

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

CARLOS RICARDO WISNIEWSKI FILHO

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA MEDIÇÃO E
ANÁLISE DE ESFORÇOS MECÂNICOS EM CHASSI TUBULAR DE
UM VEÍCULO**

Porto Alegre

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA MEDIÇÃO E
ANÁLISE DE ESFORÇOS MECÂNICOS EM CHASSI TUBULAR DE
UM VEÍCULO**

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito para graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Balbinot.

Porto Alegre

2018

CIP - Catalogação na Publicação

Wisniewski Filho, Carlos Ricardo

Desenvolvimento de um sistema para medição e análise de esforços mecânicos em chassi tubular de um veículo / Carlos Ricardo Wisniewski Filho. -- 2018.

112 f.

Orientador: Alexandre Balbinot.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Curso de Engenharia Elétrica, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. extensometria. 2. condicionamento de sinais. 3. instrumentação. 4. chassis. I. Balbinot, Alexandre, orient. II. Título.

CARLOS RICARDO WISNIEWSKI FILHO

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA MEDIÇÃO E ANÁLISE DE
ESFORÇOS MECÂNICOS EM CHASSI TUBULAR DE UM VEÍCULO**

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito para graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Balbinot.

Data de aprovação: 11 de janeiro de 2018.

Prof. Dr. Alexandre Balbinot
Orientador - UFRGS

Prof. Dr. Ály Ferreira Flores Filho
Chefe do Departamento de Engenharia
Elétrica - UFRGS

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Leia Bernardi Bagesteiro
UFRGS

Prof. Dr. Rafael Antônio Comparsi Laranja
UFRGS

Eng. André Vieira Pigatto
UFRGS

RESUMO

O objetivo do presente trabalho é desenvolver e implementar um sistema para a medição dos esforços mecânicos na estrutura de um veículo de chassi tubular de Alumínio 6063 T5, utilizado em competições de eficiência energética. Os esforços mecânicos foram obtidos pela deformação elástica do chassi, medida por meio de extensômetros bf350-3ab(23)n6 distribuídos nos pontos de interesse do chassi, durante a operação do veículo. O sistema de condicionamento do sinal dos sensores consiste de doze canais independentes com amplificadores de instrumentação MAX4195, filtros analógicos de topologia Sallen-Key, amplificadores de ganho programável MAX9939, conversores digital-analógico MAX5134 e analógico-digital MAX11040k, permitindo o ajuste do condicionador de sinais para as mais diversas situações de operação. O circuito condicionador utiliza interfaces SPI e i2c para controle e aquisição de dados, sendo estas comandadas por um *single-board computer* Raspberry Pi 3 model B com sistema operacional Raspbian Stretch Lite, baseado na distribuição Linux Debian. As rotinas de controle foram escritas na linguagem Python 2.7. As simulações computacionais do chassi para determinação das deformações mecânicas foram realizadas no software SolidWorks Trial 2017. Para a obtenção experimental destas deformações mecânicas, foi utilizado o módulo NI-9237, conectado ao chassi cDAQ-9174, ambos de fabricação da National Instruments. A partir dos dados experimentais, verificou-se que a sensibilidade das pontes extensiométricas implementadas foi, em média, 0,44 $\mu\text{m}/\text{kgf}$, o que prejudicou a performance do sistema de condicionamento e aquisição de dados devido à baixa amplitude elétrica dos sinais provenientes das pontes. Deste modo é possível a hipótese de que a estrutura mecânica foi superdimensionada e otimizações ao projeto desta possam ser realizadas.

ABSTRACT

The main objective of this project is to design and implement a measurement system, intended for the evaluation of the mechanical stresses within the chassis of a vehicle designed to be used in energy efficiency competitions. This chassis was constructed using extruded Aluminium pipe sections of alloy type 6063-T5. The mechanical strain was evaluated by the use of forty bf350-3ab(23)n6 strain gages in a Wheatstone bridge configuration, for a total of ten individual strain channels. The strain gage bridge signal conditioning system contains twelve individual channels and consists of instrumentation amplifiers. This signal conditioning system was split in two separate parts: the first one contains only analogue electronics and is comprised of instrumentation amplifiers, fixed-gain preamplifiers and Sallen-Key antialiasing filters. The second part contains mixed-signal electronics, such as Programmable-Gain Amplifiers, analogue-to-digital converters and digital-to-analogue converters, allowing a single circuit to cover a broad range of applications. The mixed-signal half of the signal conditioning system uses SPI and i2c interfaces for communications. These communications were managed by a Raspberry Pi 3 Model B single-board computer, running the Raspbian Stretch Lite operating system. All of the programs required to control the mixed-signal half of the signal conditioning unit were written in Python 2.7. In order to determine the mechanical strain of the mechanical structure, when subjected to varying loads, simulations were executed in SolidWorks Trial 2017. Experimentally, the mechanical strain figures were obtained by means of a National Instruments NI-9237 module, connected to a cDAQ-9174 chassis. From static strain tests, it was obtained that the average sensitivity of the load cells was $0.44 \mu\text{m}/\text{kgf}$, which hampered the performance of the signal conditioning system due to the low output of the load cells. Due to the low deformation observed in the chassis of the vehicle, it is possible that the structured was overengineered, enabling future optimizations to its project.

Lista de Figuras

Figura 1: Curva de tensão mecânica por deformação relativa de um corpo genérico.	13
Figura 2: Deformação de uma barra metálica quando sujeita a forças de tração (sup.) e compressão (inf.).	14
Figura 3: Fotografia de um extensômetro tipo folha uniaxial.....	16
Figura 4: Esquema de um circuito em ponte de Wheatstone.....	16
Figura 5: Diagrama de blocos geral do sistema de condicionamento proposto.	19
Figura 6: Extensômetros em configuração de ponte de Wheatstone.....	20
Figura 7: Disposição e conexão dos extensômetros sobre um elemento tubular do chassi.	20
Figura 8: Esquemático simplificado do estágio de ganho não-inversor.	22
Figura 9: Esquemático de um filtro passa-baixas Sallen-Key genérico.	24
Figura 10: Esquemático do filtro Sallen-Key Butterworth de oitava ordem.	25
Figura 11: Diagrama de Bode simulado via Matlab 2016 do filtro anti-aliasing de oitava ordem obtido através da função de transferência calculada.....	26
Figura 12: Resposta em frequência do filtro anti-aliasing obtida através de simulação spice.....	27
Figura 13: Esquemático do circuito de distribuição da tensão de referência.	29
Figura 14: Diagrama simplificado mostrando conexão do conversor D/A ao PGA.	30
Figura 15: Diagrama de blocos da conexão entre PGA, conversores D/A e A/D, Raspberry Pi 3 e conversor i2c/SPI: linhas tracejadas representam sinais digitais e linhas sólidas os sinais analógicos.	31
Figura 16: Fluxograma da rotina de configuração do ganho dos PGAs.....	33
Figura 17: Diagrama de blocos da rotina de autocompensação da tensão elétrica de offset das pontes extensiométricas.	34
Figura 18: Fluxograma da rotina para a aquisição de um número fixo N de amostras. Neste caso, N=200..	35
Figura 19: Fluxograma da rotina de aquisição contínua de dados.....	36
Figura 20: Detalhe da malha de simulação da dianteira do chassi.	38
Figura 21: Detalhe da malha de simulação da traseira do chassi.	38
Figura 22: Enumeração das células de carga sobre os elementos da suspensão dianteira, vista a partir da traseira do chassi.	39
Figura 23: Enumeração das células de carga sobre os elementos da suspensão traseira.	40
Figura 24: Detalhe da utilização do recurso split line na célula de carga número seis.	40
Figura 25: Fotografia do chassi utilizado neste trabalho.	41
Figura 26: Detalhe da suspensão dianteira esquerda após lixamento.....	42
Figura 27: Detalhe da suspensão dianteira direita após lixamento.....	42
Figura 28: Detalhe da suspensão traseira após lixamento.	43
Figura 29: Posicionamento dos extensômetros na estrutura tubular sob deformação axial. Vista superior. .	44
Figura 30: Ponte de extensômetros colados à suspensão dianteira. No canto inferior direito, uma ilustração do extensômetro utilizado.	45
Figura 31: Ponte de extensômetros colados à suspensão traseira. No canto inferior direito, uma ilustração do extensômetro utilizado.	45
Figura 36: Cadeia de medidas proposta.	48
Figura 37: Resposta em frequência experimental do filtro anti-aliasing.....	51
Figura 38: Forma de onda na entrada da etapa de condicionamento digitalmente controlada e sinais adquiridos pelo sistema de aquisição de dados implementado.....	52
Figura 39: Relação entre deformação mecânica simulada e carregamento mecânico: células 1 e 7.....	53
Figura 40: Relação entre deformação mecânica simulada e carregamento mecânico: células 2 e 8.....	54

Figura 41: Relação entre deformação mecânica simulada e carregamento mecânico: células 3 e 5.....	54
Figura 42: Relação entre deformação mecânica simulada e carregamento mecânico: células 4 e 6.....	55
Figura 43: Relação entre deformação mecânica simulada e carregamento mecânico: células 9 e 10.....	56
Figura 44: Função de transferência experimental das pontes extensiométricas: células 1 e 7.....	57
Figura 45: Função de transferência experimental das pontes extensiométricas: células 2 e 8.....	58
Figura 46: Função de transferência experimental das pontes extensiométricas: células 3 e 5.....	58
Figura 47: Função de transferência experimental das pontes extensiométricas: células 4 e 6.....	59
Figura 48: Função de transferência experimental das pontes extensiométricas: células 9 e 10.....	61
Figura 49: Função de transferência experimental obtida com o módulo NI-9237: células 1 e 7.....	62
Figura 50: Função de transferência experimental obtida com o módulo NI-9237: células 2 e 8.....	63
Figura 51: Função de transferência experimental obtida com o uso do módulo NI-9237: células 3 e 5.....	63
Figura 52: Função de transferência experimental obtida com o módulo NI-9237: células 4 e 6.....	64
Figura 53: Função de transferência experimental obtida com o módulo NI-9237: células 9 e 10.....	65
Figura 54: Funções de transferência: linha sólida representa a função simulada e a tracejada a experimental para as células 1 e 7.....	66
Figura 55: Funções de transferência: linha sólida representa a função simulada e a tracejada a experimental para as células 2 e 8.....	67
Figura 56: Funções de transferência: linha sólida representa a função simulada e a tracejada a experimental para as células 3 e 5.....	67
Figura 57: Funções de transferência: linha sólida representa a função simulada e a tracejada a experimental para as células 4 e 6.....	68
Figura 58: Funções de transferência: linha sólida representa a função simulada e a tracejada a experimental para as células 9 e 10.....	68
Figura 59: Função de transferência experimental obtida com o uso do sistema de condicionamento: células 1, 7, 2 e 8.....	70
Figura 60: Função de transferência experimental obtida com o uso do sistema de condicionamento: células 3,5, 4 e 6.....	70
Figura 61: Função de transferência experimental obtida com o uso do sistema de condicionamento: células 9 e 10.....	71
Figura 62: Comparação entre as funções de transferência experimentais obtidas com o uso do multímetro de bancada (linha tracejada) e com o circuito de condicionamento (linha sólida): células 1 e 7.....	72
Figura 63: Comparação entre as funções de transferência experimentais obtidas com o uso do multímetro de bancada (linha tracejada) e com o circuito de condicionamento (linha sólida): células 2 e 8.....	73
Figura 64: Comparação entre as funções de transferência experimentais obtidas com o uso do multímetro de bancada (linha tracejada) e com o circuito de condicionamento (linha sólida): células 3 e 5.....	73
Figura 65: Comparação entre as funções de transferência experimentais obtidas com o uso do multímetro de bancada (linha tracejada) e com o circuito de condicionamento (linha sólida): células 4 e 6.....	74
Figura 66: Comparação entre os as funções de transferência experimentais obtidas com o uso do multímetro de bancada (linha tracejada) e com o circuito de condicionamento (linha sólida): células 9 e 10.....	74
Figura 67: Cadeia de medidas experimental dividida em cinco etapas.....	75
Figura 73: Diagrama de blocos proposto do sistema de condicionamento de sinais para operação em meia ponte.....	80
Figura 74: Conexão entre um microcontrolador e o módulo de rádio NRF24L01.....	82

Lista de Tabelas

Tabela 1: Valores dos componentes, suas respectivas incertezas e função de transferência de cada estágio do filtro.	26
Tabela 2: Estrutura do pacote de dados a ser enviado via interface i2c.	32
Tabela 3: Resolução de entrada, resolução de saída, sensibilidade e erro de linearidade propostos.	48
Tabela 4: Ganho por canal do estágio analógico de condicionamento.	50
Tabela 7: Funções de transferência experimentais, erros de linearidade e sensibilidade dos dados medidos.	59
Tabela 8: Funções de transferência experimentais, erros de linearidade e sensibilidade dos dados medidos (carregamento mecânico no eixo traseiro).	61
Tabela 9: Funções de transferência experimentais, erros de linearidade e sensibilidade para cada célula de carga, com base no módulo NI-9237.	64
Tabela 10: Funções de transferência experimentais, erros de linearidade e sensibilidade para os ensaios com o módulo NI-9237.	65
Tabela 11: Funções de transferência experimentais, erros de linearidade e sensibilidade. Dados coletados através de ensaios estáticos com o circuito de condicionamento e aquisição de dados.	71
Tabela 12: Funções de transferência experimentais, erros de linearidade e sensibilidade. Dados coletados através de ensaios estáticos com o circuito de condicionamento e aquisição de dados.	71
Tabela 14: Resolução de entrada, resolução de saída, sensibilidade e erro de linearidade das etapas da cadeia de medidas experimental.	76

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	10
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1.	Tensão e deformação mecânica.....	12
2.2.	Transdutores de força.....	14
3.	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	19
3.1.	Condicionamento de Sinal.....	19
3.1.1.	Filtro <i>anti-aliasing</i>	23
3.1.2.	Referência de tensão	28
3.1.3.	Estágio de condicionamento de sinais digitalmente programável	29
3.1.4.	Rotinas desenvolvidas para controle e aquisição de dados.....	32
3.1.5.	<i>Layout</i> da Placa de Circuito Impresso.....	36
3.2.	Simulação computacional dos esforços mecânicos no chassi.....	37
3.2.1.	Definição dos locais de cimentação dos extensômetros.....	39
3.3.	Cimentação dos extensômetros na estrutura metálica	41
3.4.	Ensaio das pontes de <i>strain gages</i>	46
3.5.	Cadeia de Medidas Proposta.....	47
4.	Resultados e Discussões	50
4.1.	Validação do sistema de condicionamento desenvolvido	50
4.2.	Resultados das simulações computacionais	53
4.3.	Determinação das Funções de Transferência experimentais em Tensão Elétrica	56
4.4.	Caracterização das funções de transferência experimentais em função de deformação mecânica 61	
4.5.	Resultados do Ensaio estático com o sistema de condicionamento de sinais.....	69
4.6.	Cadeia de medidas experimental.....	75
5.	Conclusões.....	78
6.	Sugestões para trabalhos futuros.....	80
	Referências Bibliográficas.....	83
	ANEXOS	84

1. INTRODUÇÃO

Durante as últimas décadas no Brasil, competições de eficiência energética veicular têm se tornado cada vez mais populares, refletindo a necessidade do aumento da eficiência energética dos meios de transporte atuais. Nestas competições, alunos de engenharia se propõem a projetar, construir e validar a performance de protótipos veiculares. Estes veículos devem ser capazes de cumprir os objetivos determinados pela equipe organizadora do evento utilizando a menor quantidade de energia elétrica possível. Durante a etapa de projeto do veículo em software CAD, é bastante comum que não sejam executadas as simulações dinâmicas do veículo, tipicamente pela dificuldade em replicar, no ambiente de simulação, condições às quais o protótipo será submetido, bem como o grande poder computacional requerido por este tipo de simulação, por vezes requerendo *hardware* indisponível aos projetistas.

Assim sendo, o projeto desenvolvido neste trabalho é justificado pela falta de informações que dizem respeito aos esforços mecânicos aos quais o chassi do veículo está submetido, permitindo a coleta de informações que permitam otimizar o projeto do veículo, levando a uma possível economia de material, redução do peso, melhorias na segurança e aumento da eficiência energética do protótipo. A partir destas colocações, o trabalho visa desenvolver e validar um sistema para a medição dos esforços mecânicos em áreas-chave do chassi do protótipo de competição elétrico Taura, da equipe Bagual Racing, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Como objetivos primários, portanto, tem-se o desenvolvimento e validação de um sistema de condicionamento de sinal dos sensores empregados e aquisição de dados relativos aos esforços mecânicos no chassi do veículo em estudo. Os esforços mecânicos foram obtidos a partir da deformação da estrutura metálica do chassi, fazendo o uso de extensômetros. Deseja-se, ainda, que o circuito condicionador possa se adaptar às mais diversas condições de operação sem a necessidade de intervenções físicas no circuito, o que foi implementado com o uso de amplificadores de ganho programável (PGAs), e conversores digital-analógicos. Para facilitar

análises posteriores, os dados coletados serão ser salvos em um dispositivo de armazenamento externo de estado sólido.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Tensão e deformação mecânica

De acordo com (GHAVAMI, 2015), quando um corpo é submetido a forças externas, um sistema de forças internas desenvolve-se, se opondo às forças externas aplicadas. A intensidade dessas forças opositoras pode ser determinada como na Equação (1), dividindo a força total aplicada pela área total da seção transversal, levando em consideração que a tensão mecânica é uniforme em todo o material, o que é verdadeiro para corpos homogêneos.

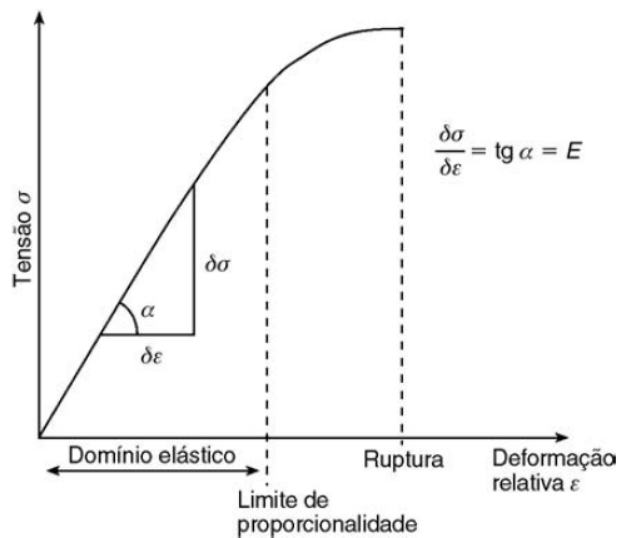
$$\sigma = F/A \quad (1)$$

Segundo (GHAVAMI, 2015; HIBBELER, 2011), quando um corpo é submetido a forças de tração ou compressão, dimensões deste corpo serão alteradas de acordo com o carregamento mecânico aplicado ao corpo. A deformação total desse corpo, denotada por δ , é dada pela diferença entre o comprimento original L do corpo e o comprimento final L_f após a aplicação da força axial no corpo, tal como mostra a Equação (2):

$$\delta = L - L_f \quad (2)$$

Segundo (BALBINOT & BRUSAMARELLO, 2011; HIBBELER, 2011), ao submeter um corpo a uma tensão mecânica, ocorrerá a deformação elástica do material até um valor de tensão mecânica crítico. A partir deste ponto, ocorrerá a deformação plástica do material. A deformação elástica se dá quando o material é capaz de retornar às suas dimensões originais ao cessar a aplicação de forças externas. Caso o corpo não retorne às dimensões originais após a remoção do carregamento mecânico, diz-se que o corpo sofreu deformação plástica (HIBBELER, 2011). A Figura 1 mostra a curva de tensão mecânica δ por deformação relativa ε de um corpo genérico.

Figura 1: Curva de tensão mecânica por deformação relativa de um corpo genérico.



Fonte: Adaptado livremente de (BALBINOT & BRUSAMARELLO, 2011).

