	12,23	0	H1 (Signif.)
Erro	786	328287	418			
Total	799	1694457				

Pela análise de variância, assim como nos resultados anteriormente obtidos, o valor-p (0,000) fornece evidência suficiente de que a potência mecânica aplicada é diferente para pelo menos um dos fatores controláveis em relação aos demais, quando  $\alpha = 0,05$ , ou seja, a potência mecânica é dependente das células de carga, dos voluntários e das marchas. A Análise de Variância permitiu verificar que, embora o Teste de *Tukey* não permitisse descartar a hipótese nula, de fato existe uma diferença significativa entre os dados obtidos para cada uma das marchas consideradas na verificação. Por fim, a Figura 59 apresenta o gráfico com as análises dos efeitos principais para cada fator analisado.



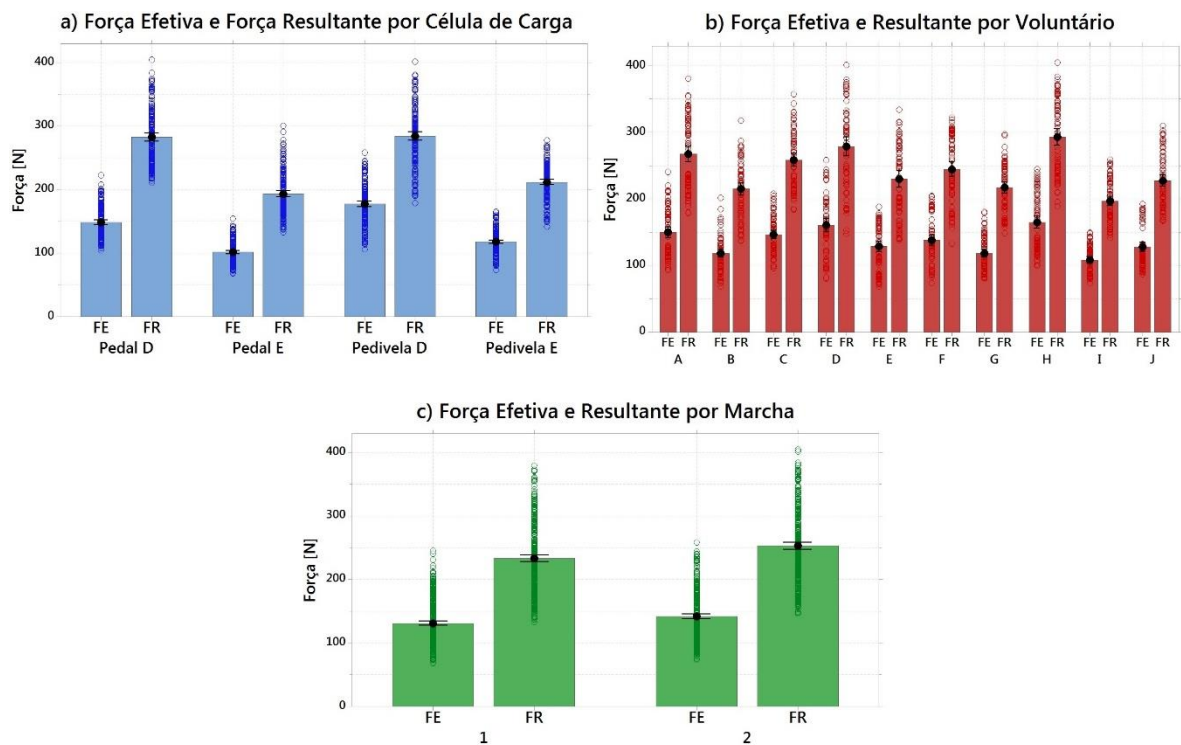
**Figura 59 Análise dos Efeitos para a Potência Mecânica.**

Pelo gráfico de efeitos principais, percebe-se que as células de carga do lado direito da bicicleta produziram os maiores módulos de potência mecânica. Esta diferença é responsável pela assimetria bilateral, a qual é objeto de estudos por parte dos ciclistas que buscam participar de competições. Para uma análise por voluntários, ficou evidente que cada voluntário produziu uma potência mecânica diferente, a qual, de acordo com (GROOT *et al.*, 1994), está vinculada à técnica de pedalada aplicada, posição ergonômica corporal e trabalho muscular pelo conjunto joelho, tornozelo e quadril. Houve, também, diferença entre a potência mecânica gerada entre

as marchas 1 e 2, mas que foram suficientes para considerá-las significativas frente à variável de resposta Potência Mecânica.

#### 4.5.4 Análise das Relações entre as Células de Carga

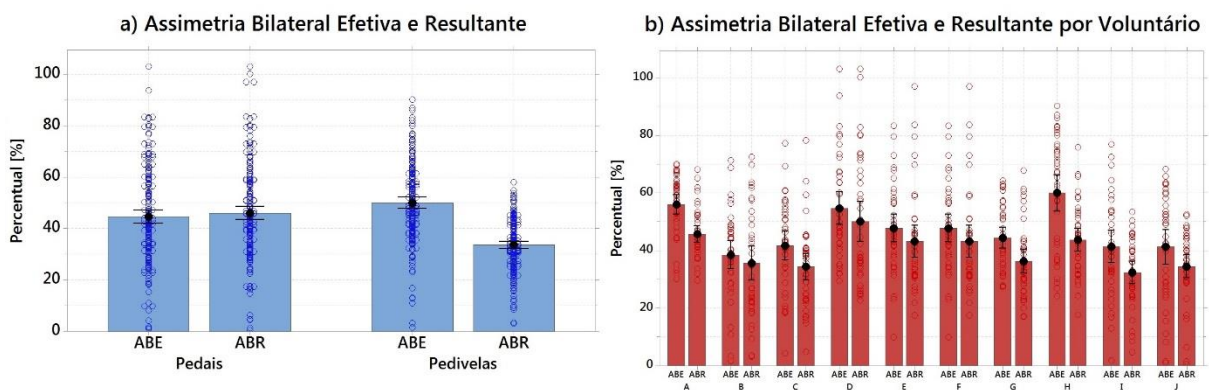
Finalizada a etapa de avaliação estatística, considerou-se aprofundar as análises nas relações entre os dados coletados nas células de carga. Inicialmente, foram verificadas as forças efetivas e resultantes ao longo das *sprints*, considerando os três fatores citados na análise estatística: Células de Carga, Voluntários e Marcha. A Figura 60 apresenta as médias dos valores coletados, os quais estão representados através de círculos plotados na vertical.



**Figura 60** Relação das Forças Efetiva e Resultante por: a) Células de Carga; b) Voluntários; c) Marchas da Bicicleta.

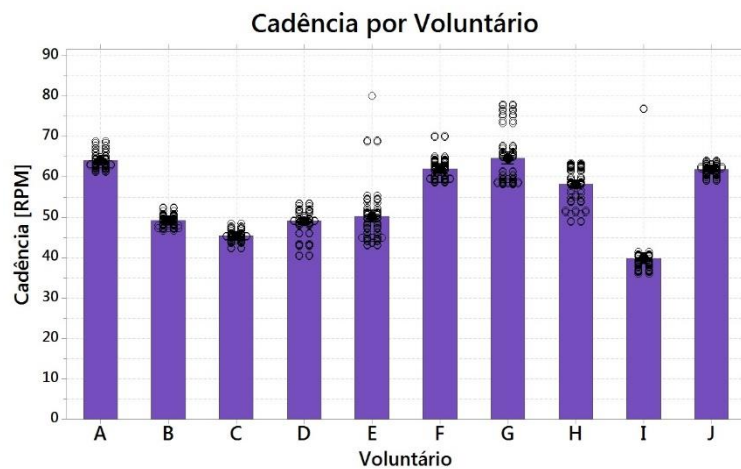
Pela análise realizada, percebe-se que cada célula de carga possui, em média, forças efetivas e resultantes distintas em relação às demais. A relação entre a força efetiva e a força resultante permite avaliar o índice de efetividade, onde observou-se valores de  $(52,37 \pm 1,61)\%$  e  $(52,57 \pm 1,42)\%$  para os pedais direito e esquerdo, respectivamente, enquanto que

os pedivela direito obteve  $(62,75 \pm 2,22)\%$  e o pedivela esquerdo obteve  $(55,52 \pm 2,32)\%$ . Os dados aproximam-se dos resultados de (ITURRIOZ; NABINGER; ZARO, 2002; LEE *et al.*, 2015), onde foram observados índices de efetividade entre 40 e 70%. Uma hipótese para a diferença entre o índice de efetividade dos pedais em relação aos pedivelas está vinculada à calibração das células de carga, sendo esta uma etapa fundamental do processo. Todas as células de carga foram calibradas utilizando pesos padrão para obtenção das funções de transferência experimentais, sendo que, a cada nova calibração, os pesos foram posicionados de modo empírico. Percebe-se, ainda, que todos os voluntários obtiveram forças efetivas e resultantes médias distintas ao longo das *sprints*, sendo que, em média, os maiores módulos de forças foram aplicados pelo Voluntário H e as menores médias foram obtidas pelo Voluntário I. Já em relação às marchas, foram considerados dois níveis: marcha “1” e marcha “2”. Em média, os maiores módulos de força foram medidos na marcha “2”. Isto ocorre porque o sistema utilizado para realização dos ensaios experimentais possui um freio magnético, cujo atrito é ajustado de modo que permaneça constante ao longo do tempo. Como o atrito é maior na marcha “2”, foi necessária a aplicação de maiores módulos de cargas para a manutenção da velocidade nas *sprints*. A relação bilateral entre as forças aplicadas representa a chamada assimetria bilateral, a qual é apresentada pela Figura 61.