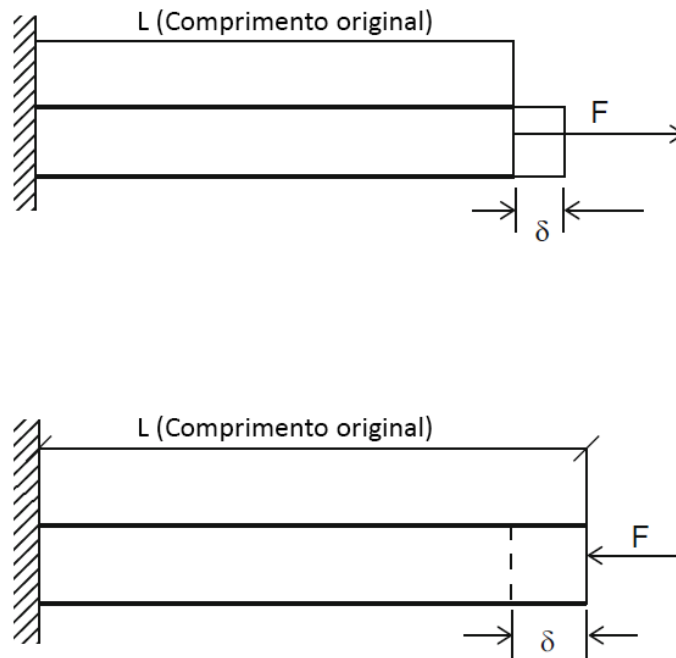
Na maioria das aplicações de engenharia, é desejável expressar a deformação mecânica em uma base unitária (GHAVAMI, 2015). Deste modo, define-se que a deformação mecânica, representada por ε , é dada pela razão entre a deformação total δ e o comprimento total L do corpo, como na Equação (3):

$$\varepsilon = \delta/L \quad (3)$$

Através da Lei de Hooke, é possível relacionar as tensões mecânicas com a deformação do material (BALBINOT & BRUSAMARELLO, 2011), sendo $\sigma = E\varepsilon$ (tração e compressão) e $\tau = G\varepsilon_\tau$ (cisalhamento), sendo E e G os módulos de elasticidade e cisalhamento inerentes do material.

Uma ilustração da deformação do material quando sujeito a esforços axiais pode ser apreciada na Figura 2.

Figura 2: Deformação de uma barra metálica quando sujeita a forças de tração (superior) e compressão (inferior).



Fonte: Adaptado livremente de (GHAVAMI, 2015).

Conforme (HIBBELER, 2011; GHAVAMI, 2015), a maioria dos projetos em engenharia envolvem aplicações em que apenas pequenas deformações são permitidas, de modo que, tipicamente, $\varepsilon \ll 1$. Este tipo de análise, que assume valores muito pequenos para ε , recebe o nome de Análise de Pequenos Esforços.

2.2. Transdutores de força

De acordo com (MORRIS *et al.*, 2012), a medição da força aplicada a um corpo pode ser feita com o uso de acelerômetros, dado que a aceleração de um objeto é dependente de sua massa e da força aplicada sobre ele. Em aplicações experimentais, todavia, os objetos não são entidades livres no espaço, mas sim parte de um sistema mais complexo e não podem acelerar livremente. A utilização de acelerômetros como transdutores de força pode, por exemplo, se demonstrar útil para determinar o impulso de motores em aplicações aeroespaciais, assim como, medir e monitorar vibrações estruturais. Porém, como este trabalho visa a medição dos

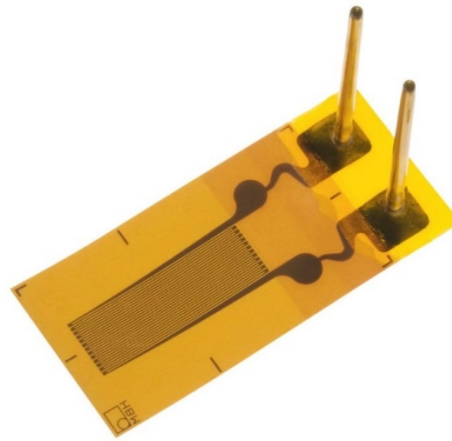
esforços mecânicos em um chassi tubular, outros métodos de medição de força foram adotados.

Como abordado na Seção 2.1, a deformação de um corpo é dependente do carregamento mecânico sobre ele. Assim sendo, é possível determinar a intensidade da força atuando sobre um corpo a partir da deformação física deste corpo. Para isso, uma solução relativamente simples é o uso de extensômetros de resistência elétrica, ou *strain gages*. Segundo (BALBINOT & BRUSAMARELLO, 2011), a resistência elétrica de materiais metálicos se altera de maneira linear ao sofrer deformação na região elástica. Além disso, a variação relativa da resistência elétrica dividida pela variação relativa da deformação é uma constante, como mostra a Equação (4). Esta constante, tipicamente denotada por K , denomina-se “fator *gage*” e caracteriza a sensibilidade estática do sensor.

$$\frac{R/R_0}{l/l_0} = K = \frac{R/R_0}{\varepsilon} \quad (4)$$

Segundo (BALBINOT & BRUSAMARELLO, 2011), extensômetros de fio consistem em um filamento fino esticado entre dois pontos. Ao variar a distância entre esses pontos, o fio deforma-se elasticamente e a resistência elétrica dele variará. Este tipo de extensômetro, todavia, tornou-se obsoleto com o desenvolvimento dos extensômetros tipo folha, nos quais um elemento resistivo é depositado sobre um substrato bastante elástico de poliamida ou epóxi. O substrato, além de servir como base para a grade do sensor, permite que ele seja fixado na estrutura sob teste e isola eletricamente o sensor do restante da estrutura. Apenas como exemplo, a Figura 3 mostra um extensômetro tipo folha uniaxial.

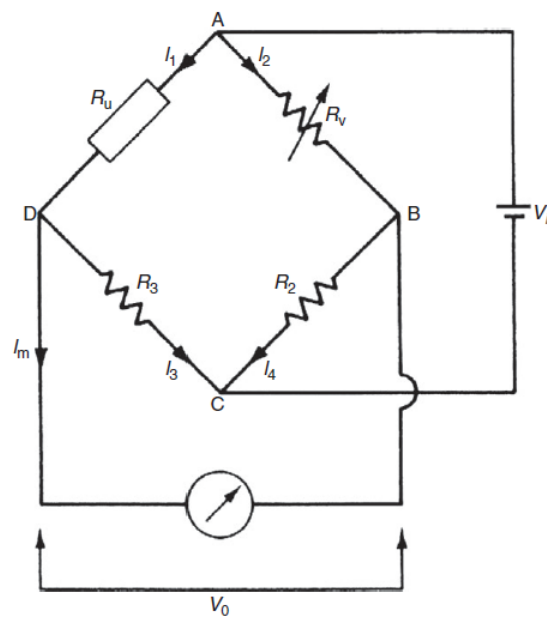
Figura 3: Fotografia de um extensômetro tipo folha uniaxial.



Fonte: Adaptado livremente de *Strain Gages Catalog, HBM Test and Measurement, 2015*.

Como é possível deduzir da Equação (4), a variação da resistência elétrica do extensômetro é bastante pequena. Por exemplo, para um extensômetro com fator *gage* 2 e resistência nominal de 350 Ohms, submetido a uma deformação de $100\mu\text{m/m}$, a variação de resistência elétrica seria da ordem de 0,07 Ohms. Necessita-se, portanto, de um método que permita avaliar esta variação de resistência elétrica de maneira confiável. Segundo (MORRIS *et al.*, 2012), um dos métodos mais comuns de medir a variação da resistência elétrica de um extensômetro é utilizando um circuito em ponte de Wheatstone, como mostra a Figura 4.

Figura 4: Esquema de um circuito em ponte de Wheatstone.



Fonte: Adaptado livremente de (MORRIS *et al.*, 2012).

Analisando o circuito da Figura 4, e assumindo que o dispositivo medidor de tensão elétrica V_0 é de alta impedância de entrada, a ponto de ser possível aproximar I_m para zero, tem-se que $I_1 = I_3$ e $I_2 = I_4$.

Pela Lei de Ohm, deduz-se:

$$I_1 = \frac{V_i}{R_u + R_3} \quad (5)$$

$$I_2 = \frac{V_i}{R_v + R_2} \quad (6)$$

Calculando a queda de tensão entre AD e AB:

$$V_{AD} = I_1 R_u = \frac{V_i R_u}{R_u + R_3}; V_{AB} = I_2 R_v = \frac{V_i R_v}{R_v + R_2} \quad (7)$$

Finalmente, por superposição, tem-se que $V_o = V_{BA} + V_{AD} = -V_{AB} + V_{AD}$.

De modo que:

$$V_o = -\frac{V_i R_v}{R_v + R_2} + \frac{V_i R_u}{R_u + R_3} \quad (8)$$

Assim sendo, existe uma relação entre a tensão de saída proporcional à variação da resistência elétrica do elemento sensor. Além disso, é possível ainda substituir as resistências fixas do circuito da Figura 4 por extensômetros, afim de aumentar a sensibilidade da ponte. Dado que os extensômetros metálicos são altamente lineares (BALBINOT & BRUSAMARELLO, 2011), a saída da ponte de Wheatstone variará linearmente com a deformação do material sob teste. Da ponte de Wheatstone ilustrada na Figura 4, percebe-se ainda que quando $\frac{R_u}{R_3} = \frac{R_v}{R_2}$, a tensão elétrica de saída da ponte será nula. Isto é bastante útil, uma vez que é possível ajustar a ponte de maneira que o sinal de saída dela não tenha uma tensão elétrica constante DC, facilitando posteriores etapas de condicionamento e permitindo a utilização de amplificadores de ganho mais elevados, sem o risco de saturação do sinal. A partir

da saída em tensão da ponte de Wheatstone, é possível amplificar este sinal, filtrá-lo e conectá-lo a um conversor analógico-digital para a digitalização e posterior análise.

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

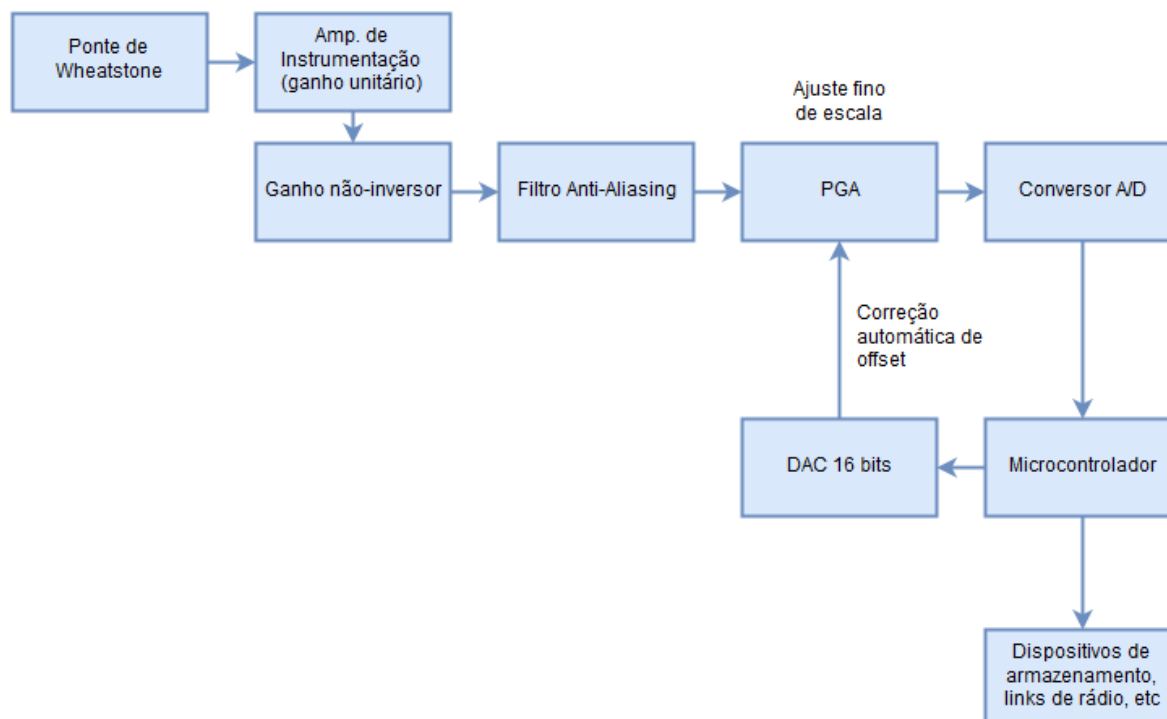
3.1. Condicionamento de Sinal

Considerando que, para a avaliação do carregamento mecânico na estrutura do chassi, são necessários diversos elementos sensores, os quais estão sujeitos a carregamentos mecânicos distintos, foi estipulado que o condicionador de sinal dos extensômetros deve atender às seguintes especificações:

- permitir o balanceamento automático da ponte de Wheatstone;
- permitir que o ganho do sinal possa ser ajustado de maneira simples, de modo que um único circuito de condicionamento possa ser utilizado em todo o projeto;
- permitir operação com fontes de alimentação simples (*single-ended*).

Com base nessas especificações, é proposto um sistema de condicionamento de sinais conforme mostrado na Figura 5:

Figura 5: Diagrama de blocos geral do sistema de condicionamento proposto.



Para a análise dos esforços mecânicos, foram utilizadas somente pontes de Wheatstone com quatro extensômetros, conectados tal como mostra a Figura 6, com R2 e R4 posicionados na direção principal de deformação e R1 e R3 posicionados perpendicularmente à direção principal de deformação, de modo a capturar a deformação principal e as deformações devido ao Efeito Poisson, bem como, tornar a ponte menos sensível a variações térmicas. A Figura 7 mostra a disposição destes extensômetros sobre um elemento mecânico tubular do chassi.

Figura 6: Extensômetros em configuração de ponte de Wheatstone.

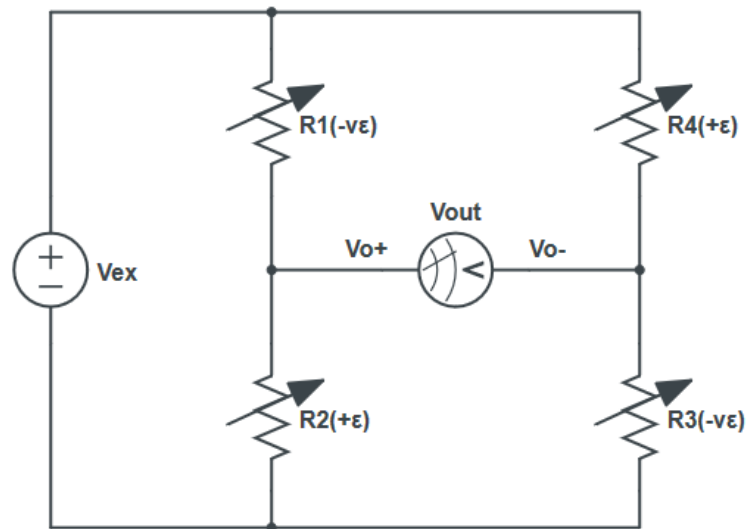
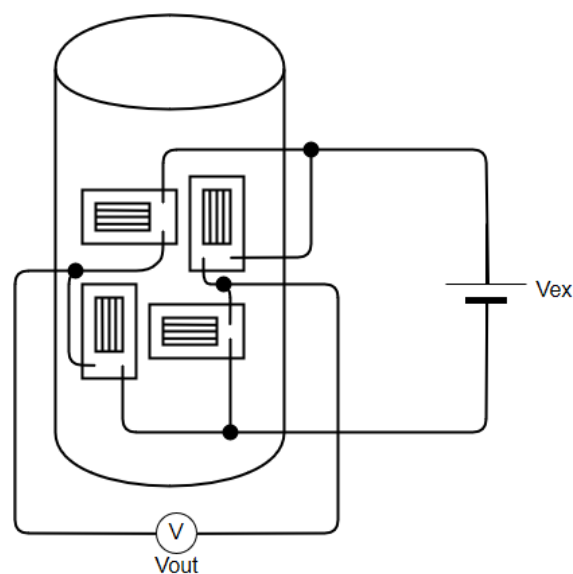


Figura 7: Disposição e conexão dos extensômetros sobre um elemento tubular do chassi.



Assumindo que o carregamento mecânico desta célula de carga ocorre na direção axial, a deformação relativa ε do material, instrumentado conforme as Figuras 6 e 7, é dada por (9):

$$\varepsilon = -\frac{2V_r}{K[(\nu + 1) - V_r(\nu - 1)]} \quad (9)$$

Onde K é o fator *gage* do extensômetro, ν é o coeficiente de Poisson, e $V_r = \left(\frac{V_{out}}{V_{ex}}\right)_{com\ carregamento\ mecânico} - \left(\frac{V_{out}}{V_{ex}}\right)_{sem\ carregamento\ mecânico}$. Considerando K=2 e $\nu = 0,33$ (tabelado em *Properties of Wrought Aluminum* p.104, *National Institute of Standards and Technology*, Alumínio 6063-T5), a Equação (9) pode ser reescrita como:

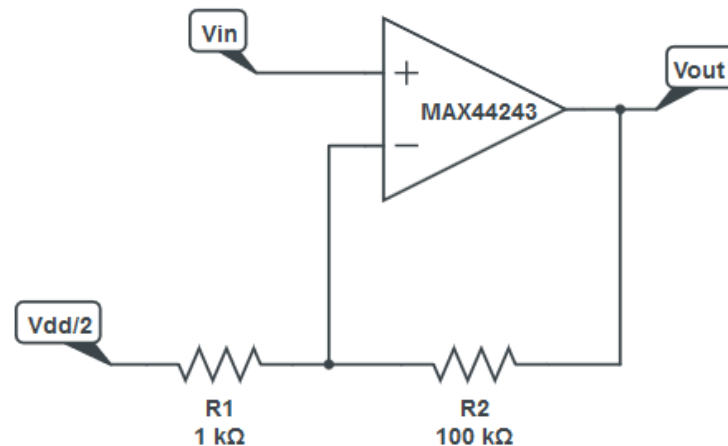
$$\varepsilon = -\frac{V_r}{1,33 + 0,67 \cdot V_r} \quad (10)$$

A tensão elétrica de saída da ponte de Wheatstone é a diferença de tensão elétrica entre os nós centrais da ponte, conforme mostrado na Figura 6. Para facilitar o projeto do sistema de condicionamento de sinais, deseja-se obter um sinal *single-ended*, referenciado ao terra do circuito eletrônico. Para isto, foram empregados amplificadores de instrumentação MAX4195, de ganho fixo unitário, que cumprem esta função e permitem a soma de uma tensão elétrica constante ao sinal de saída, permitindo que sejam medidas excursões negativas da ponte de Wheatstone. Esta tensão elétrica de *offset* foi fixada em $V_{dd}/2$, de modo a permitir que o *range* do sinal de saída do amplificador de instrumentação seja o mesmo, tanto para excursões positivas quanto para excursões negativas das pontes extensiométricas. A Equação (11) apresenta a função de saída deste estágio do condicionamento.

$$V_{out_MAX4195} = (V_{o+} - V_{o-}) + V_{dd}/2 \quad (11)$$

O sinal de saída do amplificador de instrumentação, agora *single-ended*, é amplificado com ganho não-inversor $G = 101 \pm 2$ V/V, cujo esquemático pode ser visto na Figura 8. A Equação (12) mostra a saída deste amplificador em função da tensão elétrica de entrada V_{in} .

Figura 8: Esquemático simplificado do estágio de ganho não-inversor.



$$V_{out} = \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \left(V_{in} - \frac{Vdd}{2}\right) + \frac{Vdd}{2} = 101 \left(V_{in} - \frac{Vdd}{2}\right) + \frac{Vdd}{2} \quad (12)$$

O sinal elétrico de saída do estágio de amplificação da Figura 8 é, então, filtrado por um filtro *anti-aliasing* Butterworth de oitava ordem, conforme descrito na Seção 3.1.1. O sinal filtrado, ainda *single-ended*, é, então, entregue ao estágio de condicionamento digitalmente programável, conforme descrito na Seção 3.1.3.

Para validar esta etapa do condicionamento de sinais, a entrada não-inversora do amplificador de instrumentação foi conectada à saída de um gerador de funções BK Precision 4084, que foi ajustado para gerar uma forma de onda senoidal de amplitude $31,2 \pm 0,2$ mV, frequência de $50,00 \pm 0,01$ Hz e tensão elétrica de *offset* de $2,50 \pm 0,01$ V. A entrada inversora do amplificador de instrumentação foi fixada em $2,500 \pm 0,001$ V através de uma referência de tensão MAX6325. Um osciloscópio Agilent DSO1072B foi utilizado para monitorar a forma de onda do sinal de entrada e de saída do condicionador e calcular a amplitude desses sinais. Cada valor de amplitude coletado foi a média aritmética de 256 aquisições consecutivas das formas de onda obtidas pelo osciloscópio.

3.1.1. Filtro *anti-aliasing*

Com o intuito de limitar a banda do sinal que é disponibilizado ao conversor analógico-digital, um filtro *anti-aliasing* foi projetado. As premissas do filtro projetado foram:

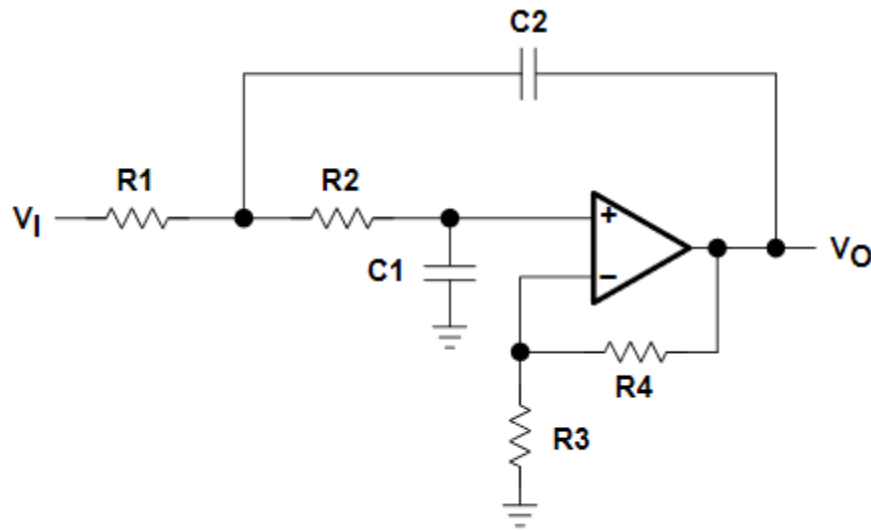
1. resposta plana na banda de passagem;
2. característica não-inversora, possibilitando operação *single-supply*;
3. alta impedância de entrada;
4. atenuação de, ao menos, -40 dB em $f = 2f_c$, garantindo a boa performance do conversor A/D;
5. ganho unitário na faixa de passagem.

A partir do requisito (1), foi definido que o filtro deverá ter resposta do tipo Butterworth, dado que este tipo de filtro apresenta resposta maximamente plana na banda de passagem (Oppenheim *et al.*, 1999). Do requisito (3), foi definido que um filtro ativo deverá ser utilizado, dada a alta impedância de entrada típica dos amplificadores operacionais modernos. A utilização de filtros ativos facilita a realização de filtros de ordens maiores, dada a baixa impedância de saída, garantindo que cada estágio adicionado não atuará como carga para o estágio anterior.

Sabendo que deverá ser utilizado um filtro ativo e não inversor (conforme requisito (2)) com resposta Butterworth, definiu-se que seria utilizada a topologia Sallen-Key, por satisfazer os requisitos impostos e ser de fácil implementação, exigindo apenas amplificadores operacionais, capacitores e resistores.

Do critério (4), definiu-se a ordem do filtro; dado que a atenuação de um filtro com resposta do tipo Butterworth é de -6 dB/oitava (-20 dB/década), necessita-se de um filtro de, no mínimo, ordem 7. Sabendo que cada bloco Sallen-Key é de ordem 2, um filtro de oitava ordem foi implementado. A Figura 9 mostra o esquemático de um filtro genérico na topologia Sallen-Key, cuja função de transferência é dada pela Equação (13).

Figura 9: Esquemático de um filtro passa-baixas Sallen-Key genérico.



$$H(s) = \frac{\frac{R3 + R4}{R3}}{s^2(R1R2C1C2) + s\left(R1C1 + R2C1 + R1C2\left(-\frac{R4}{R3}\right)\right) + 1} \quad (13)$$

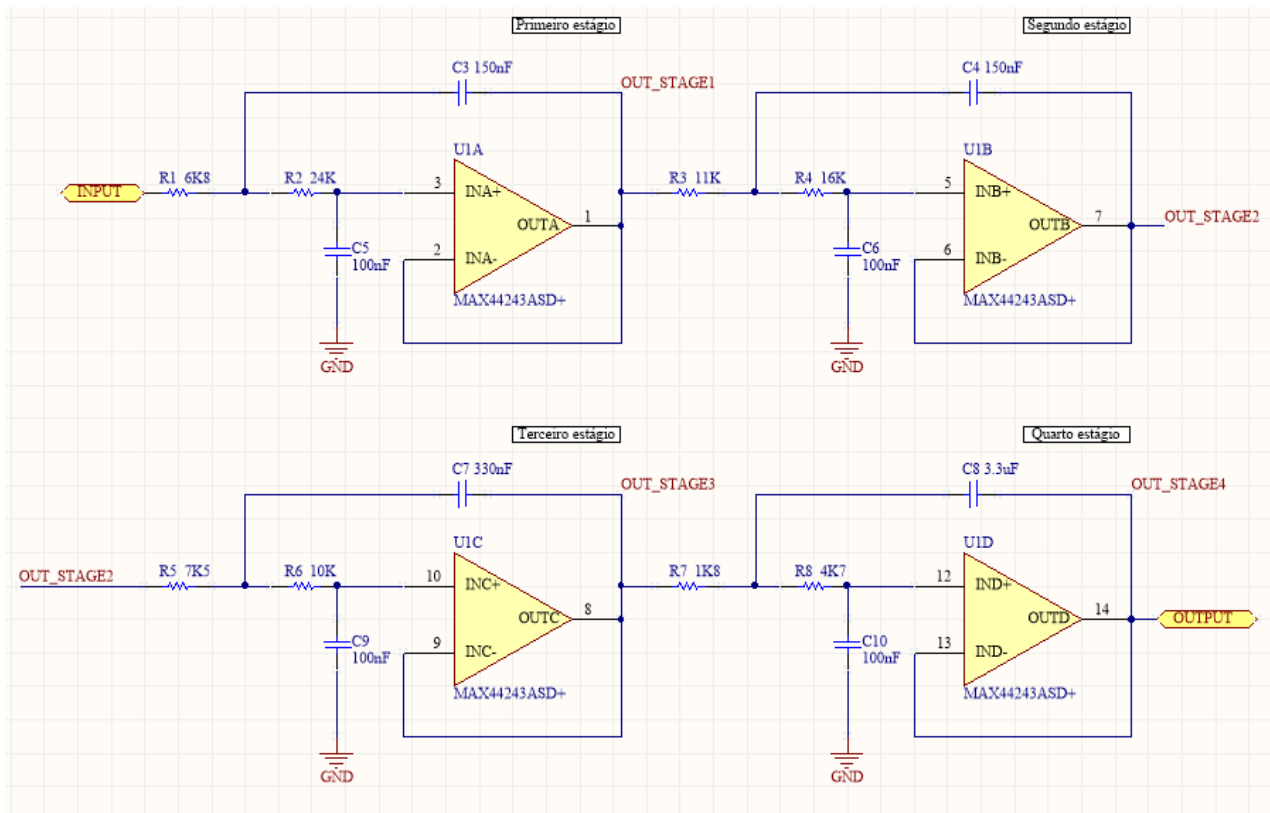
Considerando que o filtro projetado deverá possuir ganho unitário, R4 deverá ser um curto-circuito e R3 um circuito aberto, de modo que é possível simplificar a Equação (13), como mostra a Equação (14).

$$H(s) = \frac{1}{s^2(R1R2C1C2) + s(R1C1 + R2C1) + 1} \quad (14)$$

Para o projeto do filtro, foi utilizada a ferramenta FilterPro Desktop v3.1.0, desenvolvida pela Texas Instruments especificamente para facilitar o cálculo de filtros ativos. A frequência de corte do filtro foi fixada em 100 Hz, de modo que o conversor A/D deverá trabalhar a, pelo menos, 200 amostras por segundo para evitar *aliasing*. No sistema experimental, a taxa de amostragem será superior a esta, permitindo ainda que filtros digitais sejam implementados sem prejudicar a performance do sistema de aquisição de dados. Assim sendo, o circuito da Figura 10 foi projetado, considerando-se o uso de resistores da série E24, com 5% de tolerância, e capacitores série E6, com 20% de tolerância. O amplificador operacional MAX44243 foi escolhido por ter excelente estabilidade térmica (*drift* de tensão de *offset* máximo de 20 nV/°C), tensão de *offset* máxima de $5 \pm 2 \mu\text{V}$ e saída *rail-to-rail*, permitindo que

o circuito seja alimentando com baixa tensão elétrica sem degradação da performance.

Figura 10: Esquemático do filtro Sallen-Key Butterworth de oitava ordem.

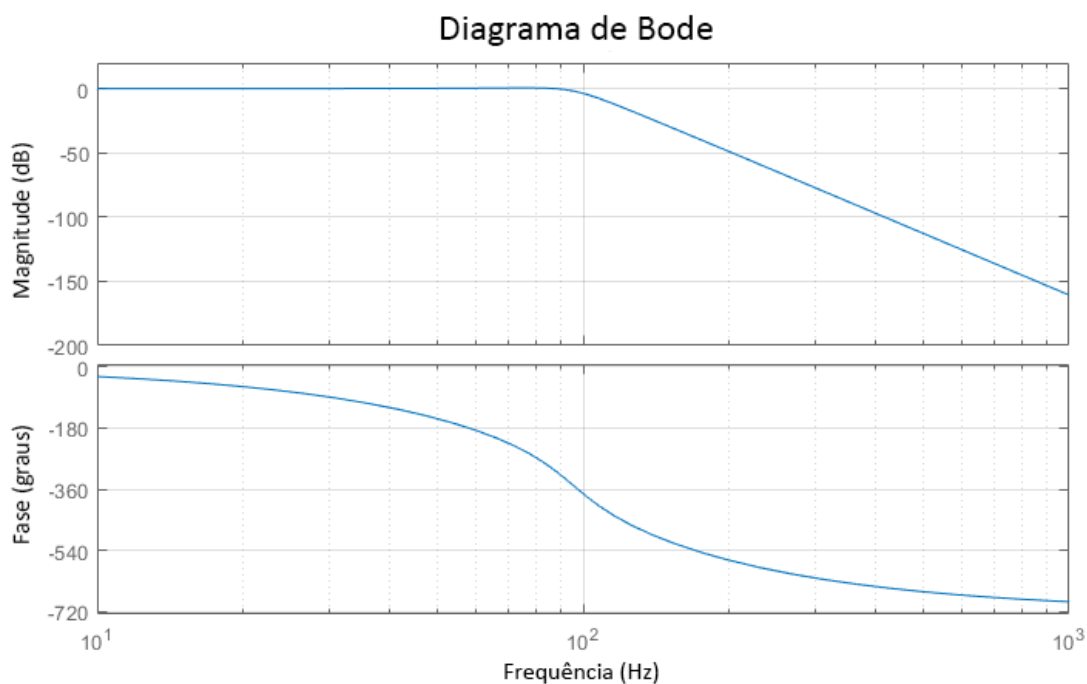


Da Equação (14), é possível, então, obter a função de transferência de cada estágio de filtragem, como mostra a Tabela 1. A função de transferência geral do filtro de oitava ordem pode ser obtida pela multiplicação das funções de transferência de cada estágio no domínio da frequência. Para fins de verificação das funções de transferência do filtro projetado, uma simulação no *software* Matlab 2012b foi realizada, permitindo a análise do comportamento das funções de transferência do filtro proposto através de um Diagrama de Bode, disponível na Figura 11. Esta simulação assume que todos os amplificadores operacionais são ideais.

Tabela 1: Valores dos componentes, suas respectivas incertezas e função de transferência de cada estágio do filtro.

Estágio	R1 (k Ω)	R2 (k Ω)	C1 (nF)	C2 (nF)	H(s)
1	6,8 \pm 0,10	24 \pm 0,34	100 \pm 5,77	150 \pm 8,66	$\frac{1}{s^2(2,448 \cdot 10^{-6}) + s(0,00308) + 1}$
2	11 \pm 0,16	16 \pm 0,23	100 \pm 5,77	150 \pm 8,66	$\frac{1}{s^2(2,640 \cdot 10^{-6}) + s(0,00270) + 1}$
3	7,5 \pm 0,11	10 \pm 0,14	100 \pm 5,77	330 \pm 19,1	$\frac{1}{s^2(2,475 \cdot 10^{-6}) + s(0,00175) + 1}$
4	1,8 \pm 0,03	4,7 \pm 0,068	100 \pm 5,77	3300 \pm 190,5	$\frac{1}{s^2(2,792 \cdot 10^{-6}) + s(0,00065) + 1}$

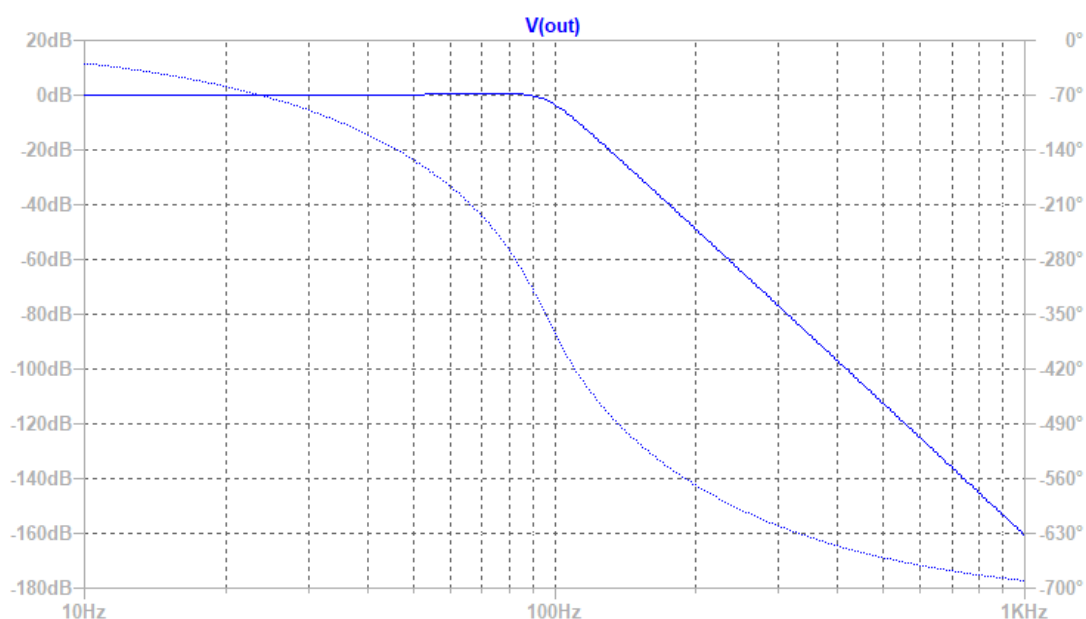
Figura 11: Diagrama de Bode simulado via Matlab 2012b do filtro anti-aliasing de oitava ordem obtido através da função de transferência calculada.



A partir do Diagrama de Bode da Figura 11, verifica-se que a frequência de corte do filtro projetado foi de 99,6 Hz, 0,4% menor do que a frequência de projeto. Uma justificativa possível para isto é a necessidade de adequação do projeto aos valores de componentes passivos disponíveis comercialmente, o que pode ocasionar um

deslocamento da frequência de corte do filtro. Outro fator que pode influenciar na redução frequência de corte do filtro (em comparação com a frequência de corte projetada), na topologia Sallen-Key, é a utilização de amplificadores operacionais inadequadamente dimensionados para a aplicação, sobretudo no que diz respeito ao parâmetro Produto Ganho-Largura de Banda (GBWP, *Gain-Bandwidth Product*). Neste trabalho, os amplificadores operacionais MAX44243 especificados possuem GBWP=5MHz, excedendo em 195,3 vezes o valor mínimo deste parâmetro, que foi obtido através da ferramenta FilterPro Desktop v3.1.0. Desta maneira, é esperado que os amplificadores operacionais não influenciem na frequência de corte do filtro. Para fins de validação desta hipótese, o circuito eletrônico da Figura 10 foi simulado no *software* LTspice XVII, fazendo uso do modelo *spice* do amplificador operacional MAX44243 fornecido pela fabricante Maxim Integrated. O sinal de entrada do filtro simulado foi ajustado para um sinal AC de amplitude 1 V, com tensão de *offset* de 2,5V e frequência variável entre 10Hz e 1000Hz, com resolução de 1000 pontos por década. A Figura 12 mostra o resultado dessa simulação.

Figura 12: Resposta em frequência do filtro anti-aliasing obtida através de simulação *spice*.



Através da simulação *spice*, foi observado que a frequência de corte do filtro foi de 99,6 Hz, valor idêntico ao obtido via *software* Matlab 2012b. Tendo em vista que a simulação via Matlab 2012b não modela os efeitos ocasionados pelo amplificador operacional na resposta do filtro, ao passo que a simulação via LTspice XVII

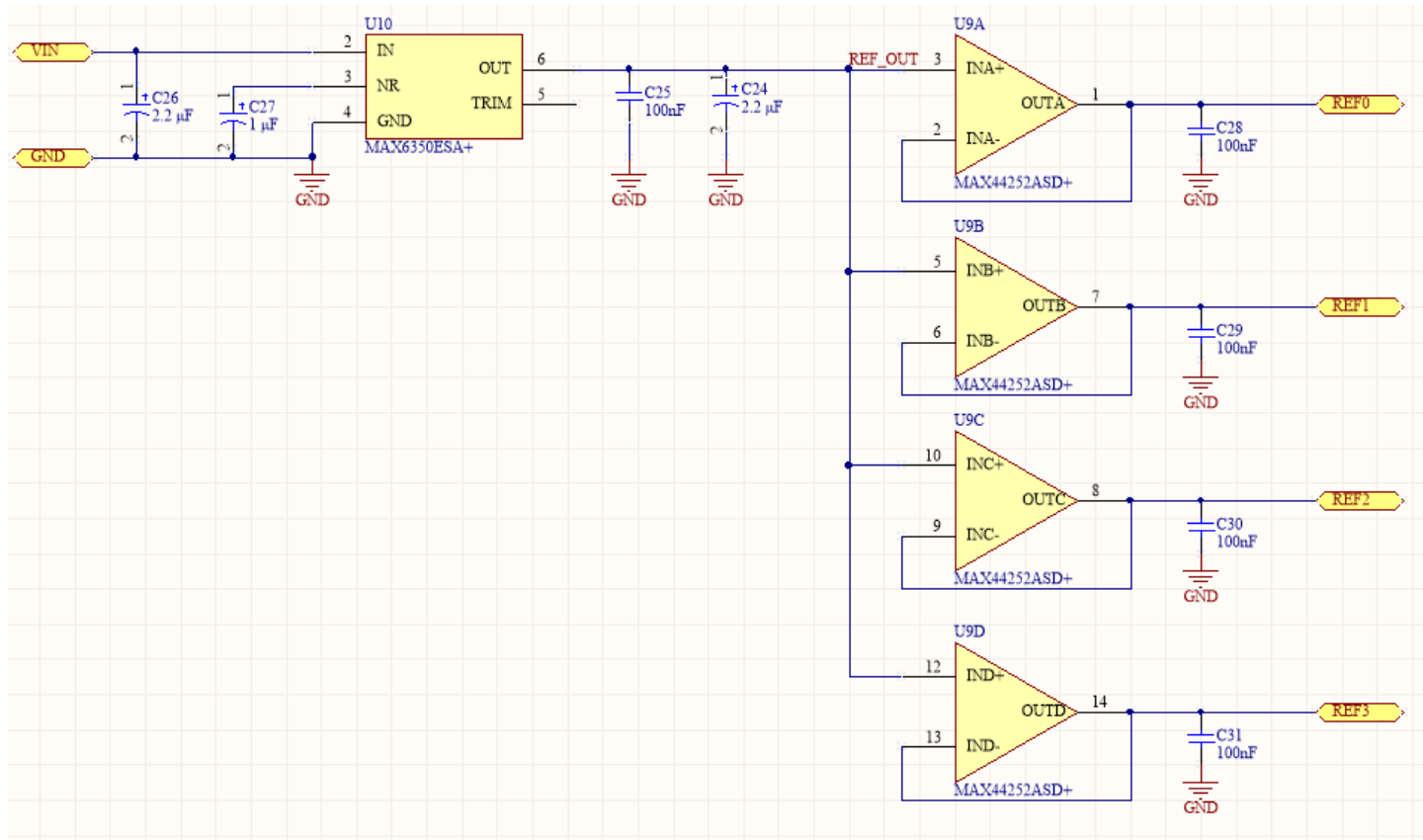
considera o modelo matemático do amplificador operacional, é possível verificar que o deslocamento da frequência de corte do filtro foi ocasionado devido aos valores dos componentes passivos empregados. Assim sendo, o amplificador operacional MAX44243 pode ser considerado adequado para desempenhar as funções requeridas pela topologia Sallen-Key, considerando um filtro passa-baixas de oitava ordem, ganho unitário e frequência de corte projetada de 100Hz.