**Figura 61** Relação da Assimetria Bilateral Efetiva e Resultante: a) por Célula de Carga; b) por Voluntário.

A assimetria é ocasionada pela forma como os voluntários pedalam e distribuem as forças entre os membros inferiores. Os resultados apresentados por (CARPES *et al.*, 2008; HULL; NEPTUNE; SMAK, 1999; PIGATTO *et al.*, 2016) mostram que a assimetria bilateral média pode atingir valores de até 60%, a qual está relacionada à prática de pedalada e treinamento que o indivíduo possui. Sendo assim, ciclistas profissionais tendem a produzir a menor assimetria bilateral, tendo em vista o treinamento realizado para correção dos movimentos que afetam diretamente seu desempenho. Para os dados em questão, observa-se que a assimetria entre os pedais foi de  $(44,59 \pm 18,59)\%$  e  $(46,05 \pm 18,35)\%$  para as forças efetiva e resultante, respectivamente. Já em relação aos pedivelas, foi verificado uma assimetria bilateral efetiva de  $(50,02 \pm 15,30)\%$  e resultante de  $(33,59 \pm 10,16)\%$ . Ensaios experimentais foram realizados por (PIGATTO *et al.*, 2016), os quais evidenciaram uma assimetria efetiva de 44%. (HULL; NEPTUNE; SMAK, 1999) descreveram, também, a influência da cadência sobre a assimetria bilateral, onde a distribuição de forças entre os membros inferiores permite a escolha de uma cadência que reduza as cargas transmitidas para as articulações dos joelhos. Para uma melhor compreensão dos resultados, a cadência imposta por cada voluntário é apresentada na Figura 62.



**Figura 62** Relação da Cadência por Voluntário.



A cadência foi calculada de forma instantânea e com base nos pontos de máxima força efetiva aplicada, mesmo método sugerido por (GLASKIN, 2012) e utilizado por (VALLE CASAS *et al.*, 2015). Como pode ser observado na Figura 62, embora os voluntários tenham buscado manter uma velocidade e cadência constantes, percebe-se variações médias superiores a 20 RPM entre voluntários. Estes fatores, além de fatores físicos como fadiga, por exemplo, contribuem para variações na cadência da pedalada e também, conforme mencionado, nas assimetrias bilaterais. Durante os ensaios experimentais, foi possível verificar as diferenças existentes entre as aplicações de forças nos pedais e nos pedivelas.

Assim como nos resultados apresentados por (CHILDERS; KISTENBERG; GREGOR, 2011; ITURRIOZ; NABINGER; ZARO, 2002; MANOLOVA *et al.*, 2015), as forças medidas nos pedais são máximas próximo dos 90° e praticamente nulas entre 180 e 250°. Uma hipótese está relacionada ao fato de que o experimento não disponibilizou aos voluntários uma sapatilha que permitisse o acoplamento do pé junto ao pedal, de forma que fosse possível realizar o movimento de “puxada” no mesmo. Isto praticamente anula a possibilidade de realizar forças no sentido contrário que possam ser somadas às forças efetivas que estão vinculadas ao movimento propriamente dito. Já para análise do pedivela, experimentos realizados por (HULL; NEPTUNE; SMAK, 1999) já mostraram que no pedivela é possível evidenciar forças em mais de um quadrante. Assim como nos experimentos realizados para esta dissertação, foram evidenciados picos negativos de força em 270°, devido ao acoplamento mecânico existente entre os pedivelas direito e esquerdo através do cubo central da bicicleta. Ou seja, a aplicação de forças em um lado do pedivela permite observar deformações mecânicas contrárias no lado oposto da bicicleta.

## 5 CONCLUSÕES

O trabalho proposto teve como objetivo desenvolver um sistema instrumentado que permitisse avaliar as características da pedalada através da medição de forças nos pedais e pedivelas de uma bicicleta de estrada. A instrumentação dos pedais foi realizada possibilitando a medição de deformações mecânicas nos três eixos de interesse: perpendicular, paralelo e lateral, sendo que cada um dos eixos utilizou uma ponte de *Wheatstone* com quatro elementos ativos, de modo a maximizar a sensibilidade das medições e prover estabilidade térmica logo na primeira etapa da cadeia de medição. A posição física para cimentação dos extensômetros foi definida através da simulação mecânica do pedal escolhido, onde, através do método dos elementos finitos, foram definidos os pontos de maior deformação mecânica para uma carga aplicada de forma distribuída em cada um dos três eixos. Para calibrar as células de carga, foram utilizados pesos padrão com resolução de 5kg (49,05N) e *ranges* de 0 a 75kg (735,75N) para os eixos perpendicular e lateral, e 0 a 35kg (342,35N) para o eixo paralelo, os quais buscaram ajustar o fundo de escala dos circuitos de condicionamento com os respectivos conversores A/D. Para facilitar o processo de calibração, apenas um dos estágios de ganho foi definido como ajustável, com todos os demais sendo previamente definidos.

Considerando a necessidade de medição sincronizada entre todas as células de carga e a limitação mecânica da bicicleta que realiza movimentos de rotação nos pedais e pedivelas, foi proposta a sincronização através de um sistema *wireless* que proporcionasse independência física entre cada subsistema. Para isto, foram propostos sistemas alimentados por baterias, onde cada qual possui um módulo *ZigBee* responsável por receber os sinais de sincronismo enviados em *broadcast* por um módulo principal acoplado no computador. Este módulo seria o responsável por iniciar e parar as coletas de dados. Considerando que cada célula de carga possui seu próprio circuito de condicionamento e armazenamento de dados via microcontrolador e cartão de memória, foi realizado um ensaio experimental para avaliar o



sincronismo entre o início das coletas de dados em cada módulo. Como resultado, mediu-se  $120\mu\text{s}$  como maior tempo de defasagem entre circuitos, num total de 30 repetições realizadas. Em relação às células de carga dos pedivelas, foram utilizadas estruturas usinadas em alumínio, os quais foram instrumentados e calibrados para realização do trabalho sugerido por (PIGATTO *et al.*, 2016), onde as únicas alterações propostas para esta dissertação foram em relação às aquisições dos sinais, com o acréscimo do módulo *ZigBee* e a substituição da placa eletrônica que realizou as aquisições e armazenamento dos dados coletados.

Ao término desta etapa, buscou-se realizar ensaios experimentais com 10 voluntários em ambiente controlado *indoor*, utilizando um rolo de treinamento com sistema de frenagem magnético, o qual aprimorou o equilíbrio dos voluntários e possibilitou que a aplicação das forças ocorresse ao longo de toda *sprints*. Em um sistema sem este tipo de frenagem, os voluntários poderiam, eventualmente, reduzir a aplicação de forças uma vez que bicicleta já não estivesse mais sob efeito da inércia inicial. Por fim, foram realizadas medições em cada célula de carga, onde cada qual armazenou seus dados em um cartão de memória tipo SD para posterior análise *offline* no *software* Matlab 2013.

Quanto ao processamento dos dados coletados, a principal crítica é focada na forma como os ângulos dos pedivelas e pedais foram obtidos, tendo em vista que não foram medidos diretamente através de *encoders*, por exemplo, ou ainda, mediante o posicionamento de sensores infravermelhos com marcadores reflexivos, conforme sugerido e realizado por (LEE *et al.*, 2015). Desta forma, estes ângulos foram estimados com base nos pontos de máxima força detectados ao longo de cada revolução do pedivela, além de serem posteriormente comparados com o padrão de pedalada encontrado em outros trabalhos desenvolvidos na área. Como proposta para trabalhos futuros, possivelmente a primeira melhoria que poderia ser feita seria desenvolver um método para medição dos ângulos dos pedais e pedivelas, com coletas simultâneas e armazenadas nos mesmos *frames* de dados já gravados atualmente.