Para obter experimentalmente a resposta em frequência do filtro projetado, um gerador de funções BK Precision 4084 foi utilizado para gerar uma forma de onda senoidal de amplitude $50,0 \pm 0,2$ mV, de frequência variando entre 0 Hz e $200,00 \pm 0,01$ Hz, com resolução de 10 Hz. A amplitude do sinal de entrada foi escolhida de modo a ser a máxima amplitude de entrada que não ocasiona saturação dos amplificadores utilizados. Além disso, a máxima frequência utilizada neste ensaio foi escolhida de modo a respeitar as limitações impostas pelo osciloscópio Agilent DSO1072B empregado nos ensaios, que, em conjunto com as sondas Agilent N2862B (com razão de atenuação 10:1), não consegue representar de maneira confiável sinais de amplitude menor que 20 mV, a menor divisão do instrumento, devido à incerteza de ± 8 mV desta escala.

3.1.2. Referência de tensão

Do diagrama de blocos da Figura 5, percebe-se a presença de um conversor digital-analógico, que permite o ajuste fino da tensão elétrica de *offset* na entrada do estágio de ganho final. Este conversor D/A requer uma referência de tensão para sua operação adequada. A referência de tensão escolhida foi o MAX6350, com saída de $5,000\text{V} \pm 0,001$ V e coeficiente de temperatura de $1,5 \pm 0,5$ ppm/°C. Dada a necessidade de compartilhamento da tensão de referência entre diversos componentes, a saída da referência de tensão foi conectada a seguidores de tensão, criados com amplificadores operacionais de precisão, com tensão de *offset* de 4 ± 2 μV e *drift* máximo de *offset* de 12 ± 7 nV/°C. O esquemático do circuito proposto pode ser visto na Figura 13.

Figura 13: Esquemático do circuito de distribuição da tensão de referência.



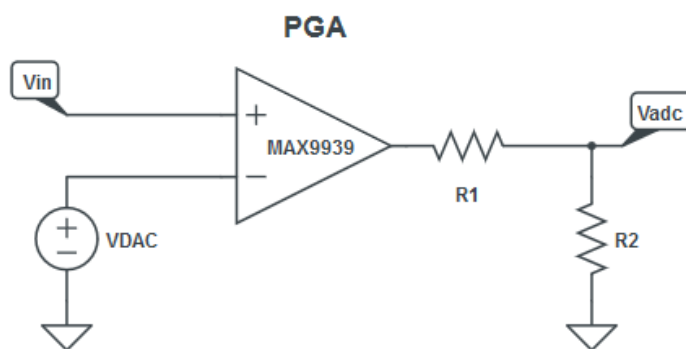
3.1.3. Estágio de condicionamento de sinais digitalmente programável

Após a etapa analógica de condicionamento, o sinal das pontes de extensômetros, já pré-amplificado e filtrado, é direcionado a um amplificador de ganho programável (*Programmable-Gain Amplifier* - PGA) MAX9939, responsável por otimizar a amplitude do sinal elétrico à faixa de entrada do conversor analógico-digital. Este PGA toma como entrada um sinal diferencial e gera um sinal *single-ended* de saída.

Para compensar o *offset* de tensão elétrica da ponte de extensômetros quando a estrutura do chassi não estiver carregada mecanicamente, um conversor digital-analógico (DAC) MAX5134 de 16 bits foi empregado. Este conversor gera uma tensão elétrica que serve de referência para a entrada diferencial do PGA, essencialmente igualando a tensão elétrica da entrada inversora do PGA àquela da entrada não-inversora, de modo que todo e qualquer sinal de interesse seja diferencial.

O sinal de saída do PGA passa, então, por um divisor resistivo fixo, de modo a adequar o *range* de saída do PGA (0 V a 5 V) ao *range* de entrada do conversor A/D (0 V a 2,2 V), conforme a Figura 14. O sinal de saída deste divisor resistivo é entregue a um conversor analógico-digital (A/D) MAX11040K de 24 bits, topologia sigma-delta, e aquisição simultânea (não multiplexados, com compensação eletrônica do instante de disparo da conversão A/D). Como são necessários 10 canais de condicionamento, foram utilizados três conversores D/A, três conversores A/D e doze amplificadores de ganho programável, gerando um total de 12 canais de condicionamento e aquisição de dados independentes.

Figura 14: Diagrama simplificado mostrando conexão do conversor D/A ao PGA.



Na Figura 14, VDAC é a tensão gerada pelo conversor D/A, Vin é conectado à saída do filtro *anti-aliasing*, e Vadc é conectado à entrada do conversor A/D. A tensão elétrica Vadc é dada pela Equação (15):

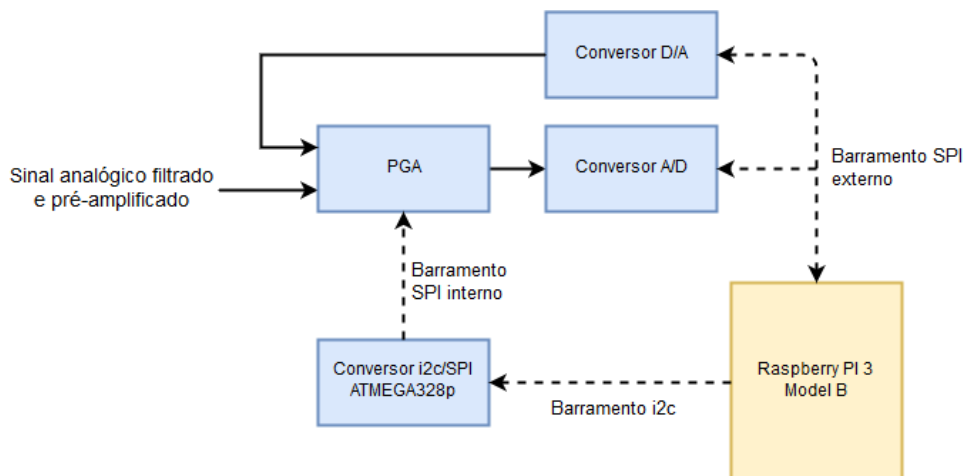
$$V_{adc} = (V_{in} - V_{DAC}) \cdot G \cdot \frac{R2}{R1 + R2} \quad (15)$$

Onde $R1 = 10,0 \pm 0,1 \text{ k}\Omega$, $R2 = 7,500 \pm 0,075 \text{ k}\Omega$, e G é um ganho programável digitalmente, podendo assumir um dos seguintes valores: 0,2 V/V, 1 V/V, 10 V/V, 20 V/V, 30 V/V, 40 V/V, 60 V/V, 80 V/V, 119 V/V, 157 V/V.

Para controlar a aquisição e o registro de dados, uma placa Raspberry Pi 3 Model B, executando o sistema operacional Raspbian Stretch Lite (baseado na distribuição Linux Debian), foi utilizada, uma vez que possui os barramentos SPI e i2c necessários para o controle do sistema de condicionamento, possui interfaces *wi-fi*, *Bluetooth* e *Ethernet*, permitindo a comunicação com outros computadores de maneira simples, e, por utilizar um sistema operacional Linux, permite o desenvolvimento rápido de

rotinas de controle na linguagem Python 2.7. A Figura 15 mostra o diagrama de blocos da conexão entre os componentes do circuito de condicionamento, o conversor i2c – SPI implementado com o microcontrolador ATMEGA328p e a placa Raspberry Pi 3 Model B. A linha tracejada representa sinais digitais e a linha sólida representa sinais analógicos.

Figura 15: Diagrama de blocos da conexão entre PGA, conversores D/A e A/D, Raspberry Pi 3 e conversor i2c/SPI: linhas tracejadas representam sinais digitais e linhas sólidas os sinais analógicos.



Conforme mostrado na Figura 15, os conversores A/D e D/A compartilham o mesmo barramento SPI, cada um deles operando como um único dispositivo de doze canais. Os PGAs, no entanto, não permitem a operação dos doze dispositivos como um único dispositivo de doze canais. Como os PGAs utilizam comunicação SPI, são necessários doze pinos *Slave Select* para gerenciar todos os amplificadores. Para contornar o problema, foi implementado um conversor i2c – SPI utilizando um microcontrolador ATMEGA328p, que opera como um dispositivo escravo no barramento i2c, recebendo do dispositivo mestre um pacote de dados com a estrutura mostrada na Tabela 2, com dois bytes de cabeçalho, um byte de endereço de destino, um byte de dado a ser enviado e dois bytes de sinalização de término do pacote. Este microcontrolador, então, interpreta o pacote de dados e encaminha o dado ao PGA de destino por meio de um barramento SPI exclusivo para este propósito. Esta implementação simplifica a conexão elétrica da placa Raspberry Pi 3 Model B ao circuito de condicionamento, uma vez que são necessários somente dois fios para a interface i2c, ao invés de quatorze para a implementação equivalente via SPI. A principal desvantagem deste método é a velocidade de comunicação, que se restringe a 400 kHz no modo *fast i2c*, devido ao barramento i2c. Todavia, este limite é

adequado, uma vez que o ganho dos PGAs será ajustado somente quando estritamente necessário. É importante ressaltar que o microcontrolador ATMEGA328p, responsável pela conversão i2c – SPI, atua de maneira completamente transparente ao sistema de condicionamento de sinais, servindo tão somente como intermediário entre os barramentos i2c e SPI.

Tabela 2: Estrutura do pacote de dados a ser enviado via interface i2c.

Header		Endereço	Dado	Footer	
0x23	0x54	0x01 – 0x0C	0x00 – 0xFF	0x0A	0x0D
2 Bytes		1 Byte	1 Byte	2 Bytes	

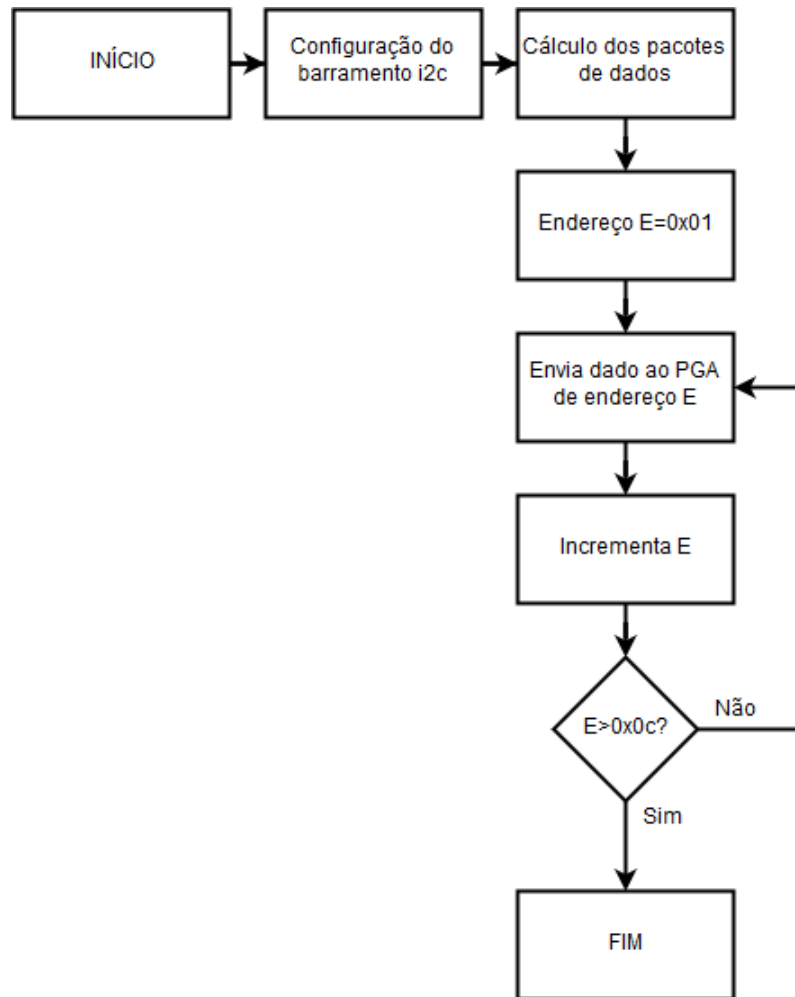
3.1.4. Rotinas desenvolvidas para controle e aquisição de dados

Para comandar a etapa de condicionamento digitalmente programável, rotinas foram escritas na linguagem Python 2.7. Estas rotinas são executadas no ambiente Linux da placa Raspberry Pi 3 Model B e desempenham as seguintes funções:

- autocompensação da tensão elétrica de *offset* das pontes extensiométricas;
- alteração do ganho dos amplificadores de ganho programável;
- aquisição de um número fixo de amostras, cálculo da média aritmética destas amostras e armazenamento em um arquivo;
- aquisição contínua de amostras através dos conversores A/D, salvando-as em um arquivo, até que o usuário sinalize o fim da seção de captura de dados.

Todos os códigos desenvolvidos encontram-se disponíveis no Anexo IV. Para o ajuste do ganho dos PGAs, uma rotina que calcula os pacotes de dados a serem enviados aos PGAs e os envia de maneira sequencial via interface i2c foi implementada. O Fluxograma desta rotina é apresentado na Figura 16:

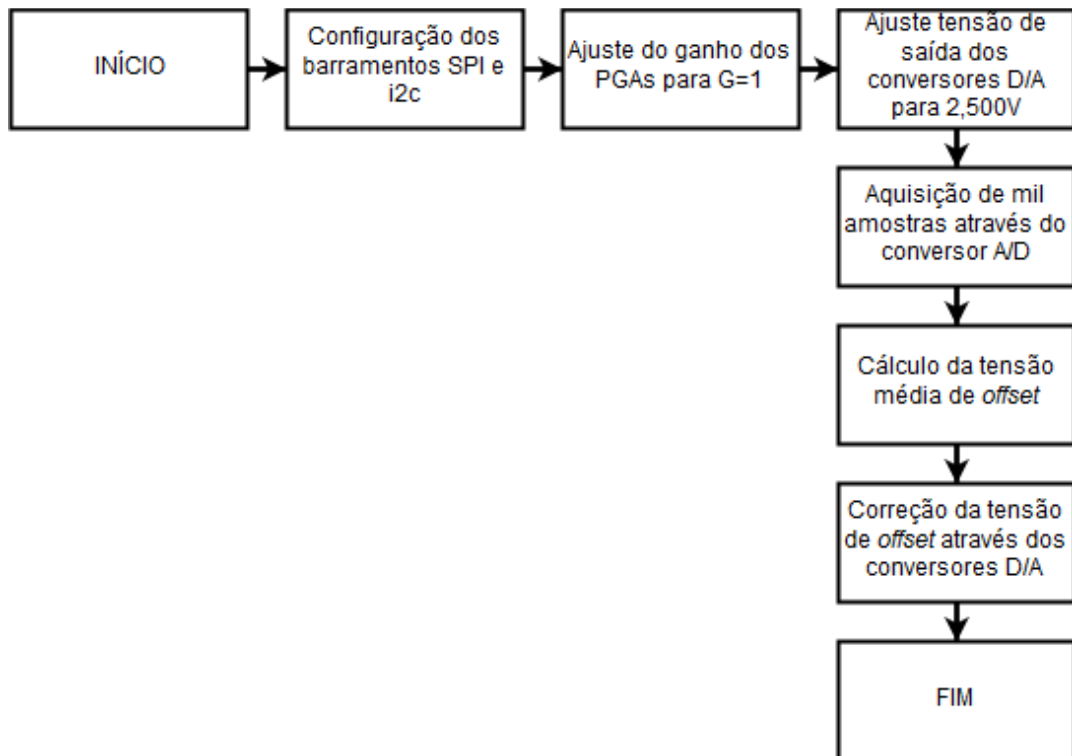
Figura 16: Fluxograma da rotina de configuração do ganho dos PGAs.



No caso da rotina de autocompensação da tensão de *offset*, são executados os seguintes passos, conforme visível também no Diagrama de Blocos da Figura 17:

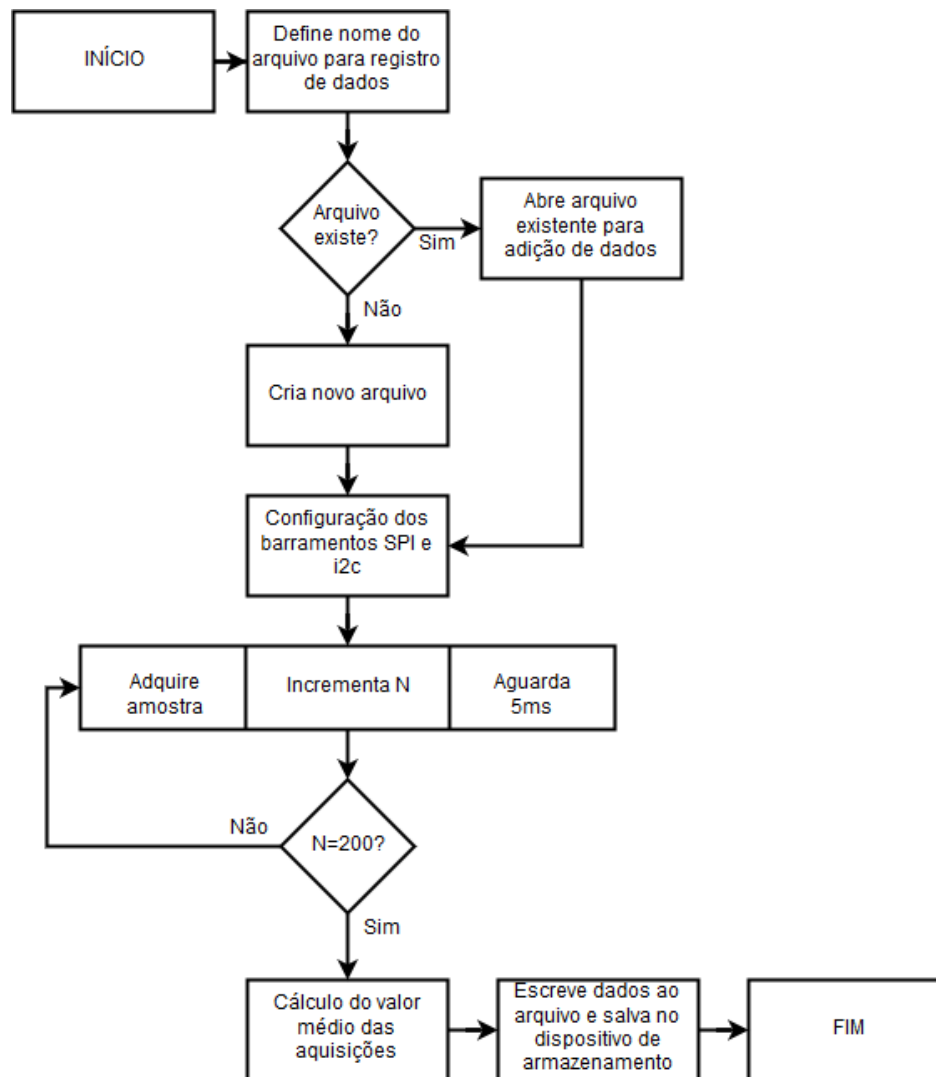
- 1) configura o ganho de todos os amplificadores de ganho programável para $G=1$, através da rotina descrita na Figura 16;
- 2) ajusta a saída de todos os conversores D/A para $2,500 \pm 0,001$ V;
- 3) o conversor A/D adquire mil amostras de todos os canais e o processador calcula a tensão elétrica média de *offset* de cada canal;
- 4) a tensão elétrica de cada saída dos conversores D/A é, por fim, atualizada com o valor da tensão elétrica média de *offset*, tornando-a nula.