Com o cálculo das forças efetivas e resultantes para os pedais e pedivelas, foram realizadas as Análises de Variância considerando como fatores analisados as células de carga (4 níveis fixos), os voluntários (10 níveis fixos) e as marchas da bicicleta (2 níveis fixos) como proposta de avaliação estatística para o experimento. A definição pela utilização de fatores blocados ocorreu em razão da disponibilidade dos voluntários e do procedimento para aquisição e *download* dos arquivos gerados. O objetivo principal desta análise foi verificar se as variáveis de resposta força efetiva, força resultante e potência mecânica foram alteradas significativamente pelos fatores analisados. Como resultado, com um intervalo de confiança de 95%, concluiu-se que todos os fatores analisados alteram de forma significativa as variáveis de resposta, o que permite dizer que, para os dados coletados e com base nas análises estatísticas propostas, foram observadas diferenças significativas entre medir as forças nos pedais em relação aos pedivelas.

## 6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Existem algumas oportunidades de melhoria que poderiam enriquecer a pesquisa e corroborar com as análises e comparações feitas até então.

- Com relação ao circuito eletrônico desenvolvido, poderia ser citado como oportunidade de melhoria a inclusão de um circuito para monitoramento da carga da bateria, o qual seria responsável por impedir eventuais danos causados pela utilização com baixa carga e ainda fosse capaz de gerenciar as demandas de recarga. O tempo para execução dos ensaios acabou sendo maior do que o esperado devido às constantes necessidades de recarga.
- Em relação à calibração das células de carga, a primeira intervenção poderia ser feita no método utilizado para aplicação das cargas mecânicas. Ao invés de utilizar pesos padrão, poderia ser utilizada uma máquina de compressão com certificado de calibração válido. A sugestão é que as células de carga sejam calibradas em condições similares e com maior precisão, de forma a minimizar as oscilações devido à forma como os cabos foram fixados nas células de carga, por exemplo.
- Além de coletar os dados de interesse, é imprescindível que sejam realizadas medições de ângulo, tanto dos pedivelas quanto dos pedais. Experimentos realizados e já mencionados nesta dissertação mostram algumas das possibilidades, as quais estariam sincronizadas com as demais medições, criando dois novos vetores a serem incluídos nos arquivos de dados. Com isto, até mesmo os resultados obtidos através da análise proposta nesta dissertação poderiam ser avaliados.

- Os projetos de experimentos poderiam ser aperfeiçoados através da mudança nos procedimentos utilizados nos ensaios e coletas de dados. Havendo a possibilidade, os fatores controláveis poderiam ser completamente aleatorizados, o que abriria a possibilidade de analisá-los segundo as premissas de um Projeto de Experimentos do Tipo Fatorial Completo com Repetição. Este método possibilitaria, inclusive, avaliar as interações entre fatores. Uma outra possibilidade interessante seria acrescentar um quarto fator controlável para o ambiente de ensaio, considerando dois níveis: ambiente *indoor* e ambiente *outdoor*;
- Embora não tenha sido o foco principal deste trabalho, o sistema proposto poderia ser utilizado para avaliação de desempenho de atletas, comparações entre características de pedalada de ciclistas profissionais e/ou amadores, avaliação de desempenho muscular, entre outras. Este caminho alinharia as pesquisas com avaliações e interesses da área biomédica, enriquecendo os resultados e contribuindo para o crescimento científico;

## REFERÊNCIAS

ALEXANDER, N. et al. A new pedal system measuring forces in three dimensions. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BIOMECHANICS IN SPORTS, 31., 2007, Taipei, Taiwan. **Proceedings...** Taipei. p. 2-5.

ALUMICOPPER. **Informações Técnicas - Alumínio 6061**. Disponível em: <[http://www.alumicopper.com.br/pdf/aluminio/info-tec-alumi\\_aluminio\\_6061.pdf](http://www.alumicopper.com.br/pdf/aluminio/info-tec-alumi_aluminio_6061.pdf)>. Acesso em: 30 outubro 2016.

ALVAREZ, C.; VINYOLAS, J. A new bicycle pedal design for on-road measurements of cycling forces. **Journal of Applied Biomechanics**, Birmingham, v. 12, n. 1992, p. 130-142, Feb. 1996.

ARDUÍNO. **Arduino Pro Mini**. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardProMini>>. Acesso em: 24 novembro 2016.

ARFAOUI, A.; BERTUCCI, W. M.; POLIDORI, G. Analysis of the pedaling biomechanics of master's cyclists: a preliminary study. **Journal of Science and Cycling**, Pulianas, Granada, v. 1, n. 2, p. 42–46, April 2012. Disponível em: <[http://www.jsc-journal.com/ojs/index.php?journal=JSC&page=article&op=view&path\[\]=15](http://www.jsc-journal.com/ojs/index.php?journal=JSC&page=article&op=view&path[]=15)>. Acesso em: 30 outubro 2016.

ATWATER, A. E. Kinesiology/biomechanics: perspectives and trends. **Research Quarterly for Exercise and Sport**, New York, v. 51, n. 1, p. 193-218, Mar. 1980. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02701367.1980.10609283>> Acesso em: 30 outubro 2016.

BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**. Porto Alegre: LTC, 2011. v. 2.

BALBINOT, A.; MILANI, C.; NASCIMENTO, J. A new crank arm-based load cell for the 3d analysis of the force applied by a cyclist. **Sensors**, Basel, Switzerland, v. 14, n. 12, p. 22921-22939, Dec. 2014.

BERTUCCI, W. et al. Comparison of Biomechanical Criteria in Cycling Maximal Effort Test. **International Journal of Sports Science and Engineering**, England, UK, v. 2, n. 1, p. 36-46, Jan. 2008.

BINI, R. R.; CARPES, F. P. **Biomechanics of Cycling**. 1st ed. New York: Springer International Publishing, 2012.

BOSCH, P. Van Den. **Cycling for triathletes: Endurance**. Oxford: Meyer & Meyer Sport (UK) Ltd., 2006.

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

CARPES, F. P. et al. During an incremental exercise cyclists improve bilateral pedaling symmetry. **Brazilian Journal of Biomotricity**, Iguazu, v. 2, n. 3, p. 155-159, May 2008.

CARTER, B.; BROWN, T. **Texas Instruments Application Report: Handbook of Operational Amplifier Applications**. Dallas: Texas, 2001. Disponível em: <[http://seniordesignlab.com/sd\\_docs/Links/sboa092a.pdf](http://seniordesignlab.com/sd_docs/Links/sboa092a.pdf)>5Cnhttp://focus.ti.com/lit/an/sboa092a/sboa092a.pdf%5Cnhttp://www.smesfair.com/pdf/electrical%5Cneng/smesfair24.pdf>. Acesso em: 01 novembro 2016.

CHILDERS, W. L.; KISTENBERG, R. S.; GREGOR, R. J. Pedaling Asymmetries in Cyclists with Unilateral Transtibial Amputation: Effect of Prosthetic Foot Stiffness. **Journal of Applied Biomechanics**, Birmingham, v. 27, n. 4, p. 314-321, Jun. 2011.

CHUNFU, G. Study on the sensor for the pedal push force of bicycle. In: ICEMI - INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONIC MEASUREMENT AND INSTRUMENTS, 9., 2009, Beijing. **Proceedings...** Beijing. p. 2977-2980.

DIGI INTERNATIONAL. **Digi XBEE S1 802.15.4 RF Modules**. Disponível em: <[https://www.digi.com/pdf/ds\\_xbeemultipointmodules.pdf](https://www.digi.com/pdf/ds_xbeemultipointmodules.pdf)>. Acesso em: 03 novembro 2016.

FEIMIN. **Reference FP-961**. Disponível em: <<http://www.chinafeimin.com/products/product-i416.html>>. Acesso em: 04 novembro 2016.

GHARGHAN, S. K.; NORDIN, R.; ISMAIL, M. Empirical Investigation of Pedal Power Calculation Techniques for Track Cycling Performance Measurement. In: IEEE STUDENT CONFERENCE ON RESEARCH AND DEVELOPMENT (SCORED 2013), 6., 2015, Malaysia. **Proceedings...** Malaysia. p. 48-53.

GLASKIN, M. **Cycling Science: How Rider and Machine Work Together**. United Kingdom: Ivy Press Limited, 2012.

GROOT, G. De et al. Power, Muscular Work, and External Forces in Cycling. **Ergonomics**, London, UK, v. 37, n. 1, p. 31-42, Feb. 1994.

GURGEL, J. et al. Development and calibration of a pedal with force and moment sensors. In: ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE IEEE ENGINEERING IN MEDICINE AND BIOLOGY, 28., 2006, New York. **Proceedings...** New York. p. 4144-4146.

HALL, S. J. **Basic Biomechanics**. 6th ed. Delaware: McGraw-Hill, 2011.

HATZE, H. The Meaning of the Term "Biomechanics". **Journal of Biomechanics**, St. Louis, v. 7, n. 2, p. 189-190, 1974.

HBM. **Catálogo de strain gages & acessórios para medição de deformação.** Disponível em: <<https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/s3996.pdf>>. Acesso em: 30 outubro 2016.

HBM. **Site.** Disponível em: <<https://www.hbm.com/pt/>>. Acesso em: 24 novembro 2016.

HOFFMAN, S. J. **Introduction to Kinesiology: Studying Physical Activity.** 4th ed. North Carolina: Human Kinetics, 2009.