Figura 17: Diagrama de blocos da rotina de autocompensação da tensão elétrica de offset das pontes extensiométricas.



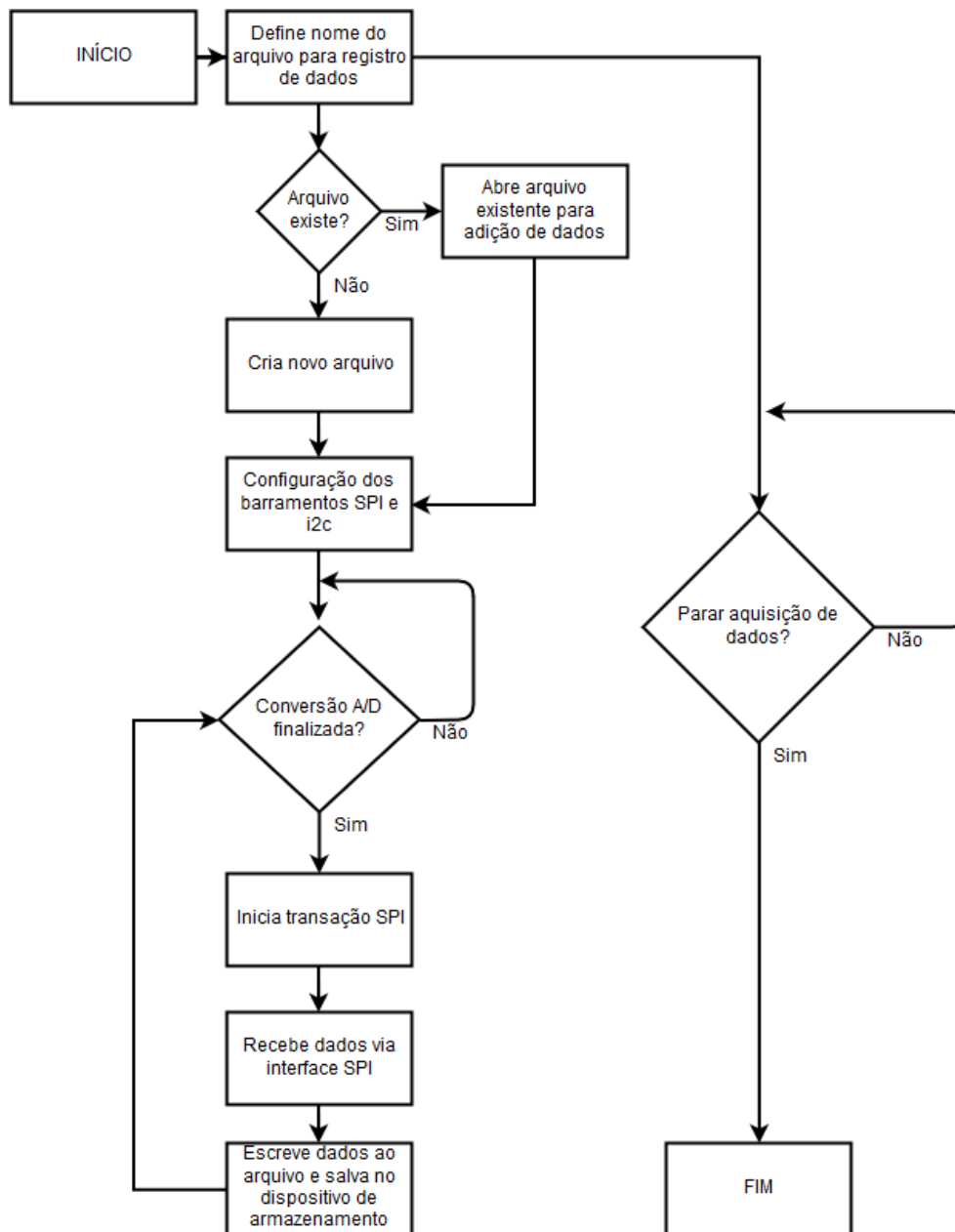
Para a realização dos ensaios estáticos com o circuito de condicionamento e aquisição de dados, fez-se necessária a implementação de uma rotina que deve executar a aquisição de uma quantidade fixa de amostras do conversor A/D a uma taxa bem definida, bem como, calcular a média aritmética destas amostras. Para isso, foi implementada a rotina descrita pelo Fluxograma da Figura 18.

Figura 18: Fluxograma da rotina para a aquisição de um número fixo N de amostras. Neste caso, $N=200$.



Por fim, uma rotina para a aquisição contínua de dados foi implementada, permitindo o uso do sistema de condicionamento e aquisição de dados como um simples *datalogger*. Neste caso, a rotina ajusta a taxa de aquisição dos conversores A/D para $1,000 \pm 0,001$ kHz e executa uma conversão A/D. Ao final desta conversão, um pulso elétrico é enviado ao controlador Raspberry Pi 3 Model B, que inicia uma transação via interface SPI, recebendo os valores da conversão A/D. Após o recebimento dos dados, os dados são armazenados em um arquivo e uma nova conversão é iniciada. Após isso, o processo se repete até que o usuário finalize a execução do programa manualmente. O Fluxograma desta rotina está disponível na Figura 19:

Figura 19: Fluxograma da rotina de aquisição contínua de dados.



3.1.5. Layout da Placa de Circuito Impresso

O *layout* da placa de circuito impresso foi realizado em software CAD, levando em consideração a utilização de placas de face dupla. Dada a complexidade do sistema de aquisição de dados para dez canais de aquisição, o circuito condicionador foi dividido em duas placas de circuito impresso distintas; uma contendo o circuito analógico e outra contendo o circuito digital. Isto facilitou o *layout* das placas, permitiu

que se separasse a alimentação analógica da alimentação digital, bem como os planos de terra analógico e digital, evitando que ruídos de alta frequência provenientes do chaveamento das linhas digitais de comunicação encontrem-se presentes no estágio analógico do condicionamento. A conexão entre as duas placas de condicionamento, bem como a conexão entre as células de carga e a placa analógica de condicionamento se dá por meio de cabos blindados. O esquemático completo para os circuitos de condicionamento analógico e digital podem ser vistos nos Anexos I e II, respectivamente; os *layouts* das placas de circuito impresso estão disponíveis no Anexo III.

3.2. Simulação computacional dos esforços mecânicos no chassi

Para a definição do local de cimentação dos extensômetros, simulações no *software* SolidWorks Trial 2017 foram executadas, sem conotação de análise aprofundada de tensões ou deformações. Nestas simulações, cargas mecânicas foram posicionadas centralmente na dianteira do chassi e em dois locais na traseira. A carga mecânica aplicada simulada variou entre 0 kgf e 60 kgf, com resolução de 10 kgf. Esta carga mecânica foi definida tendo em vista que a massa do piloto, segundo o regulamento da competição Shell Eco-Marathon, deve ser de pelo menos 50 kg. Para cada carregamento mecânico, valores de tensão mecânica foram registrados para os locais de interesse do chassi. Como o *software* trata a estrutura tubular do chassi como vigas, foi necessário configurar a ferramenta de simulação para tratar alguns dos elementos do chassi como corpos sólidos. Como tem-se interesse somente nos elementos da suspensão do veículo, para fins de otimização da simulação, somente estes foram tratadas como corpos sólidos, sendo os demais tratados como vigas.

Para a geração da malha de simulação, foram utilizados os seguintes parâmetros:

- 1) malha baseada em curvatura;
- 2) tamanho máximo de elemento igual a 17,66 mm;
- 3) tamanho mínimo de elemento igual a 3,53 mm;
- 4) oito elementos em um círculo;
- 5) razão de crescimento de elementos igual a 1,1.

As Figuras 20 e 21 mostram em detalhe a malha de simulação gerada para a dianteira e traseira do chassi, respectivamente.

Figura 20: Detalhe da malha de simulação da dianteira do chassi.

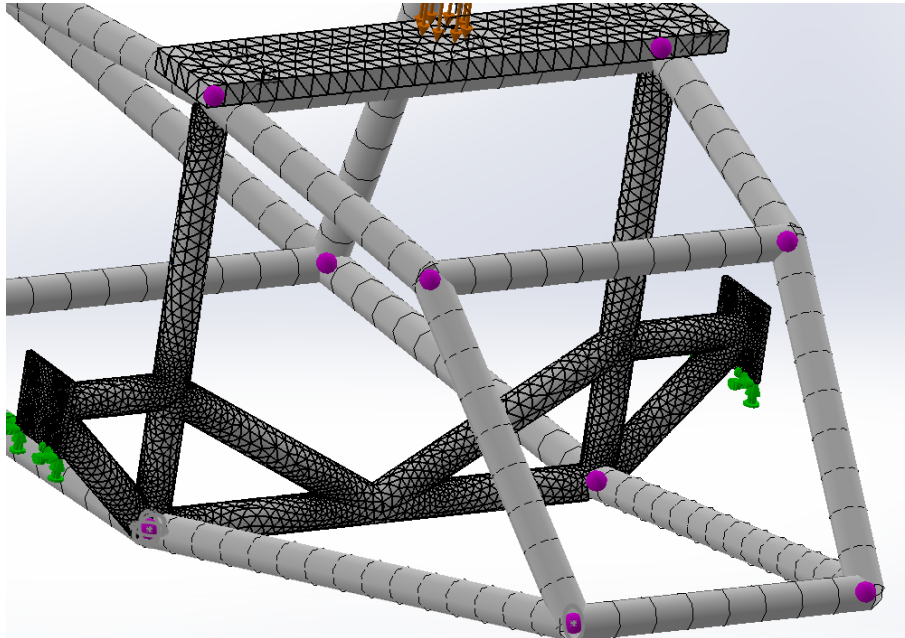
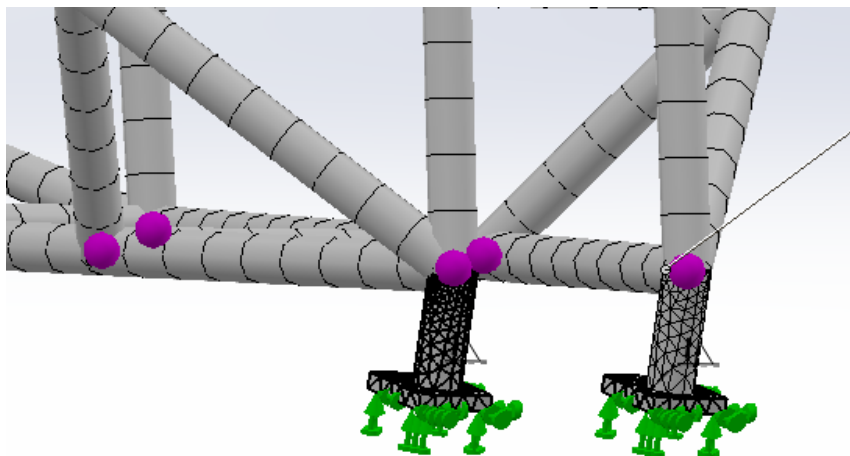


Figura 21: Detalhe da malha de simulação da traseira do chassi.



A partir das Figuras 20 e 21, é possível verificar que somente os elementos de interesse do chassi foram tratados como corpos sólidos, o que é representado graficamente por uma malha fina triangular, ao passo que os demais elementos foram tratados como vigas simples, representadas graficamente pela malha uniformemente espaçada que envolve a estrutura tubular dos demais elementos do chassi. Além disso, verifica-se que a resolução da malha de simulação é adequada aos propósitos deste trabalho, uma vez que a área de cada elemento da malha, nas regiões de

interesse, é cerca de duas a três vezes menor do que a área a ser ocupada por um extensômetro modelo bf350-3ab(23)n6, utilizado neste trabalho.

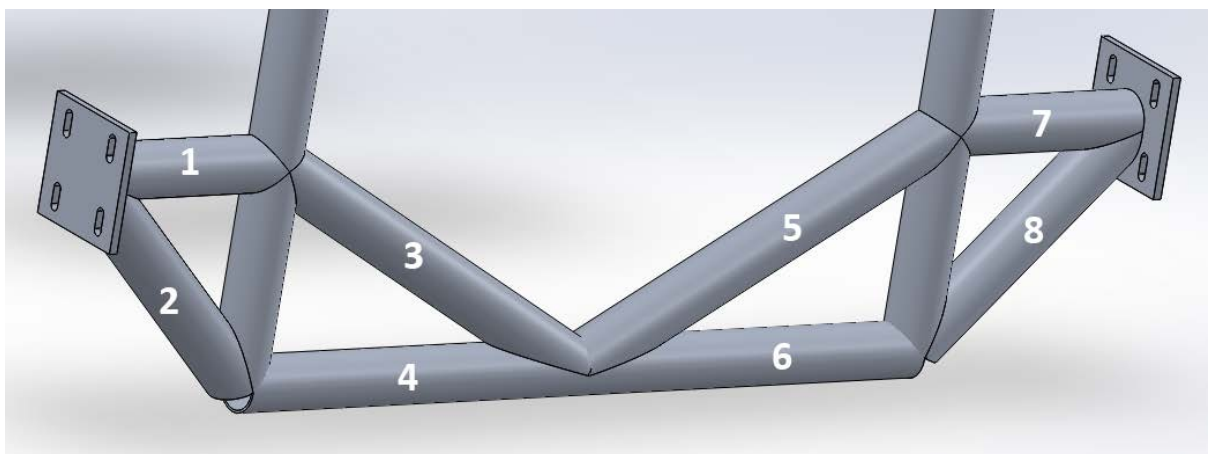
3.2.1. Definição dos locais de cimentação dos extensômetros

A definição dos locais de cimentação dos extensômetros foi feita com base nos seguintes critérios:

- 1) os extensômetros devem ser cimentados apenas em elementos que fazem parte da suspensão do veículo;
- 2) a operação normal do veículo não deverá ocasionar danos aos elementos sensores, devendo estes estarem protegidos de contatos acidentais com a pista de rodagem e eventuais contatos com o piloto;
- 3) obedecidos os critérios 1 e 2, os elementos sensores devem estar posicionados no ponto de máxima deformação do elemento estrutural sob análise.

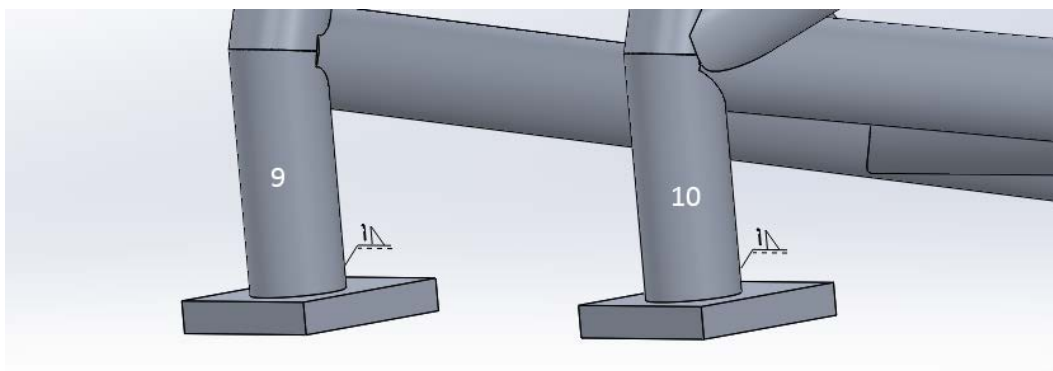
Com base nesses critérios, foi definido que os extensômetros devem ser posicionados, na suspensão dianteira, nos elementos estruturais enumerados da Figura 22.

Figura 22: Enumeração das células de carga sobre os elementos da suspensão dianteira, vista a partir da traseira do chassi.



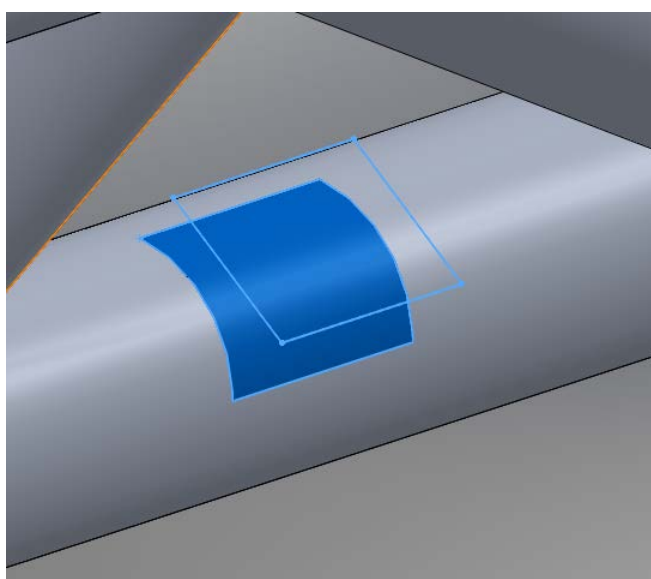
Na suspensão traseira, foi definido que extensômetros devem ser instalados nos tubos que suportam todo o carregamento mecânico traseiro do veículo, sendo estes os elementos enumerados visíveis na Figura 23.

Figura 23: Enumeração das células de carga sobre os elementos da suspensão traseira.



Nestas simulações, a ferramenta *split line* do software SolidWorks Trial 2017 foi utilizada para delimitar os locais de onde é desejado o monitoramento dos esforços mecânicos na estrutura do chassi. Estes locais foram definidos de maneira a refletir, no ambiente de simulação, o posicionamento das pontes de extensômetros cimentadas fisicamente no chassi. Apenas como exemplo do uso desta ferramenta, a Figura 24 mostra a área delimitada na célula de carga de número seis através do recurso *split line*.

Figura 24: Detalhe da utilização do recurso *split line* na célula de carga número seis.



3.3. Cimentação dos extensômetros na estrutura metálica

Após a definição dos locais da estrutura que devem receber os extensômetros, fez-se necessária a preparação da estrutura do chassi para recebê-los. De modo a tornar a superfície a ser instrumentada uniforme, livre de contaminações e garantir a correta aderência do adesivo utilizado, foram realizadas as etapas de lixamento e limpeza dos elementos estruturais enumerados nas Figuras 22 e 23.

Na etapa de lixamento, foram utilizadas lixas d'água marca Norton, modelo T223 de grãos 200, 280, 400 e 800, de maneira progressiva, até as superfícies a serem instrumentadas ficarem livres das imperfeições do processo de extrusão dos tubos do chassi. Após concluída a etapa de lixamento, os resíduos de pó de Alumínio e de Óxido de Silício da lixa foram removidos com o uso de papel toalha umedecido em Álcool Isopropílico, repetindo as passagens múltiplas vezes até o papel não apresentar resíduos visíveis após a limpeza da estrutura. A Figura 25 mostra uma fotografia do chassi empregado neste trabalho, ao passo que as Figuras 26, 27 e 28 mostram em detalhe a estrutura após a etapa de lixamento.

Figura 25: Fotografia do chassi utilizado neste trabalho.



Figura 26: Detalhe da suspensão dianteira esquerda após lixamento.



Figura 27: Detalhe da suspensão dianteira direita após lixamento.