HOFFMANN, K. **An Introduction to Stress Analysis and Transducer Design Using Strain Gauges.** Alsbach: Germany, 2012. p. 127-133. Disponível em: <[https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/files/hoffmann-book/HBM\\_Karl-Hoffmann\\_EN\\_An-Introduction-to-Stress-Analysis-and-Transducer-Design-using-Strain-Gauges.pdf](https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/files/hoffmann-book/HBM_Karl-Hoffmann_EN_An-Introduction-to-Stress-Analysis-and-Transducer-Design-using-Strain-Gauges.pdf)>. Acesso em: 01 novembro 2016.

HULL, M. L.; NEPTUNE, R. R.; SMAK, W. The Influence of Pedaling Rate on Bilateral Asymmetry in Cycling. **Journal of Biomechanics**, St. Louis, v. 32, n. 9, p. 899-906, Sep. 1999.

INSTRON EMIC. **Datasheet Sistemas de Ensaios EMIC.** Disponível em: <[http://www.emic.com.br/arquivos/pod\\_sistema\\_de\\_ensaios\\_2016\\_\(low\\_resol\)\\_44687.pdf](http://www.emic.com.br/arquivos/pod_sistema_de_ensaios_2016_(low_resol)_44687.pdf)>. Acesso em: 03 novembro 2016.

ITURRIOZ, I.; NABINGER, E.; ZARO, M. A. Development of a triaxial force platform for the measurement of force at a bicycle pedal. In: ISBS - CONFERENCE PROCEEDINGS ARCHIVE, 20., 2002, Caceres, Spain. **Proceedings...** Caceres. p. 290-293. Disponível em: <<https://ojs.ub.uni-konstanz.de/cpa/article/view/707>>. Acesso em: 05 novembro 2016.

JENSEN, S. U. How to Obtain a Healthy Journey to School. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, Lyngby, Denmark, v. 42, n. 3, p. 475-486, Feb. 2008.

LEE, J. et al. Development of a System for Measuring the Three-Axis Pedal Force in Cycling and its Applications. **International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering**, Turkey, v. 9, n. 2, p. 235-238, Feb. 2015.

MANOLOVA, A. et al. Relationship between the pedaling biomechanics and strain of bicycle frame during submaximal tests. **Sports**, Basel, Switzerland, v. 3, n. 2, p. 87-102, Jun. 2015. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2075-4663/3/2/87/htm>>. Acesso em: 11 novembro 2016.

MINETTI, A. E.; PINKERTON, J.; ZAMPARO, P. From Bipedalism to Bicyclism: Evolution in Energetics and Biomechanics of Historic Bicycles. **BIOLOGICAL SCIENCES / THE ROYAL SOCIETY**, 1474., 2001, Bethesda. **Proceedings...** Bethesda. p. 1351-60. Disponível em: <<http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=1088748&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>>. Acesso em: 10 novembro 2016.

MITUTOYO AMERICA. **Digital Caliper with Waterproof Scale.** Disponível em:

<[http://www.mitutoyo.com.br/novosite/download/02folhetos/08\\_SmallTools/E12033.pdf](http://www.mitutoyo.com.br/novosite/download/02folhetos/08_SmallTools/E12033.pdf)>. Acesso em: 28 outubro 2016.

MURRAY, W. M.; MILLER, W. R. **The Bonded Electrical Resistance Strain Gage**. 1st ed. New York: Oxford University Press, 1992.

NABINGER, E. **Análise Dinamométrica Tridimensional da Pedalada de Ciclistas**. 2006. 124 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Datasheet NI 9237**: 4 AI,  $\pm 25$  mV/V, 24 bit, 50 kS/s/ch Simultaneous, Bridge Completion, Dallas: Texas, 2015. Disponível em: <[http://www.ni.com/pdf/manuals/374186a\\_02.pdf](http://www.ni.com/pdf/manuals/374186a_02.pdf)>. Acesso em: 01 novembro 2016.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Multisim**, Dallas: Texas, 2015. Disponível em: <<http://www.ni.com/multisim/pt/>>. Acesso em: 13 dezembro 2016.

OXFORD, E. D. **Oxford English Dictionary**. Disponível em: <<http://dictionary.oed.com>>. Acesso em: 08 novembro 2016.

PIGATTO, A. V et al. A new crank arm based load cell, with built-in conditioning circuit and strain gages, to measure the components of the force applied by a cyclist. IEEE Annual International Conference of the Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 38., 2016, Orlando, USA. **Proceedings...** Orlando, p. 1983-1986. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7591113/>>.

ROWLANDS, D. S.; DOWNEY, B. Physiology of Triathlon. In: GARRET, W. E.; KIRKENDALL, D. T. **Exercise and Sport Science**. 1st ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2000. cap. 59, p. 919-939.

SANDERSON, D. J. The Influence of Cadence and Power Output on the Biomechanics of Force Application During Steady-Rate Cycling in Competitive and Recreational Cyclists. **Journal of Sports Sciences**, Bethesda, v. 9, n. 2, p. 191-203. 1991.

SCHMIDT, A. **Competitive Cycling**. 2nd revise ed. United Kingdom: Meyer & Meyer Fachverlag und Buchhandel GmbH, 2014.

SCHUBERT, T. F.; KIM, E. M. **Fundamentals of Electronics: Book 3 Active Filters and Amplifier Frequency Response**. 1st ed. San Diego: Morgan & Claypool Publishers, 2016. Disponível em: <<http://www.morganclaypool.com/doi/10.2200/S00712ED1V03Y201603DCS049>>. Acesso em: 15 dezembro 2016.

SOVNDAL, S. **Cycling Anatomy**. 1st ed. New York: Human Kinetics, 2009.

TEKTRONIX. **DMM4040 and DMM4050**: Digital Multimeter, Beaverton, USA, 2013. Disponível em: <[http://download.tek.com/manual/077036300web\\_0.pdf](http://download.tek.com/manual/077036300web_0.pdf)>. Acesso em: 02 novembro 2016.

TEXAS INSTRUMENTS. **Datasheet INA125U**: Instrumentation Amplifier with Precision Voltage Reference, Dallas: Texas, 1998. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina125.pdf>>. Acesso em: 02 novembro 2016.



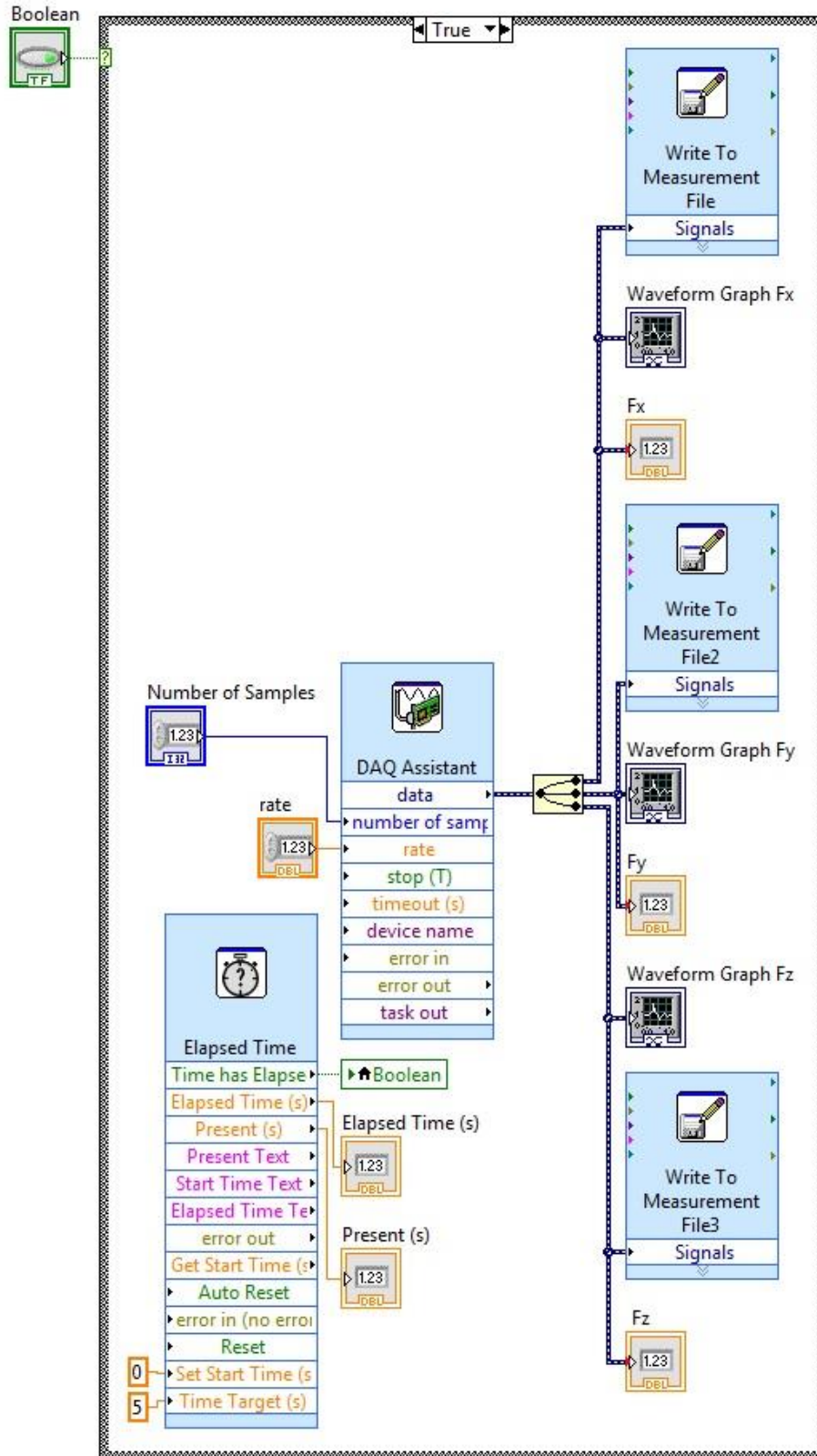
VALLE CASAS, O. et al. Complete factorial design experiment for 3d load cell instrumented crank validation. IEEE Annual International Conference of the Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 37., 2015, Milan, Italy. **Proceedings...** Milan, p. 3655-3658.

WINTER, D. A. **Biomechanics and Motor Control of Human Movement**. 4th ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2009.

ZATSIORSKY, V. M. **Biomechanics in Sport: Performance Enhancement and Injury Prevention**. Oxford: Blackwell Science Ltd, 2000.

ZIPPY. **Specifications for Zippy Flightmax 1800mAh 9.9V 5c LiFePo4 TX Pack**, Hong Kong, 2016. Disponível em: <[https://hobbyking.com/en\\_us/zippy-flightmax-1800mah-9-9v-5c-lifepo4-tx-pack.html](https://hobbyking.com/en_us/zippy-flightmax-1800mah-9-9v-5c-lifepo4-tx-pack.html)>. Acesso em: 03 setembro 2017.

# APÊNDICE A – PROGRAMAÇÃO EM LABVIEW PARA AQUISIÇÕES DE DADOS DE DEFORMAÇÕES MECÂNICAS

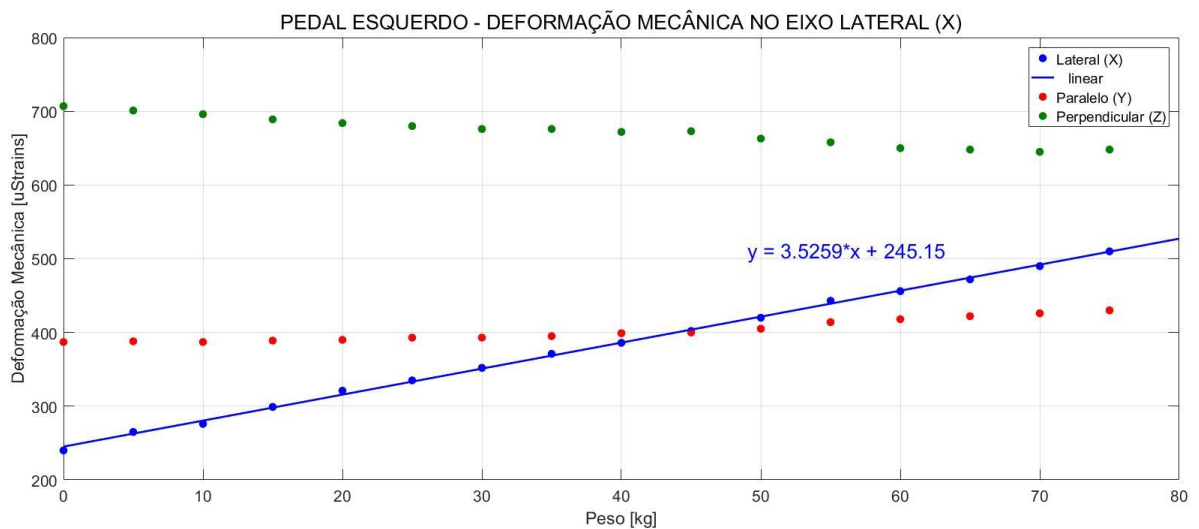


**APÊNDICE B – TABELAS DE DADOS COM GRÁFICOS PARA OS ENSAIOS  
EXPERIMENTAIS DE MEDIÇÃO DA DEFORMAÇÃO MECÂNICA DO PEDAL  
ESQUERDO**

a) EIXO LATERAL (X) DO PEDAL ESQUERDO

Peso (kg)	Pedal Esquerdo - Deformação Mecânica do Eixo Lateral X (µStrains)					
	Medição Realizada com a Placa de Aquisição NI9237 - Incerteza de Medição: 0,2%					
	Eixo Lateral (X)		Eixo Paralelo (Y)		Eixo Perpendicular (Z)	
0	<b>251</b>	<b>240</b>	397	387	719	707
5	<b>277</b>	<b>265</b>	398	388	714	701
10	<b>288</b>	<b>276</b>	398	387	708	696
15	<b>309</b>	<b>299</b>	399	389	700	689
20	<b>331</b>	<b>321</b>	400	390	697	684
25	<b>348</b>	<b>335</b>	403	393	692	680
30	<b>362</b>	<b>352</b>	403	393	687	676
35	<b>384</b>	<b>371</b>	406	395	686	676
40	<b>399</b>	<b>386</b>	411	399	684	672
45	<b>415</b>	<b>402</b>	411	400	684	673
50	<b>430</b>	<b>420</b>	417	405	676	663
55	<b>453</b>	<b>443</b>	425	414	671	658
60	<b>466</b>	<b>456</b>	430	418	661	650
65	<b>485</b>	<b>472</b>	434	422	660	648
70	<b>502</b>	<b>490</b>	437	426	656	645
75	<b>523</b>	<b>510</b>	441	430	660	648

Função de Transferência Experimental para o Eixo Lateral (X) do Pedal Esquerdo:



Erro de Linearidade do Eixo Lateral (X) do Pedal Esquerdo:

$$Erro_{PEX}(\%) = \frac{(321,000 - 315,668) \times 100}{509,593} \cong 1,05\%$$

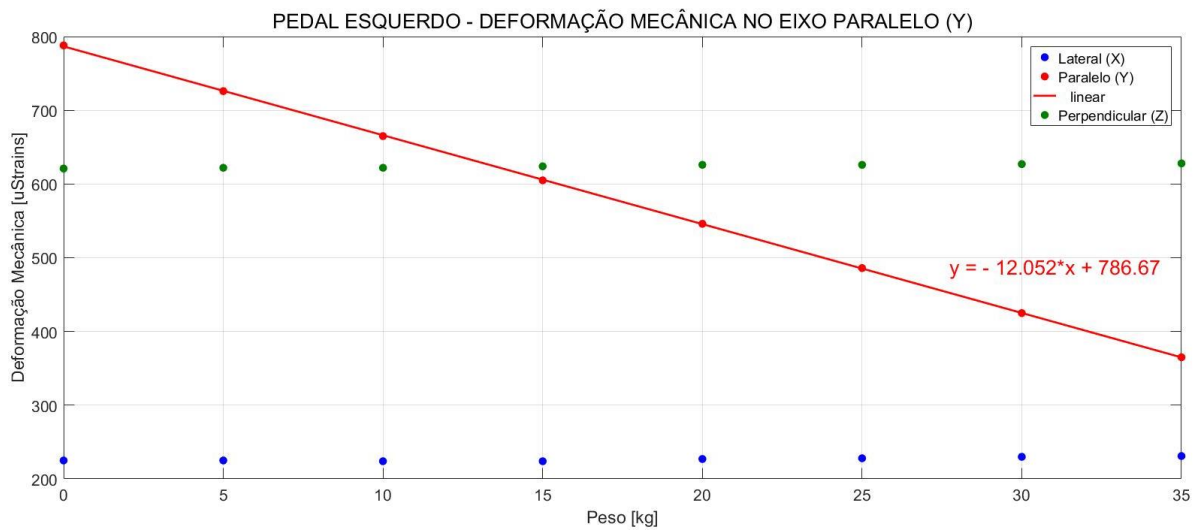
Sensibilidade do Eixo Lateral (X) do Pedal Esquerdo:

$$S_{PEX} = \frac{\text{Deformação Mecânica}}{\text{Carga Aplicada}} = \frac{\pm 270 \mu\epsilon}{735,75 N} \cong 0,37 \mu\epsilon/N$$

b) EIXO PARALELO (Y) DO PEDAL ESQUERDO

Peso (kg)	Pedal Esquerdo - Deformação Mecânica do Eixo Paralelo Y ( $\mu$ Strains)					
	Medição Realizada com a Placa de Aquisição NI9237 - Incerteza de Medição: 0,2%					
	Eixo Lateral (X)		Eixo Paralelo (Y)		Eixo Perpendicular (Z)	
0	235	225	<b>800</b>	<b>788</b>	631	621
5	236	225	<b>737</b>	<b>726</b>	632	622
10	235	224	<b>678</b>	<b>665</b>	632	622
15	235	224	<b>617</b>	<b>605</b>	634	624
20	237	227	<b>559</b>	<b>546</b>	636	626
25	239	228	<b>497</b>	<b>486</b>	637	626
30	241	230	<b>436</b>	<b>425</b>	639	627
35	242	231	<b>376</b>	<b>365</b>	638	628