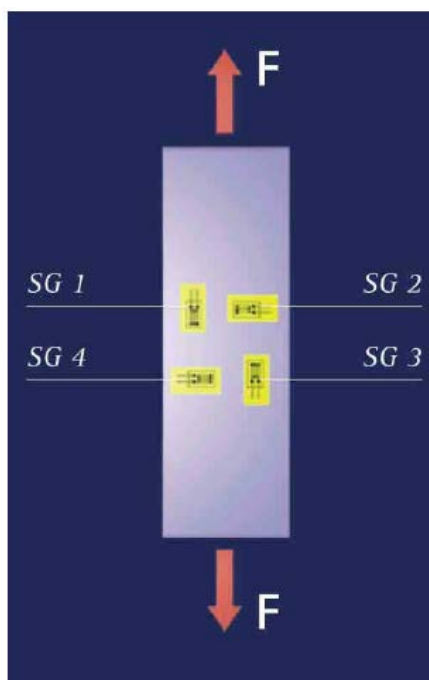


Figura 28: Detalhe da suspensão traseira após lixamento.



Considerando que a deformação principal dos elementos mecânicos a serem instrumentados é na direção axial, a implementação de uma ponte de extensômetros requer que dois deles estejam alinhados perpendicularmente à direção de deformação principal, uma vez que a deformação por Efeito Poisson se dá de maneira perpendicular e proporcionalmente inversa à deformação principal. Esta proporção é governada de maneira linear pelo Coeficiente de Poisson ν . Adicionalmente, como a deformação das células de carga ocasionada por efeitos térmicos, assumindo o equilíbrio térmico da estrutura mecânica, afeta todos os extensômetros de maneira semelhante, esta configuração de extensômetros é tolerante a variações térmicas do elemento instrumentado. A Figura 29 mostra o posicionamento dos extensômetros na estrutura tubular, levando em consideração que a direção principal de deformação é axial.

Figura 29: Posicionamento dos extensômetros na estrutura tubular sob deformação axial. Vista superior.



Fonte: *Short Guide to Strain Gauging Methods*. HBM Test and Measurement, 2005.

Como os extensômetros disponíveis possuem grade em um ângulo de 45° , tiveram de ser rotacionados em 45° , de modo a alinhar a grade paralelamente e perpendicularmente à direção do esforço. Isto foi feito utilizando uma folha de papel cartão com um ângulo de 45° cortado com o auxílio de lâmina e esquadro, envolvendo o tubo a ser demarcado. Com o ângulo demarcado, os extensômetros foram alinhados e fixados com adesivo 3M Scotch-Weld a base de Cianocrilato. Após a cura do adesivo, fita adesiva transparente foi utilizada para proteção dos extensômetros, evitando que fossem danificados ao se manipular os delicados fios soldados a eles. A Figura 30 mostra uma ponte de extensômetros cimentada sobre o elemento dois (ver Figura 22) da suspensão dianteira do veículo. A Figura 31 mostra o posicionamento das pontes na traseira do veículo.

Figura 30: Ponte de extensômetros colados à suspensão dianteira. No canto inferior direito, uma ilustração do extensômetro utilizado.

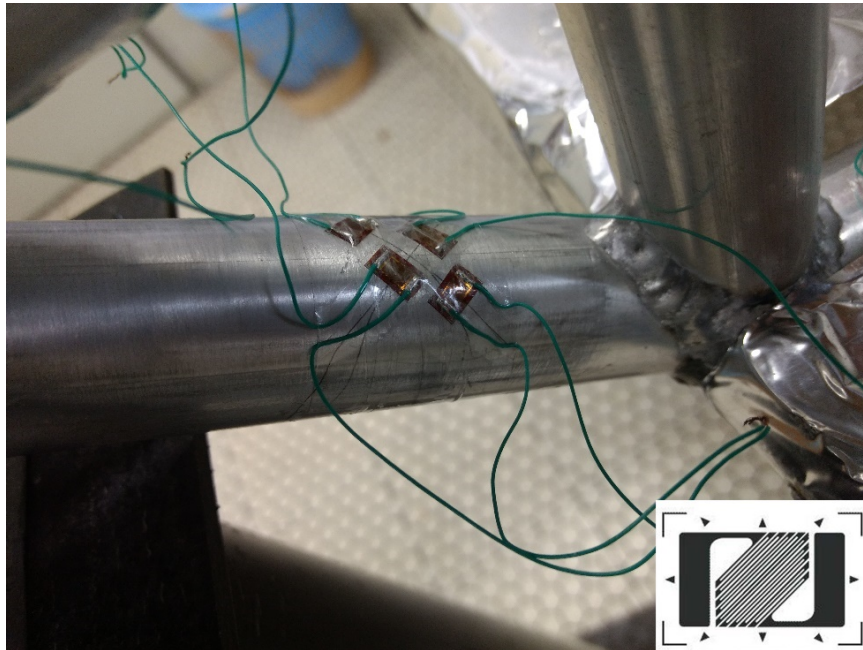
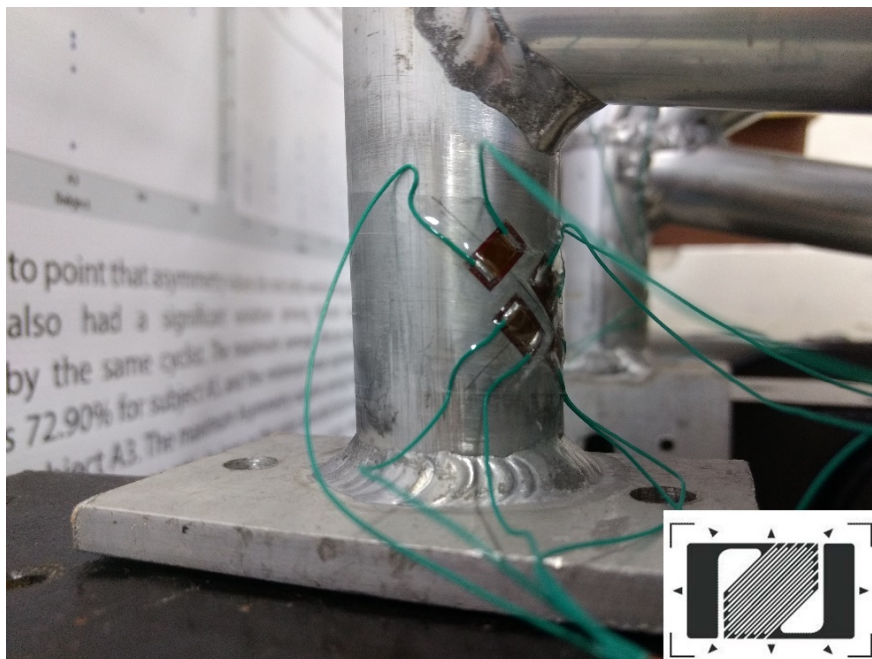


Figura 31: Ponte de extensômetros colados à suspensão traseira. No canto inferior direito, uma ilustração do extensômetro utilizado.



Como observado na Figura 30 e na Figura 31, os extensômetros foram cimentados somente sobre um lado do tubo, de modo que estas pontes extensiométricas estivessem melhor protegidas de eventuais contatos com o solo e ferramentas, durante a manutenção do veículo. Idealmente, dois dos extensômetros deveriam

estar posicionados no lado oposto do tubo, desta forma, as células de carga apresentariam melhores características de rejeição a esforços fletores e variações térmicas.

3.4. Ensaio das pontes de *strain gages*

Para verificar o correto funcionamento das pontes extensiométricas implementadas, três multímetros de bancada Tektronix modelo DMM-4050 foram utilizados. Nos ensaios, as pontes de extensômetros foram alimentadas através de um *buffer* seguidor de tensão, implementado com o amplificador operacional MAX44251, cuja tensão de *offset* de entrada é de $3,00 \pm 3,00 \mu\text{V}$, com *drift* térmico máximo da tensão de *offset* de entrada de $26 \text{ nV}/^\circ\text{C}$. A entrada deste *buffer* foi conectada a uma referência de tensão MAX6350 de $5,000 \pm 0,001\text{V}$, de coeficiente de temperatura da tensão de saída máximo de $1 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. Este *buffer* atua como reforçador de corrente, de modo a não exceder o limite máximo de corrente de saída da referência de tensão elétrica MAX6350.

Neste ensaio, o carregamento mecânico da estrutura foi variado entre 0 kgf e 60 kgf, com resolução de 10 kgf, com o auxílio de pesos-padrão. Esta resolução foi escolhida pois é adequada perante os carregamentos mecânicos aos quais o chassi estará submetido durante a operação normal do veículo. Os valores de tensão elétrica de saída das pontes extensiométricas foram registrados em uma planilha, para posterior análise. Para o carregamento dianteiro da estrutura, pesos-padrão foram engastados de maneira a distribuir a carga centralmente. Para o carregamento traseiro, cada célula de carga traseira foi ensaiada individualmente, conforme permitido pelo projeto mecânico do chassi. Para cada valor de carga, quatro repetições foram realizadas: duas delas com carregamento ascendente e duas com carregamento descendente.

Para obter os dados referentes à deformação mecânica dos elementos instrumentados da estrutura do chassi, foi utilizado o módulo NI-9237, de fabricação da National Instruments, conectado ao chassi cDAQ-9174, também da National Instruments. Este módulo permite a conexão direta às células de carga, contendo todo o circuito de condicionamento e aquisição de dados necessário para a aquisição

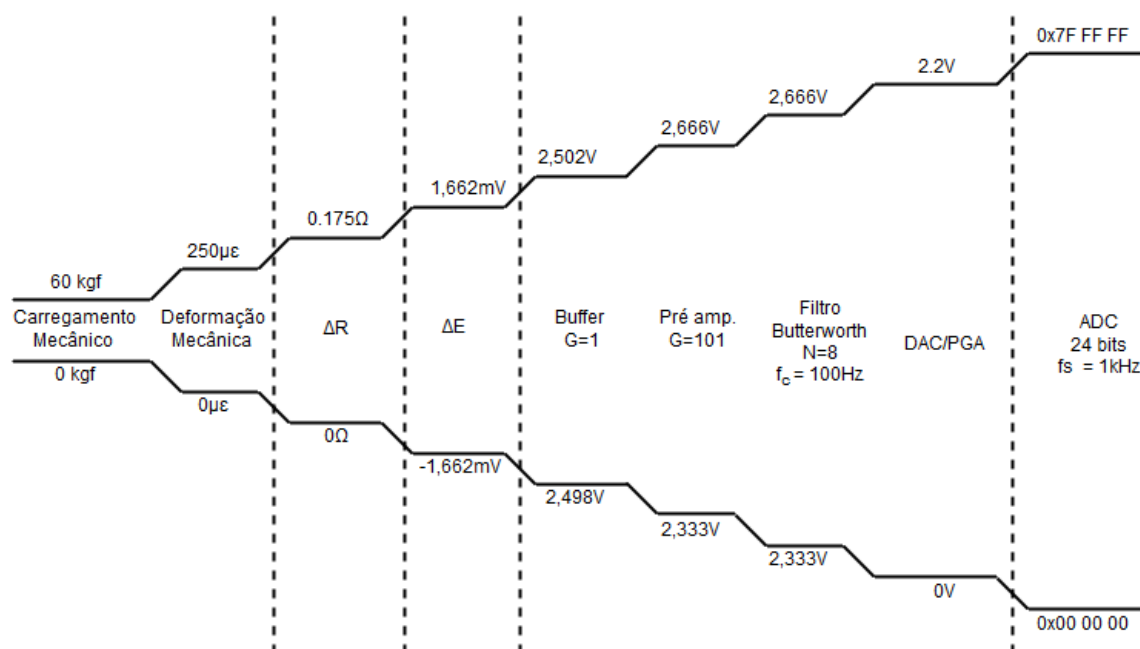
de dados de pontes extensiométricas. Como no ensaio anterior, o carregamento mecânico foi variado de 0 kgf a 60 kgf com resolução de 10 kgf, com o uso dos mesmos pesos-padrão.

Finalmente, o circuito eletrônico de condicionamento e aquisição de dados foi conectado às pontes extensiométricas. Inicialmente, com o chassi sem cargas mecânicas aplicadas senão a ação da gravidade, a rotina de autocompensação da tensão elétrica de *offset* das pontes extensiométricas (ver Diagrama de Blocos da Figura 17), foi executada. Após a execução bem-sucedida desta rotina, o ganho dos amplificadores de ganho programável foi ajustado para $G=10$, através da rotina que segue o Fluxograma da Figura 16. Este valor de ganho foi escolhido após diversos ensaios experimentais preliminares, pois permite que o chassi seja carregado sem o risco de saturação das entradas dos conversores A/D. Com as tensões elétricas de *offset* das pontes extensiométricas devidamente compensadas e com os ganhos de tensão programados corretamente, o carregamento mecânico foi variado tal como nos ensaios anteriores. Para cada valor de carga mecânica, duas repetições foram efetuadas. Cada valor obtido neste ensaio é a média de duzentas aquisições consecutivas dos conversores A/D, através da rotina descrita pelo Fluxograma da Figura 18.

3.5. Cadeia de Medidas Proposta

Dadas as proposições e equacionamentos contidos nos subcapítulos anteriores, uma cadeia de medidas proposta foi elaborada (ver Figura 32).

Figura 32: Cadeia de medidas proposta.



Para fins de avaliação da resolução e incerteza do sistema de medição proposto, a cadeia de medidas foi dividida em cinco etapas. A primeira etapa diz respeito ao carregamento e deformação mecânicos das células de carga. A segunda e terceira etapas estão relacionadas a variação de resistência elétrica dos extensômetros quando sujeitos à deformação mecânica e a variação de tensão elétrica da ponte de extensômetros, respectivamente. A quarta etapa engloba todo o sistema de condicionamento de sinais, e a quinta etapa envolve somente a conversão A/D.

Para cada uma destas etapas, foi proposto a resolução de entrada, resolução de saída, sensibilidade e o erro de linearidade. Estes dados encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3: Resolução de entrada, resolução de saída, sensibilidade e erro de linearidade propostos.

	Etapa				
	1	2	3	4	5
Resolução de Entrada	2±0,1kgf	8,3±0,7μm/m	5,8±0,06mΩ	0,06±0,01mV	40±0,032mV
Resolução de Saída	8,3±0,7μm/m	5,8±0,06mΩ	0,06±0,01mV	40±0,32mV	23 bits
Sensibilidade Proposta	4,2±0,6 $\frac{\mu m/m}{kgf}$	0,7±0,06 $\frac{m\Omega}{\mu m/m}$	9,5±1,7mV/Ω	662±6,8V/V	0,3μV
Erro de Linearidade Proposto	0,6±0,1%	1±0,1%	2±0,6%	4,3±2,5%	0.004%

Para a primeira etapa da Tabela 3, a resolução de entrada foi definida considerando que se trata de um veículo tripulado, portanto, não é relevante a análise de esforços muito pequenos na estrutura do chassi, tendo em vista que este estará sujeito a impactos durante a operação do veículo. A resolução de saída foi definida com base numa deformação mecânica fundo de escala estimada de 250 μm . O erro de linearidade foi definido considerando que o material se deformará apenas em sua região elástica, conforme características definidas em (*Properties of Wrought Aluminum* p.104, *National Institute of Standards and Technology*, Alumínio 6063-T5). Para a segunda etapa da cadeia de medidas, foi considerada uma resolução de entrada de $8,3 \pm 0,7 \mu\text{m/m}$ e resolução de saída de $5,8 \pm 0,06 \text{ m}\Omega$, conforme indicações presentes no *datasheet* do extensômetro bf350-3ab(23)n6. Na terceira etapa, foi considerada uma ponte de Wheatstone com quatro extensômetros, conectados tal como mostra a Figura 7. Os valores da tabela foram estimados com base no *datasheet* dos extensômetros bf350-3ab(23)n6. Na quarta etapa, o circuito eletrônico de condicionamento foi considerado como um todo, considerando os componentes passivos do circuito eletrônico como os maiores responsáveis pelos erros de linearidade, uma vez que os erros de linearidade especificados para os componentes ativos (todos de fabricação da Maxim Integrated) são todos menores que 0,01%. Para a quinta etapa, foram utilizadas as especificações do conversor analógico-digital MAX11040k, disponibilizadas pela fabricante Maxim Integrated no *datasheet* do produto. Assim sendo, uma vez que as incertezas não foram obtidas através de uma série de observações, foi considerado que as todas as incertezas são do tipo B, portanto, a incerteza propagada das etapas foi calculada como especificado em (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, p.18, 2008). Assim sendo, foi obtido que a incerteza propagada, ao final da segunda etapa, é de $\pm 6 \text{ m}\Omega$ (3,1%). Similarmente, a incerteza propagada ao final da terceira e quarta etapa, foram, respectivamente, $\pm 54 \mu\text{V}$ (3,3%) e $\pm 0,21 \text{ V}$ (9,6%). Para o conversor A/D, como a resolução deste conversor é de 0,3 μV , com incerteza de dois bits menos significativos, considera-se que a resolução da conversão A/D é muito superior à resolução dos demais sinais envolvidos, de modo que as incertezas da conversão A/D não devem influenciar na incerteza geral do sistema. Assim sendo, é considerado que a incerteza propagada final do sistema de medições proposto é de 9,6%.

4. Resultados e Discussões

4.1. Validação do sistema de condicionamento desenvolvido

Em todos os ensaios, as células de carga foram enumeradas tal como na Figuras 22 e 23, observando-as a partir da traseira do veículo.

Para avaliar experimentalmente o ganho de cada canal de condicionamento analógico, um osciloscópio Agilent DSO1072B foi utilizado. Através da amplitude dos sinais de entrada e saída da etapa analógica do condicionamento, foi possível calcular os ganhos do primeiro estágio de amplificação do condicionador de sinais. Os dados coletados foram dispostos na Tabela 4.

Tabela 4: Ganho por canal do estágio analógico de condicionamento.

Canal	Amplitude de entrada (mV)	Amplitude de Saída (V)	Ganho (V/V)
1	31,2 ± 0,2	3,16 ± 0,03	101,3 ± 1,16
2	31,2 ± 0,2	3,20 ± 0,03	102,6 ± 1,17
3	31,2 ± 0,2	3,19 ± 0,03	102,2 ± 1,16
4	31,2 ± 0,2	3,15 ± 0,03	101,0 ± 1,16
5	31,2 ± 0,2	3,21 ± 0,03	102,9 ± 1,17
6	31,2 ± 0,2	3,12 ± 0,03	100,0 ± 1,16
7	31,2 ± 0,2	3,18 ± 0,03	101,9 ± 1,16
8	31,2 ± 0,2	3,16 ± 0,03	101,3 ± 1,16
9	31,2 ± 0,2	3,11 ± 0,03	99,68 ± 1,15
10	31,2 ± 0,2	3,16 ± 0,03	101,3 ± 1,16
11	31,2 ± 0,2	3,11 ± 0,03	99,68 ± 1,15
12	31,2 ± 0,2	3,19 ± 0,03	102,2 ± 1,16
Média	31,2 ± 0,2	3,16 ± 0,03	101,3 ± 1,16
Desvio Padrão		0,0329 ± 0,03	1,054 ± 0,00377

Considerando o circuito amplificador da Figura 8, resistores Vishay SMD 0805 de 1% de tolerância, e sabendo que o ganho G do amplificador não-inversor é dado por (16):

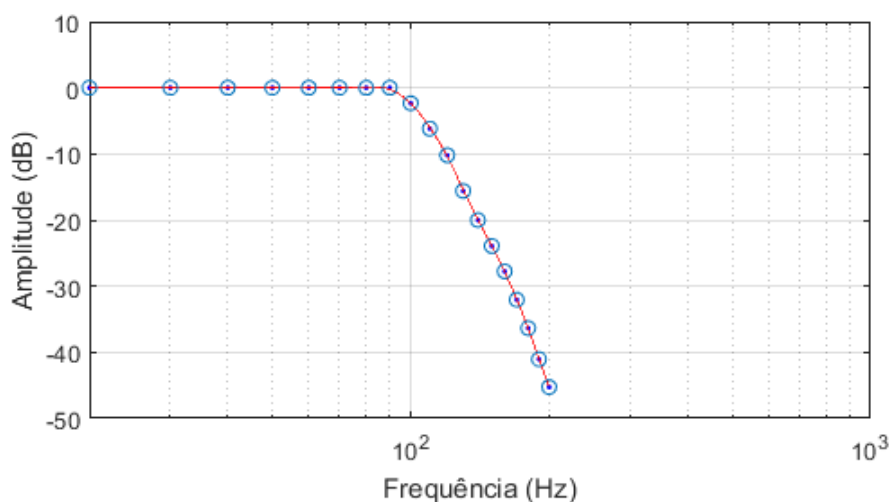
$$G = 1 + R2/R1 \quad (16)$$

é possível verificar que o ganho deve ser estar no intervalo $G = [98,98, 103,0]$ V/V. Através dos dados experimentais, foi verificado que o menor ganho ocorreu nos

canais 9 e 11, com $G=99,7$ V/V. O maior ganho registrado ocorreu no canal 5, com $G=102,9$ V/V. Assim sendo, todos os canais apresentaram ganho dentro do intervalo definido por G , de maneira que o pré-amplificador de sinais desenvolvido apresentou características elétricas compatíveis com os requisitos de projeto.