Função de Transferência Experimental para o Eixo Paralelo (Y) do Pedal Esquerdo:



Erro de Linearidade do Eixo Paralelo (Y) do Pedal Esquerdo:

$$Erro_{PEY}(\%) = \frac{(486,000 - 485,370) \times 100}{364,850} \cong 0,17\%$$

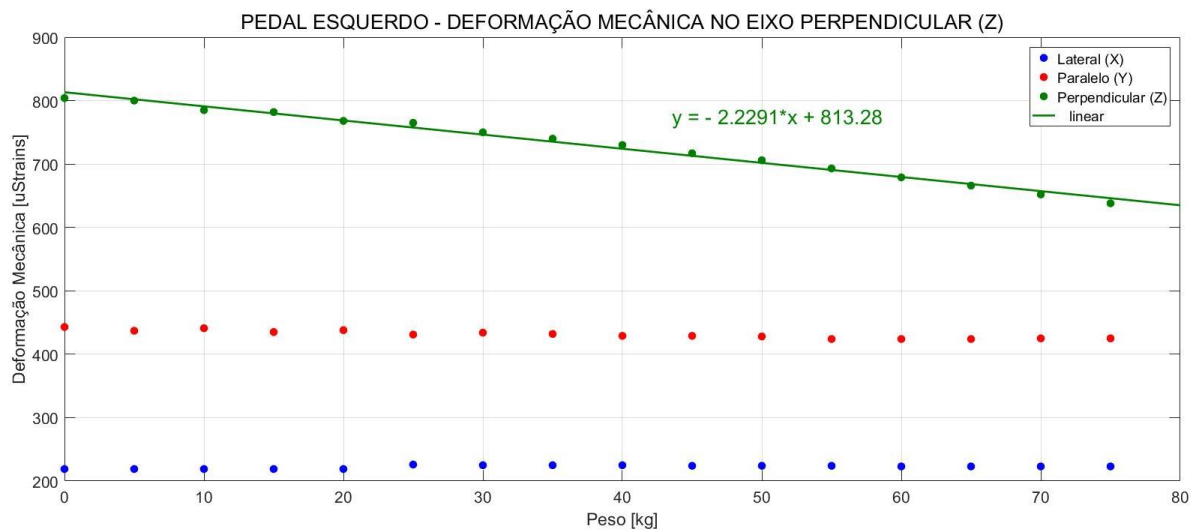
Sensibilidade do Eixo Lateral (X) do Pedal Esquerdo:

$$S_{PEY} = \frac{\text{Deformação Mecânica}}{\text{Carga Aplicada}} = \frac{\pm 423 \mu\epsilon}{343,35N} \cong 1,23 \mu\epsilon/N$$

c) EIXO PERPENDICULAR (Z) DO PEDAL ESQUERDO

Peso (kg)	Pedal Esquerdo - Deformação Mecânica do Eixo Perpendicular Z ( $\mu\text{Strains}$ )					
	Medição Realizada com a Placa de Aquisição NI9237 - Incerteza de Medição: 0,2%					
	Eixo Lateral (X)		Eixo Paralelo (Y)		Eixo Perpendicular (Z)	
0	229	219	455	443	<b>817</b>	<b>804</b>
5	231	219	448	437	<b>810</b>	<b>800</b>
10	230	219	452	441	<b>797</b>	<b>785</b>
15	229	219	448	435	<b>795</b>	<b>782</b>
20	231	219	448	438	<b>780</b>	<b>768</b>
25	238	226	444	431	<b>778</b>	<b>765</b>
30	236	225	445	434	<b>760</b>	<b>750</b>
35	237	225	445	432	<b>753</b>	<b>740</b>
40	236	225	441	429	<b>740</b>	<b>730</b>
45	235	224	439	429	<b>727</b>	<b>717</b>
50	234	224	438	428	<b>717</b>	<b>706</b>
55	234	224	436	424	<b>705</b>	<b>693</b>
60	234	223	435	424	<b>689</b>	<b>679</b>
65	235	223	435	424	<b>678</b>	<b>666</b>
70	235	223	435	425	<b>664</b>	<b>652</b>
75	234	223	438	425	<b>651</b>	<b>638</b>

Função de Transferência Experimental para o Eixo Perpendicular (Z) do Pedal Esquerdo:



Erro de Linearidade do Eixo Perpendicular (Z) do Pedal Esquerdo:

$$Erro_{PEZ}(\%) = \frac{(765,000 - 757,553) \times 100}{634,952} \cong 1,17\%$$

Sensibilidade do Eixo Perpendicular (Z) do Pedal Esquerdo:

$$S_{PEZ} = \frac{\text{Deformação Mecânica}}{\text{Carga Aplicada}} = \frac{\pm 166 \mu\epsilon}{735,75N} \cong 0,23 \mu\epsilon/N$$

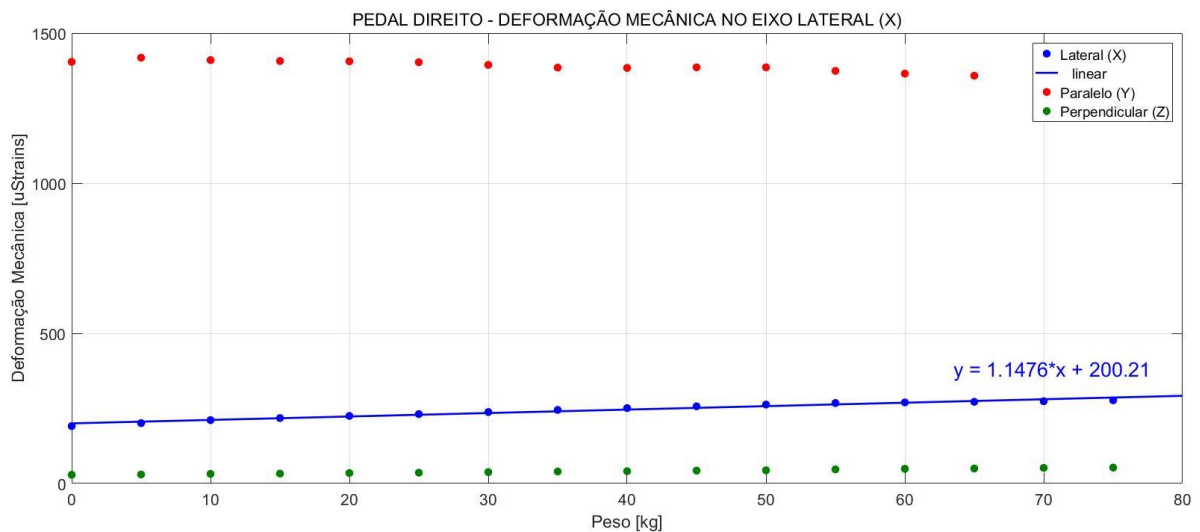
**APÊNDICE C – TABELAS DE DADOS COM GRÁFICOS PARA OS ENSAIOS  
EXPERIMENTAIS DE MEDIÇÃO DA DEFORMAÇÃO MECÂNICA DO PEDAL**

**DIREITO**

a) EIXO LATERAL (X) DO PEDAL DIREITO

Peso (kg)	Pedal Direito - Deformação Mecânica do Eixo Lateral X ( $\mu$ Strains)					
	Medição Realizada com a Placa de Aquisição NI9237 - Incerteza de Medição: 0,2%					
	Eixo Lateral (X)		Eixo Paralelo (Y)		Eixo Perpendicular (Z)	
0	<b>202</b>	<b>191</b>	1415	1404	40	29
5	<b>214</b>	<b>201</b>	1430	1418	41	30
10	<b>221</b>	<b>211</b>	1421	1410	42	32
15	<b>229</b>	<b>218</b>	1418	1407	44	33
20	<b>237</b>	<b>225</b>	1418	1406	45	35
25	<b>243</b>	<b>231</b>	1415	1403	47	36
30	<b>250</b>	<b>238</b>	1405	1394	48	38
35	<b>256</b>	<b>245</b>	1396	1385	50	40
40	<b>264</b>	<b>251</b>	1395	1384	52	41
45	<b>270</b>	<b>257</b>	1398	1386	53	43
50	<b>276</b>	<b>263</b>	1399	1386	54	44
55	<b>281</b>	<b>268</b>	1384	1374	57	47
60	<b>282</b>	<b>270</b>	1377	1365	60	49
65	<b>282</b>	<b>272</b>	1368	1358	61	50
70	<b>284</b>	<b>274</b>	1364	1354	63	52
75	<b>290</b>	<b>277</b>	1359	1347	64	53

Função de Transferência Experimental para o Eixo Lateral (X) do Pedal Direito:



Erro de Linearidade do Eixo Lateral (X) do Pedal Direito:

$$Erro_{PDX}(\%) = \frac{(287,280 - 285,00) \times 100}{287,280} \cong 0,79\%$$

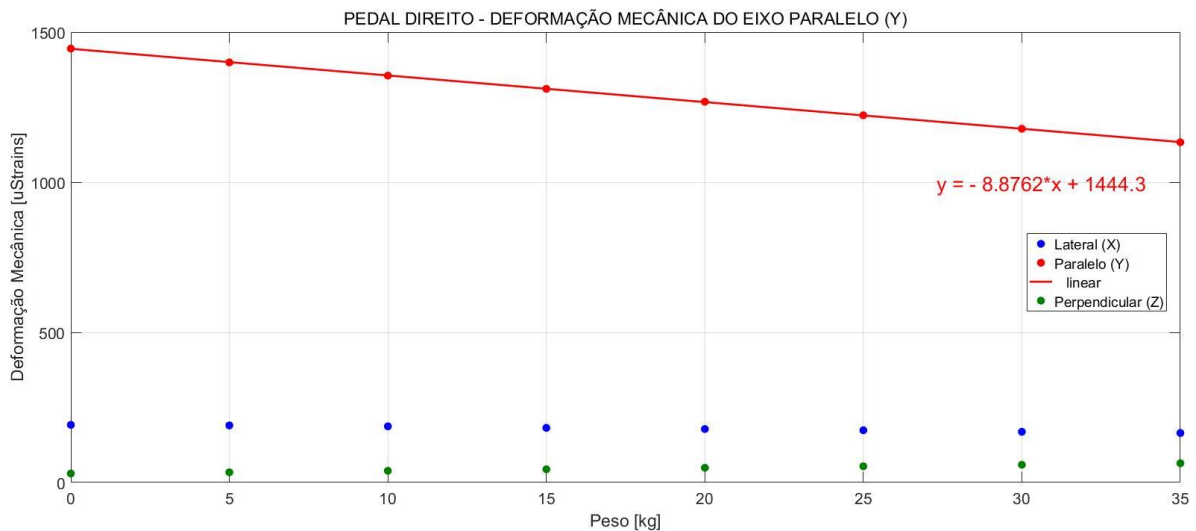
Sensibilidade do Eixo Lateral (X) do Pedal Direito:

$$S_{PDX} = \frac{\text{Deformação Mecânica}}{\text{Carga Aplicada}} = \frac{\pm 286 \mu\epsilon}{735,75 N} \cong 0,39 \mu\epsilon/N$$

b) EIXO PARALELO (Y) DO PEDAL DIREITO

Peso (kg)	Pedal Direito - Deformação Mecânica do Eixo Paralelo Y ( $\mu\text{Strains}$ )					
	Medição Realizada com a Placa de Aquisição NI9237 - Incerteza de Medição: 0,2%					
	Eixo Lateral (X)		Eixo Paralelo (Y)		Eixo Perpendicular (Z)	
0	194	192	<b>1482</b>	<b>1445</b>	31	30
5	191	190	<b>1435</b>	<b>1399</b>	35	34
10	188	187	<b>1396</b>	<b>1355</b>	40	39
15	183	182	<b>1343</b>	<b>1311</b>	46	44
20	180	178	<b>1307</b>	<b>1268</b>	52	49
25	175	174	<b>1264</b>	<b>1223</b>	55	54
30	171	169	<b>1210</b>	<b>1178</b>	62	59
35	167	165	<b>1170</b>	<b>1133</b>	65	64

Função de Transferência Experimental para o Eixo Paralelo (Y) do Pedal Direito:



Erro de Linearidade do Eixo Paralelo (Y) do Pedal Direito:



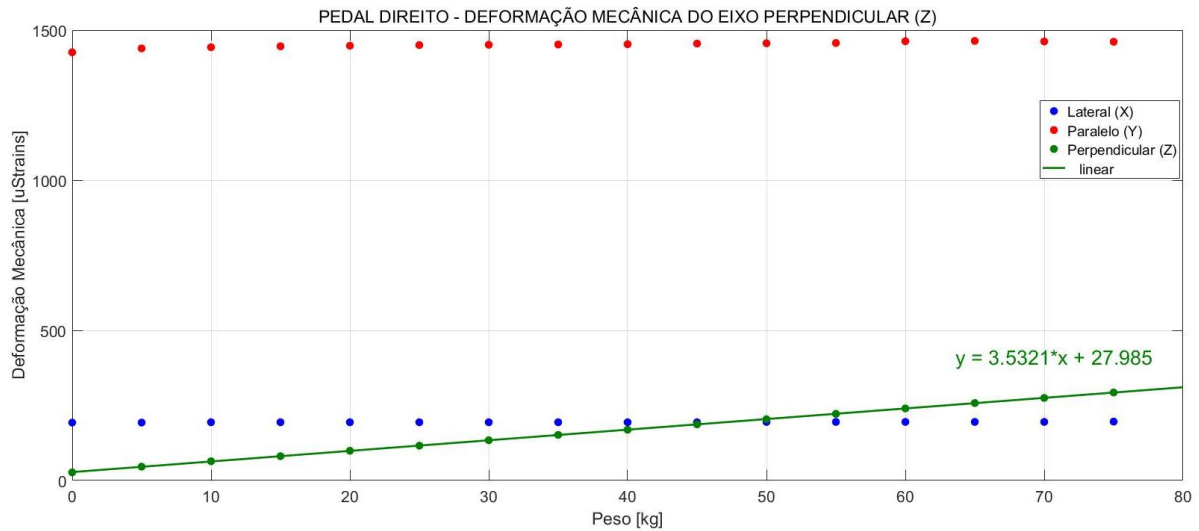
$$Erro_{PDY}(\%) = \frac{(1268,000 - 1266,776) \times 100}{1133,633} \cong 0,11\%$$

Sensibilidade do Eixo Paralelo (Y) do Pedal Direito:

$$S_{PDY} = \frac{\text{Deformação Mecânica}}{\text{Carga Aplicada}} = \frac{\pm 312\mu\epsilon}{343,35N} \cong 0,91\mu\epsilon/N$$

c) EIXO PERPENDICULAR (Z) DO PEDAL DIREITO

Peso (kg)	Pedal Direito - Deformação Mecânica do Eixo Perpendicular Z ( $\mu$ Strains)					
	Medição Realizada com a Placa de Aquisição NI9237 - Incerteza de Medição: 0,2%					
	Eixo Lateral (X)		Eixo Paralelo (Y)		Eixo Perpendicular (Z)	
0	194	193	1429	1426	<b>30</b>	<b>27</b>
5	193	193	1439	1439	<b>51</b>	<b>46</b>
10	195	194	1445	1443	<b>64</b>	<b>64</b>
15	194	194	1448	1446	<b>81</b>	<b>81</b>
20	194	194	1450	1448	<b>102</b>	<b>99</b>
25	195	194	1452	1450	<b>120</b>	<b>116</b>
30	194	194	1452	1451	<b>135</b>	<b>134</b>
35	195	194	1455	1452	<b>152</b>	<b>152</b>
40	195	194	1453	1453	<b>174</b>	<b>169</b>
45	195	194	1455	1455	<b>190</b>	<b>187</b>
50	196	195	1456	1456	<b>207</b>	<b>204</b>
55	195	195	1457	1457	<b>222</b>	<b>222</b>
60	196	195	1464	1463	<b>243</b>	<b>240</b>
65	196	195	1466	1464	<b>262</b>	<b>258</b>
70	196	195	1463	1462	<b>277</b>	<b>275</b>
75	196	196	1462	1461	<b>293</b>	<b>293</b>



Erro de Linearidade do Eixo Perpendicular (Z) do Pedal Direito:

$$Erro_{PDZ}(\%) = \frac{(204,590 - 204,000) \times 100}{292,892} \cong 0,20\%$$

Sensibilidade do Eixo Perpendicular (Z) do Pedal Direito:

$$S_{PDZ} = \frac{\text{Deformação Mecânica}}{\text{Carga Aplicada}} = \frac{\pm 266 \mu\epsilon}{735,75 N} \cong 0,36 \mu\epsilon/N$$

**APÊNDICE D – TABELAS DE DADOS PARA OS ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE  
CALIBRAÇÃO DO PEDAL ESQUERDO**