Ainda fazendo o uso do osciloscópio Agilent DSO1072B e gerador de funções BK Precision 4084, foi possível obter experimentalmente a resposta em frequência do filtro *anti-aliasing* proposto na Figura 10, conforme mostra a Figura 33.

Figura 33: Resposta em frequência experimental do filtro *anti-aliasing*.



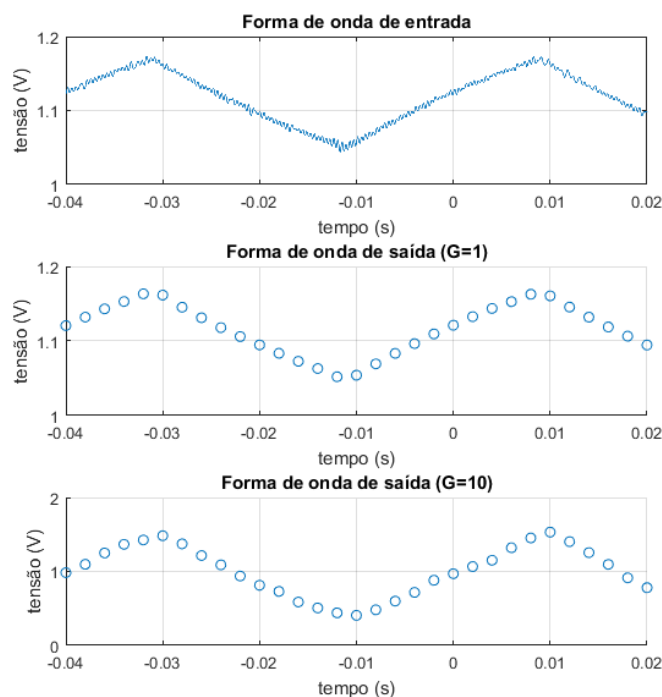
Experimentalmente, foi observado que a atenuação para sinais de frequência $f = 2f_c$ é de -45,3 dB. Dado que se trata de um filtro de oitava ordem, era esperado que a atenuação, neste caso, fosse de -48 dB. Isto possivelmente pode ser atribuído à capacidade limitada de representação de sinais muito pequenos (menores que 20 mV) do osciloscópio Agilent DSO1072B, sobretudo ao utilizar as ponteiros de prova com razão de atenuação 10:1, dado que a incerteza da medição, considerando a escala de 20 mV por divisão, é de 8 mV (5% sobre oito divisões de 20 mV), o que influencia diretamente na qualidade das medições de amplitude do sinal de saída do filtro. Outro fator que pode ter contribuído para a observação de uma atenuação inferior à de projeto é a incerteza relacionada aos componentes passivos utilizados no circuito eletrônico do filtro, sobretudo dos capacitores, uma vez que não foi possível garantir a procedência destes componentes.

Mesmo com a atenuação determinada experimentalmente sendo menor àquela esperada de um filtro de oitava ordem, o filtro *anti-aliasing* atendeu a todos os

requisitos de projeto. Além disso, a frequência de corte verificada experimentalmente foi de $99,78 \pm 0,20$ Hz, 0,22% abaixo da frequência de corte de projeto e 0,18% acima da frequência de corte obtida via simulação *spice* no *software* LTspice XVII.

Para a validação do estágio de condicionamento digitalmente programável, o gerador de funções BK Precision 4084 novamente foi empregado, desta vez configurado para gerar uma forma de onda triangular com tempo de subida igual ao tempo de descida, frequência de $25,00 \pm 0,01$ Hz e amplitude de $120,00 \pm 0,4$ mV. A Figura 34 mostra a forma de onda de saída do gerador de funções e os sinais adquiridos pelo sistema de aquisição de dados do condicionador de sinais, com o ganho do PGA ajustado para $G=1$ V/V e $G=10$ V/V e taxa de aquisição da conversão A/D de 600 Hz. Antes do início da captura de dados, a rotina de autocompensação da tensão elétrica de *offset* das pontes extensiométricas foi executada, de modo a se obter leituras que oscilam em torno do ponto de meia-escala do conversor A/D.

Figura 34: Forma de onda na entrada da etapa de condicionamento digitalmente controlada e sinais adquiridos pelo sistema de aquisição de dados implementado.



Na Figura 34, tem-se que o *span* dos sinais de entrada, de saída com $G=1$ e saída com $G=10$ são, respectivamente, 120,3 mV, 119,2 mV e 1,194 V, de modo que o erro de ganho, em relação ao sinal original de entrada, é de 0,9% para $G=1$ e 0,8% para $G=10$. Comparando o *span* de saída para $G=1$ e $G=10$ entre si, observa-se uma

diferença de 0,2%. Isto sugere que a maior fonte de erro não é proveniente dos amplificadores de ganho programável, mas sim do divisor resistivo entre os PGAs e os conversores A/D, o que é razoável, uma vez que a incerteza da razão de divisão de tensão deste divisor resistivo é de 1,2%.

De posse dos dados coletados para o circuito de condicionamento, é possível afirmar que a implementação deste condicionador de sinais logrou êxito, atingindo os requisitos de projeto estipulados no Capítulo 3.1.

4.2. Resultados das simulações computacionais

Com uso do *software* SolidWorks Trial 2017, carregamentos mecânicos virtuais foram criados e simulações estáticas foram executadas, de modo a se obter uma ideia da faixa de deformação mecânica dos elementos mecânicos da suspensão do chassi para determinados carregamentos mecânicos. Para o carregamento dianteiro com carga centralmente distribuída, os dados da simulação encontram-se nas Figuras 35, 36, 37 e 38.

Figura 35: Relação entre deformação mecânica simulada e carregamento mecânico: células 1 e 7.

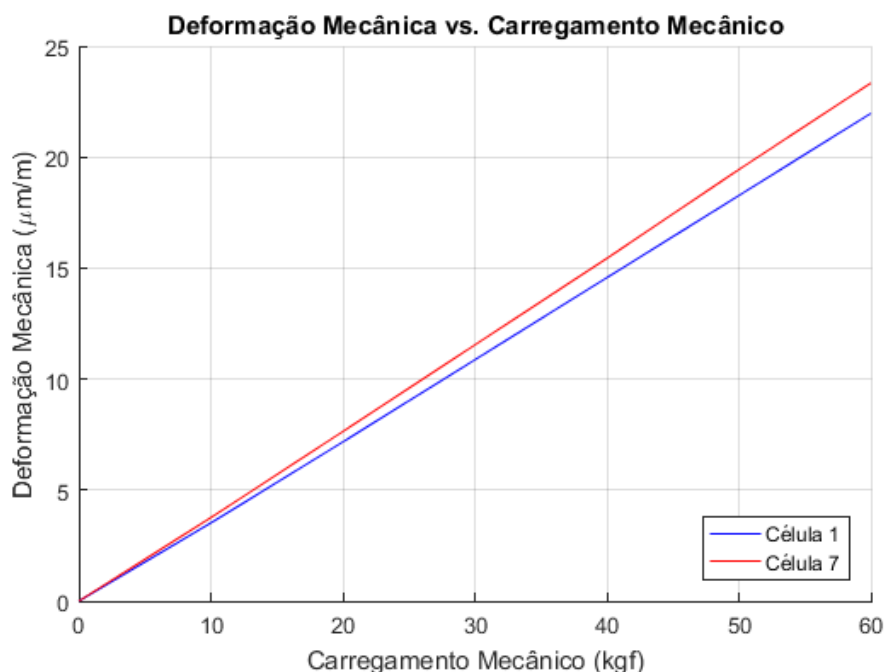


Figura 36: Relação entre deformação mecânica simulada e carregamento mecânico: células 2 e 8.

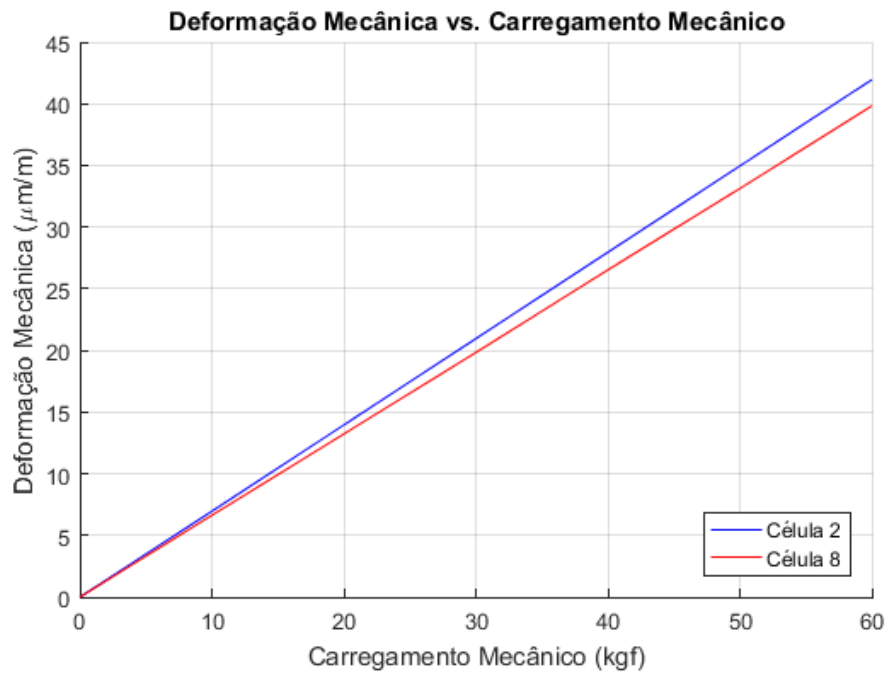


Figura 37: Relação entre deformação mecânica simulada e carregamento mecânico: células 3 e 5.

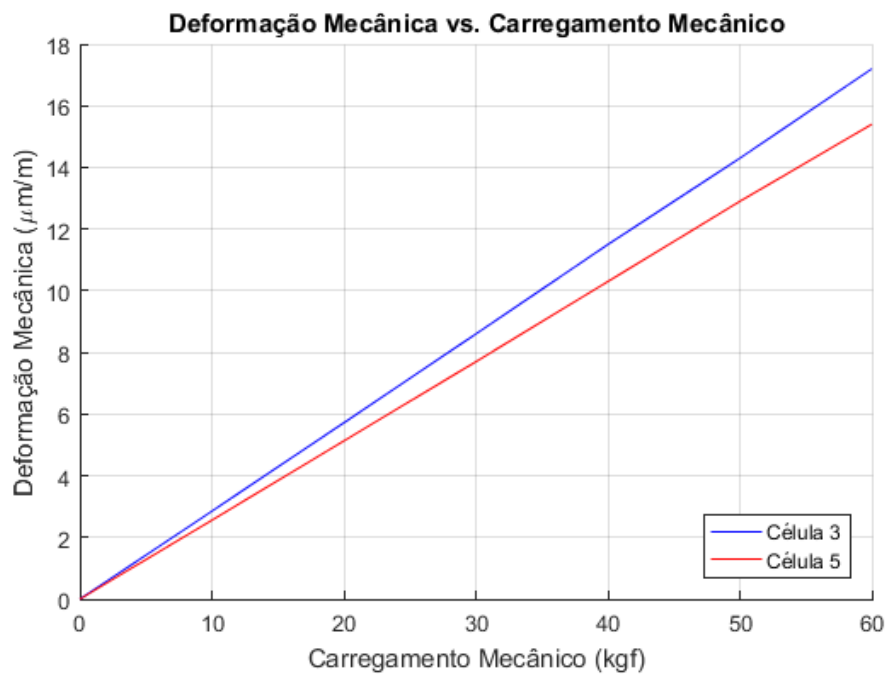
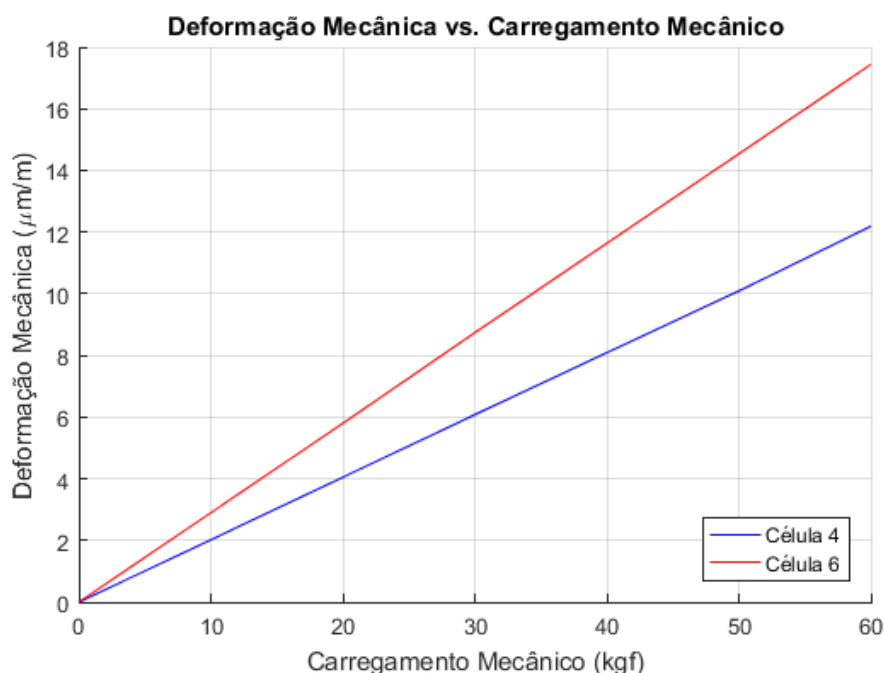


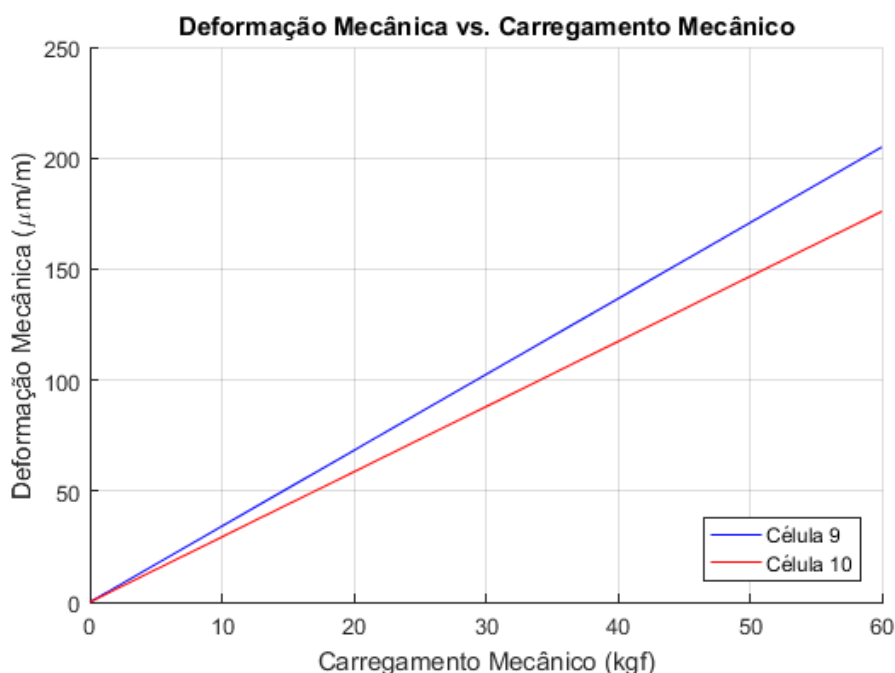
Figura 38: Relação entre deformação mecânica simulada e carregamento mecânico: células 4 e 6.



Destas simulações, foi possível observar que, na situação de simulação do carregamento central da estrutura, a deformação registrada para as células simétricas entre si não foi exatamente igual. Sabendo que a deformação das células de carga não é perfeitamente uniforme quando submetidas a um carregamento mecânico, uma possível justificativa para a diferença na resposta de um dado par de células simétricas é que as simulações levaram em consideração o posicionamento real das pontes extensiométricas sobre os elementos mecânicos do chassi, de modo que possam existir diferenças locais de deformação entre os pontos instrumentados. Isto é especialmente visível no caso das células quatro e seis, que são as células de mais difícil acesso físico no chassi, e foram também as células com a maior variação entre a região de maior deformação e a região de fato instrumentada.

As simulações foram repetidas para as células de carga nove e dez, localizadas na traseira do chassi. Nesta situação, estas células de carga foram simuladas individualmente, de maneira que cada uma delas suportou a totalidade do carregamento mecânico. A Figura 39 mostra o resultado destas simulações.

Figura 39: Relação entre deformação mecânica simulada e carregamento mecânico: células 9 e 10.



4.3. Determinação das Funções de Transferência experimentais em Tensão Elétrica

Os ensaios para determinação das funções de transferência experimentais em tensão elétrica tiveram por objetivo verificar o correto funcionamento das pontes extensiométricas, bem como, levantar as funções de transferência de carga mecânica aplicada *versus* tensão de saída das pontes de extensômetros. Para a leitura da tensão elétrica de saída das pontes extensiométricas, multímetros de bancada Tektronix DMM-4050 foram utilizados.

Como o sistema de medição proposto não pode medir a deformação absoluta do material, foi considerado que a tensão elétrica de saída das células de carga, quando o chassi se encontrava sem carregamentos mecânicos externos aplicados a ele, se dava somente devido às não idealidades dos extensômetros utilizados, bem como variações introduzidas durante o processo de cimentação deles e incertezas de componentes. Para a situação de carregamento central da suspensão dianteira do chassi, os dados coletados, compensados para a tensão elétrica de *offset* das pontes extensiométricas, foram dispostos nas Figuras 40, 41, 42 e 43, agrupados de acordo

com a simetria das células de carga no chassi. A Tabela 5 mostra o erro de linearidade para cada célula de carga, bem como a Função de Transferência de cada uma delas e suas respectivas sensibilidades. A sensibilidade dada em mV/V foi calculada considerando que a tensão de alimentação das células de carga é de $5,000 \pm 0,001$ V. As células de carga foram agrupadas por simetria.

Figura 40: Função de transferência experimental das pontes extensiométricas: células 1 e 7.

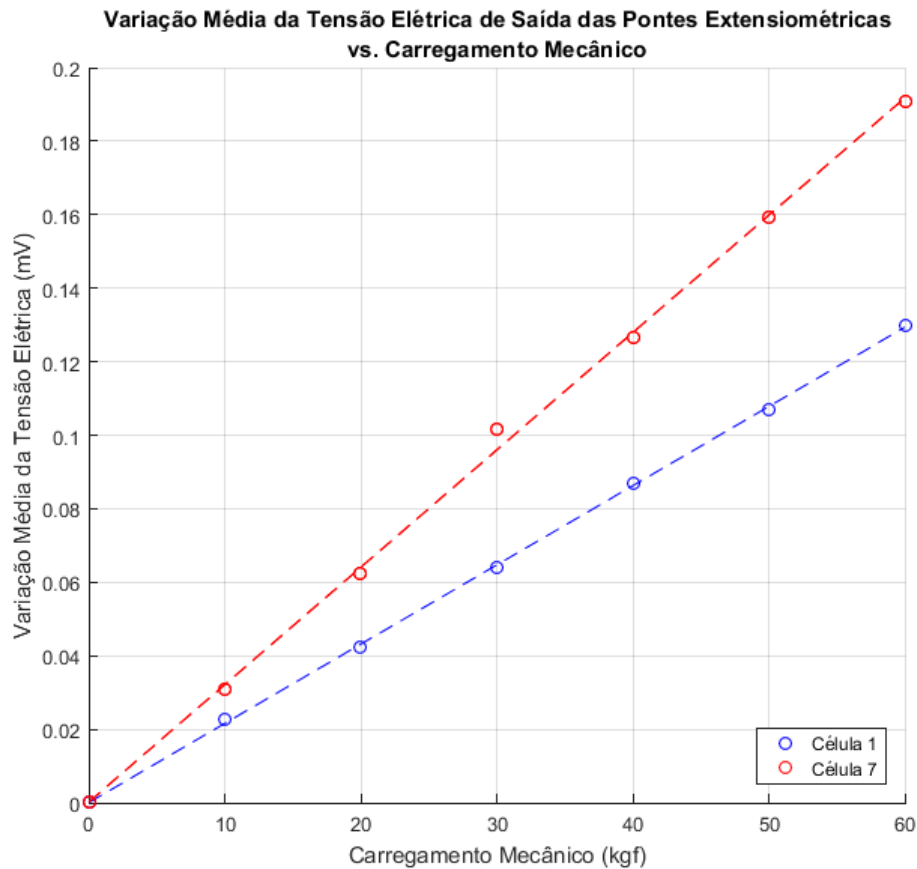


Figura 41: Função de transferência experimental das pontes extensiométricas: células 2 e 8.