PEDAL ESQUERDO - FORÇA APLICADA NO EIXO LATERAL (X)						
Tensão Elétrica após Ckt de Condicionamento – Fluke 175 – Escala Volts (0,15% + 2)						
Carga (N)	Tensão Elétrica em X (V)		Tensão Elétrica em Y (V)		Tensão Elétrica em Z (V)	
0	1,703	1,702	1,642	1,645	1,618	1,617
49,55	1,802	1,801	1,657	1,656	1,627	1,627
99,1	1,904	1,903	1,655	1,654	1,637	1,636
148,65	1,992	1,991	1,665	1,664	1,648	1,648
198,2	2,106	2,105	1,685	1,685	1,655	1,656
247,75	2,197	2,194	1,684	1,683	1,666	1,665
297,3	2,312	2,311	1,692	1,692	1,667	1,666
346,85	2,404	2,403	1,717	1,716	1,675	1,674
396,4	2,505	2,504	1,738	1,736	1,677	1,676
445,95	2,603	2,601	1,756	1,755	1,685	1,684
495,5	2,704	2,703	1,773	1,773	1,696	1,695
545,05	2,813	2,812	1,806	1,805	1,706	1,706
594,6	2,904	2,901	1,814	1,811	1,718	1,716
644,15	3,010	3,010	1,845	1,844	1,727	1,725
693,7	3,103	3,103	1,866	1,865	1,735	1,734
743,25	3,195	3,194	1,897	1,897	1,757	1,756

PEDAL ESQUERDO - FORÇA APLICADA NO EIXO PARALELO (Y)						
Tensão Elétrica após Ckt de Condicionamento – Fluke 175 – Escala Volts (0,15% + 2)						
Carga (N)	Tensão Elétrica em X (V)		Tensão Elétrica em Y (V)		Tensão Elétrica em Z (V)	
0	1,723	1,723	1,626	1,628	1,591	1,591
49,55	1,719	1,721	1,754	1,756	1,591	1,591
99,1	1,712	1,710	1,868	1,869	1,591	1,591
148,65	1,724	1,723	1,975	1,977	1,591	1,591
198,2	1,746	1,744	2,082	2,083	1,590	1,590
247,75	1,763	1,761	2,207	2,209	1,589	1,589
297,3	1,760	1,758	2,294	2,295	1,589	1,589
346,85	1,731	1,728	2,423	2,424	1,590	1,590

PEDAL ESQUERDO - FORÇA APLICADA NO EIXO PERPENDICULAR (Z)						
Tensão Elétrica após Ckt de Condicionamento – Fluke 175 – Escala Volts (0,15% + 2)						
Carga (N)	Tensão Elétrica em X (V)		Tensão Elétrica em Y (V)		Tensão Elétrica em Z (V)	
0	1,583	1,581	1,575	1,575	1,625	1,626
49,55	1,578	1,578	1,585	1,585	1,745	1,746
99,1	1,567	1,565	1,596	1,596	1,873	1,875
148,65	1,546	1,544	1,605	1,605	1,983	1,985
198,2	1,536	1,537	1,614	1,614	2,142	2,140
247,75	1,504	1,503	1,624	1,624	2,218	2,217
297,3	1,498	1,497	1,636	1,636	2,323	2,324
346,85	1,487	1,484	1,656	1,656	2,423	2,422
396,4	1,484	1,482	1,664	1,664	2,524	2,523
445,95	1,481	1,480	1,674	1,674	2,627	2,626
495,5	1,478	1,476	1,685	1,685	2,721	2,722
545,05	1,459	1,458	1,705	1,705	2,815	2,815
594,6	1,449	1,449	1,731	1,731	2,915	2,914
644,15	1,421	1,419	1,752	1,752	3,005	3,003
693,7	1,400	1,397	1,772	1,772	3,084	3,083
743,25	1,389	1,388	1,793	1,793	3,182	3,181

**APÊNDICE E – TABELAS DE DADOS PARA OS ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE  
CALIBRAÇÃO DO PEDAL DIREITO**

PEDAL DIREITO - FORÇA APLICADA NO EIXO LATERAL (X)						
Tensão Elétrica após Ckt de Condicionamento – Fluke 175 – Escala Volts (0,15% + 2)						
Carga (N)	Tensão Elétrica em X (V)		Tensão Elétrica em Y (V)		Tensão Elétrica em Z (V)	
0	1,623	1,623	1,683	1,683	1,611	1,611
49,55	1,722	1,724	1,774	1,776	1,611	1,611
99,1	1,824	1,821	1,725	1,724	1,607	1,608
148,65	1,932	1,934	1,758	1,754	1,598	1,598
198,2	2,034	2,035	1,764	1,761	1,588	1,588
247,75	2,145	2,144	1,782	1,786	1,578	1,579
297,3	2,261	2,263	1,824	1,825	1,568	1,567
346,85	2,351	2,356	1,845	1,844	1,548	1,548
396,4	2,442	2,441	1,867	1,863	1,539	1,539
445,95	2,553	2,553	1,883	1,884	1,518	1,517
495,5	2,653	2,652	1,915	1,913	1,580	1,580
545,05	2,753	2,757	1,947	1,945	1,489	1,489
594,6	2,868	2,863	1,975	1,973	1,486	1,487
644,15	2,995	2,992	2,013	2,012	1,468	1,467
693,7	3,117	3,110	2,068	2,067	1,459	1,458
743,25	3,183	3,180	2,086	2,085	1,459	1,459

PEDAL DIREITO - FORÇA APLICADA NO EIXO PARALELO (Y)						
Tensão Elétrica após Ckt de Condicionamento – Fluke 175 – Escala Volts (0,15% + 2)						
Carga (N)	Tensão Elétrica em X (V)		Tensão Elétrica em Y (V)		Tensão Elétrica em Z (V)	
0	1,604	1,603	1,609	1,608	1,610	1,608
49,55	1,604	1,603	1,717	1,716	1,616	1,615
99,1	1,600	1,599	1,836	1,834	1,624	1,623
148,65	1,594	1,593	1,954	1,952	1,637	1,635
198,2	1,560	1,559	2,068	2,067	1,633	1,631
247,75	1,556	1,555	2,187	2,185	1,645	1,644
297,3	1,584	1,583	2,254	2,253	1,669	1,668
346,85	1,584	1,583	2,472	2,470	1,711	1,709

PEDAL DIREITO - FORÇA APLICADA NO EIXO PERPENDICULAR (Z)						
Tensão Elétrica após Ckt de Condicionamento – Fluke 175 – Escala Volts (0,15% + 2)						
Carga (N)	Tensão em X (V)		Tensão em Y (V)		Tensão em Z (V)	
0	1,636	1,636	1,623	1,624	1,625	1,624
49,55	1,644	1,644	1,644	1,645	1,764	1,763
99,1	1,656	1,656	1,665	1,663	1,898	1,897
148,65	1,642	1,642	1,676	1,675	2,015	2,014
198,2	1,657	1,657	1,747	1,745	2,127	2,126
247,75	1,641	1,641	1,728	1,727	2,246	2,244
297,3	1,643	1,643	1,746	1,745	2,344	2,342
346,85	1,633	1,633	1,765	1,764	2,442	2,441
396,4	1,638	1,638	1,773	1,772	2,548	2,547
445,95	1,645	1,645	1,845	1,843	2,647	2,645
495,5	1,644	1,644	1,826	1,824	2,745	2,743
545,05	1,621	1,621	1,859	1,858	2,848	2,847
594,6	1,618	1,618	1,887	1,886	2,958	2,958
644,15	1,660	1,660	1,886	1,885	3,026	3,024
693,7	1,645	1,645	1,923	1,921	3,124	3,123
743,25	1,594	1,594	1,945	1,943	3,255	3,254

**ANEXO A – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO AMPLIFICADOR DE  
INSTRUMENTAÇÃO INA125U**

Especificações Técnicas INA125U	
Fabricante	Texas Instruments
Encapsulamento	SO-16
Alimentação Simétrica	$\pm 1,35V$ a $\pm 18V$
Corrente Quiescente	460 $\mu$ A
Corrente de Entrada	20 $\eta$ A
Variação de Offset	2 $\mu$ V/ $^{\circ}$ C
Tensão de Referência da Ponte	1,25V $\pm$ 0,5%
Variação na Tensão de Referência	18ppm/ $^{\circ}$ C
Nível de Ruído Elétrico	38nV/ $\sqrt{Hz}$
Faixa de Ganho	4 a 10000 V/V
Rejeição de Modo Comum	100dB

## ANEXO B – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO AMPLIFICADOR OPA4227

Especificações Técnicas OPA4227	
Fabricante	Texas Instruments
Encapsulamento	SO-14
Alimentação Simétrica	$\pm 2,5V$ a $\pm 18V$
CMRR	138dB
Ganho em Laço Aberto	160dB
Corrente de Fuga de Entrada	10nA Máximo
Tensão de <i>Offset</i>	75 $\mu$ V Máximo
Varição de <i>Offset</i>	$\pm 0,3\mu V/^{\circ}C$
Varição na Tensão de Referência	18ppm/ $^{\circ}C$
Nível de Ruído Elétrico	$3nV/\sqrt{Hz}$
Largura de Banda	8MHz, 2,3V/ $\mu$ s
Tempo de Resposta	5 $\mu$ s