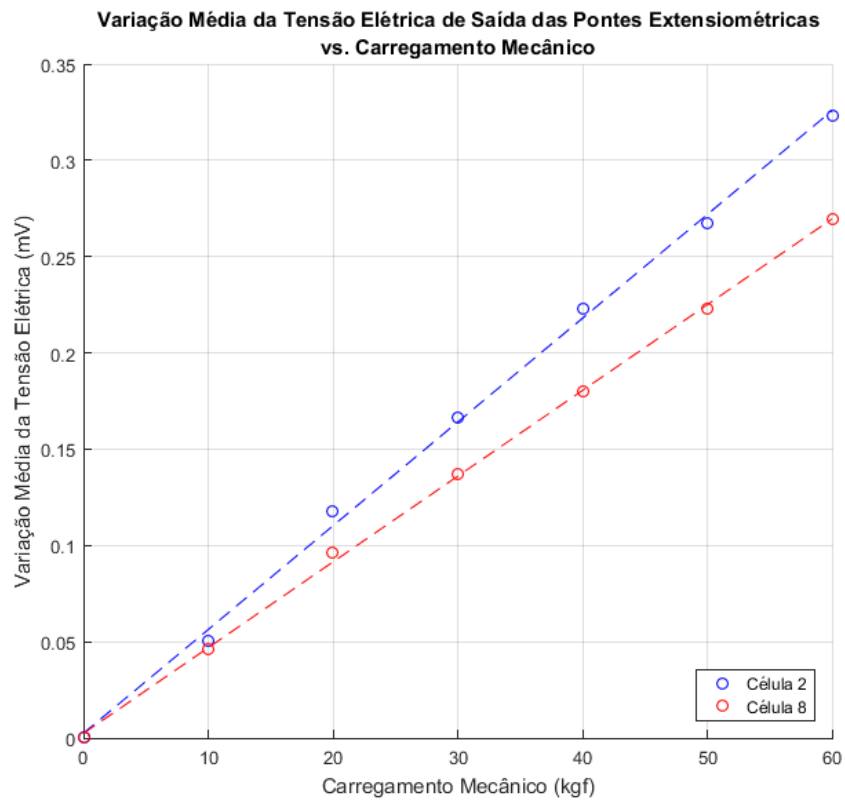


Figura 42: Função de transferência experimental das pontes extensiométricas: células 3 e 5.

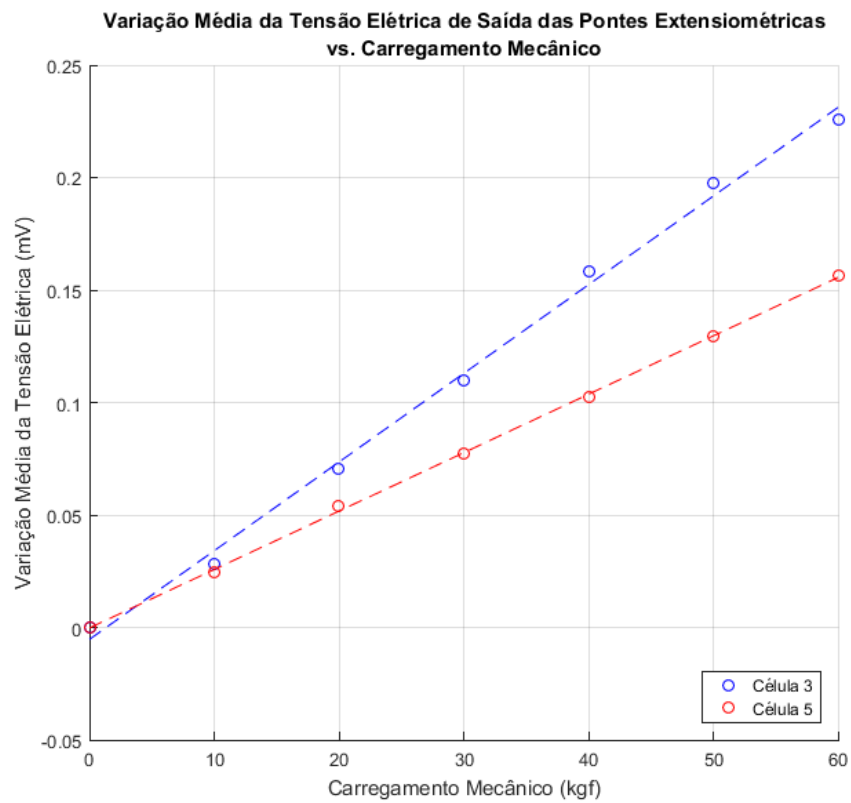


Figura 43: Função de transferência experimental das pontes extensiométricas: células 4 e 6.

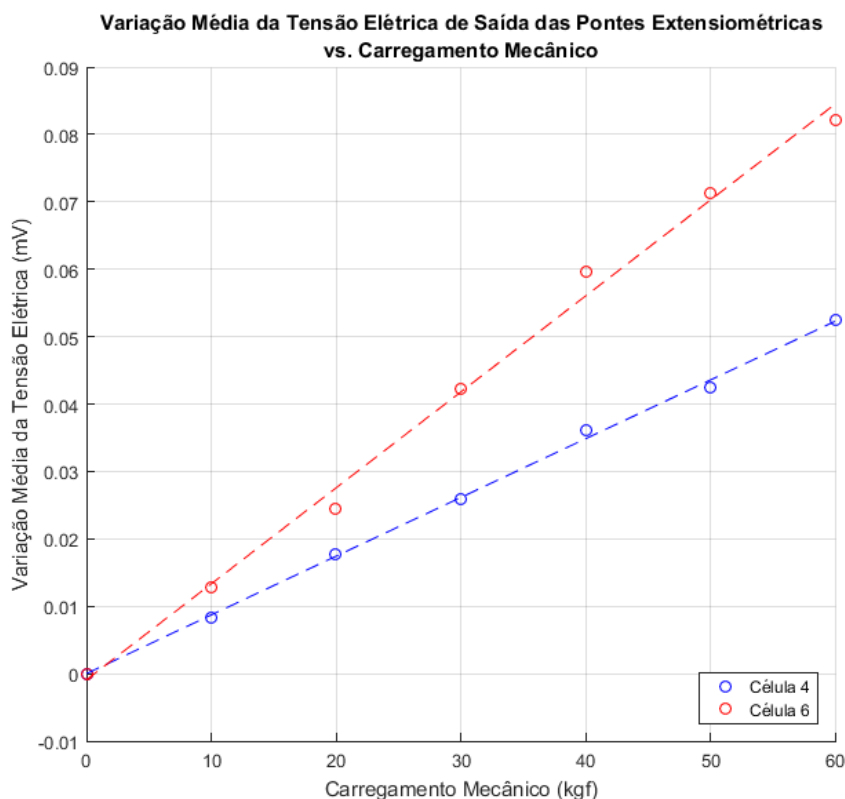


Tabela 5: Funções de transferência experimentais, erros de linearidade e sensibilidade dos dados medidos.

	Função de Transferência Experimental	Erro de Linearidade	Sensibilidade (mV/kgf)	Sensibilidade (mV/V)
Célula 1	$ch1(mV) = 0,0000501 + 0,00215 * Carga (kgf)$	4,13%	0,00215	0,026
Célula 7	$ch7(mV) = -0,0000512 + 0,00319 * Carga (kgf)$	6,28%	0,00319	0,038
Célula 2	$ch2(mV) = 0,00160 + 0,00543 * Carga (kgf)$	6,91%	0,00543	0,065
Célula 8	$ch8(mV) = 0,000221 + 0,00448 * Carga (kgf)$	5,46%	0,00448	0,054
Célula 3	$ch3(mV) = -0,00213 + 0,00388 * Carga (kgf)$	4,06%	0,00388	0,046
Célula 5	$ch5(mV) = -0,000704 + 0,00261 * Carga (kgf)$	4,46 %	0,00261	0,031
Célula 4	$ch4(mV) = 0,0000228 + 0,00087 * Carga (kgf)$	3,93%	0,00087	0,010
Célula 6	$ch6(mV) = -0,000916 + 0,00142 * Carga (kgf)$	6,28%	0,00142	0,017

Das Figuras 40, 41, 42 e 43, de maneira semelhante ao que foi observado nas simulações realizadas no software SolidWorks Trial 2017 para este tipo de carregamento mecânico, foi notado que a resposta das células de carga, para um dado par de células de carga simétricas entre si, não é idêntica. Além disso, foi observado que a diferença média de sensibilidade entre duas células de carga simétricas entre si foi cerca de 2,3 vezes superior à obtida por meio das simulações computacionais. Uma justificativa possível para isto é o possível desalinhamento dos

extensômetros em relação à direção de esforço axial, ocasionado principalmente pela dificuldade de acesso a alguns locais de cimentação, bem como, incertezas associadas aos componentes eletrônicos utilizados, posicionamento dos extensômetros e pequenas variações não controláveis no procedimento experimental, sobretudo no que diz respeito aos pontos de apoio da estrutura mecânica durante a realização dos ensaios.

Da Tabela 5, observa-se que o erro de linearidade médio é de 5,1%, muito maior que o erro de linearidade típico de uma célula de carga comercial (menor que 0,017%, para uma célula de carga Utilcell M350 (Datasheet Utilcell M350, 2009), por exemplo). Este comportamento já era esperado e pode ser explicado pela geometria não ideal das células de carga implementadas no chassi para a avaliação de esforços mecânicos axiais, uma vez que células de carga tubulares tipicamente são empregadas para a avaliação de esforços radiais. Outro fator que ajuda a explicar este comportamento é a baixa excursão da tensão elétrica de saída das pontes extensiométricas (em média 294 μV), aliada à incerteza dos multímetros utilizados. Na menor escala do multímetro (100 mV), a incerteza da medição, segundo a fabricante Tektronix, é de 0,0037% (percentual da medição) + 0,0035 mV (incerteza devido ao *range* do multímetro). Além disso, é importante notar que a compensação da tensão elétrica de *offset* das pontes extensiométricas ocorreu somente entre as repetições de um mesmo ensaio, podendo esta tensão de *offset* se manifestar como um erro dentro de uma mesma repetição. Isto foi feito de modo a melhor replicar as condições de operação do sistema de aquisição de dados proposto, uma vez que a rotina de compensação automática da tensão elétrica de *offset* somente é executada no início de uma seção de captura de dados. Ainda na Tabela 5, observa-se que maior diferença de sensibilidade ocorreu entre as células quatro e seis, cujo acesso para cimentação dos extensômetros foi dificultado por chapas metálicas rebitadas ao chassi. Neste caso, a célula quatro apresentou 61,3% da sensibilidade da célula seis. A menor diferença de sensibilidade ocorreu entre as células dois e oito, localizadas nas posições de mais fácil acesso no chassi. Neste caso, a célula oito apresentou 82,5% da sensibilidade da célula dois.

As células de carga traseiras foram ensaiadas independentemente das demais, pois a estrutura do chassi permitiu isso. Os resultados destes ensaios foram dispostos na Figura 44. A Tabela 6 mostra a função de transferência experimental para estas

células, bem como, o erro de linearidade calculado para cada uma delas e suas respectivas sensibilidades.

Figura 44: Função de transferência experimental das pontes extensiométricas: células 9 e 10.

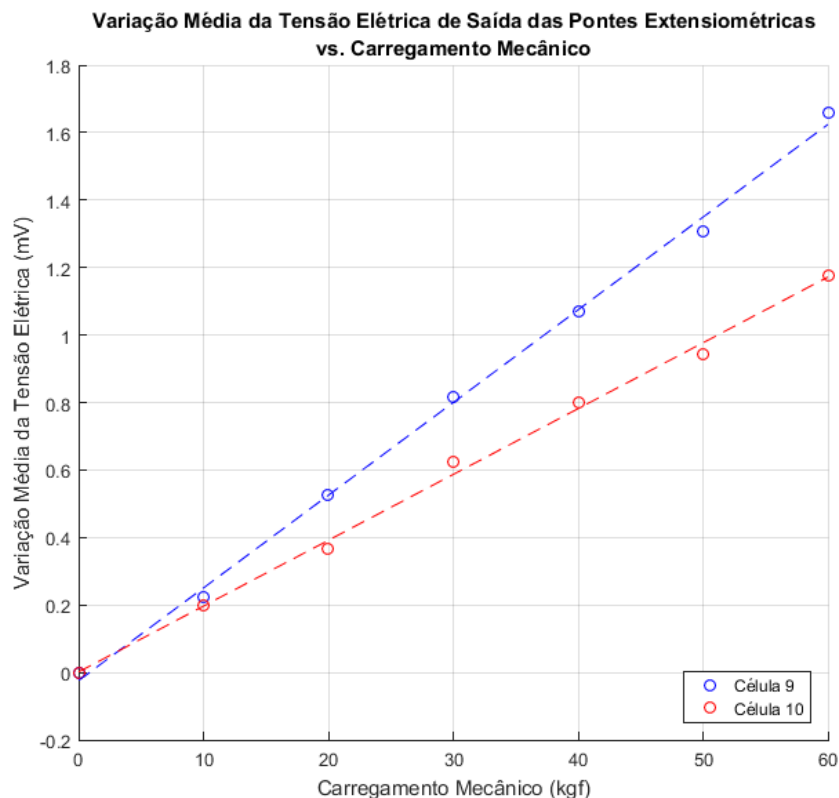


Tabela 6: Funções de transferência experimentais, erros de linearidade e sensibilidade dos dados medidos (carregamento mecânico no eixo traseiro).

	Função de Transferência Experimental	Erro de Linearidade	Sensibilidade (mV/kgf)	Sensibilidade (mV/V)
Célula 9	$ch9(mV) = -0,0242 + 0,0275 * Carga (kgf)$	3,2%	0,0275	0,33
Célula 10	$ch10(mV) = 0,00154 + 0,0195 * Carga (kgf)$	6,3%	0,0195	0,23

4.4. Caracterização das funções de transferência experimentais em função de deformação mecânica

Nestes ensaios, o módulo NI-9237 foi utilizado para determinar a deformação mecânica de cada célula de carga. Este módulo contém todo o condicionamento de sinais necessário para a leitura de células de carga e retorna um valor de deformação mecânica calculado com base na tensão elétrica de saída das pontes

extensiométricas. As Figuras 45, 46, 47 e 48 mostram as correspondentes funções de transferência experimentais obtidas através do uso do módulo NI-9237. Cada ponto do gráfico é a média aritmética de quatro repetições, cada uma delas contendo dez aquisições consecutivas, realizadas a uma taxa de 10 Hz.

Figura 45: Função de transferência experimental obtida com o módulo NI-9237: células 1 e 7.

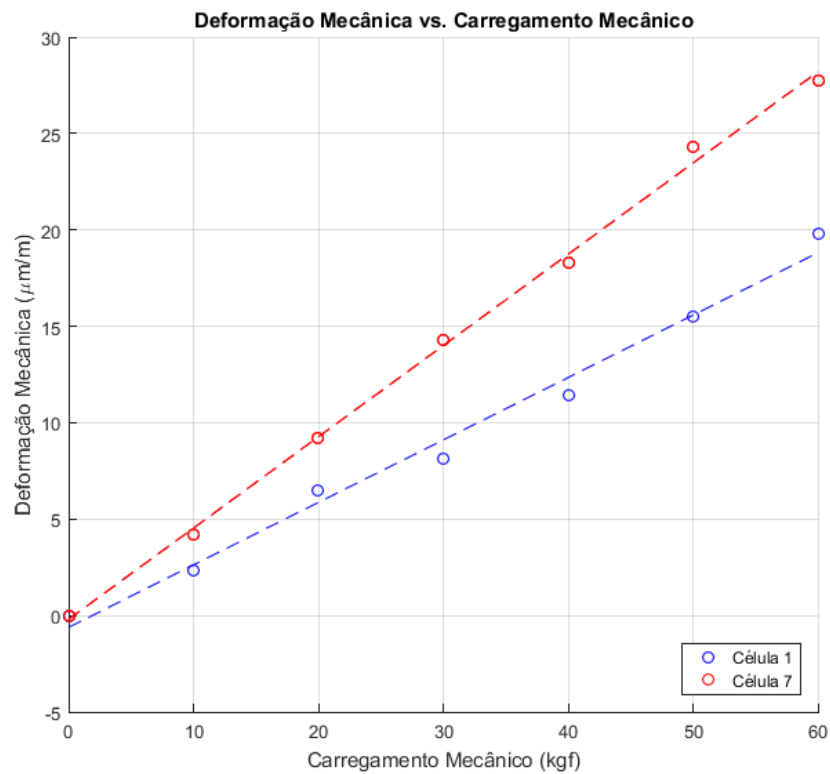


Figura 46: Função de transferência experimental obtida com o módulo NI-9237: células 2 e 8.

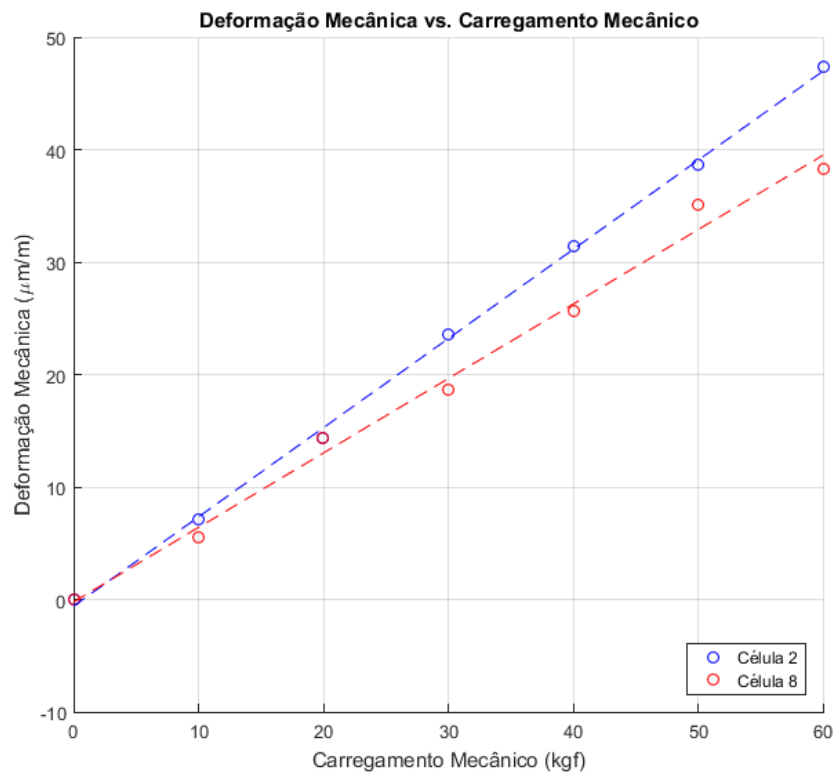


Figura 47: Função de transferência experimental obtida com o uso do módulo NI-9237: células 3 e 5.

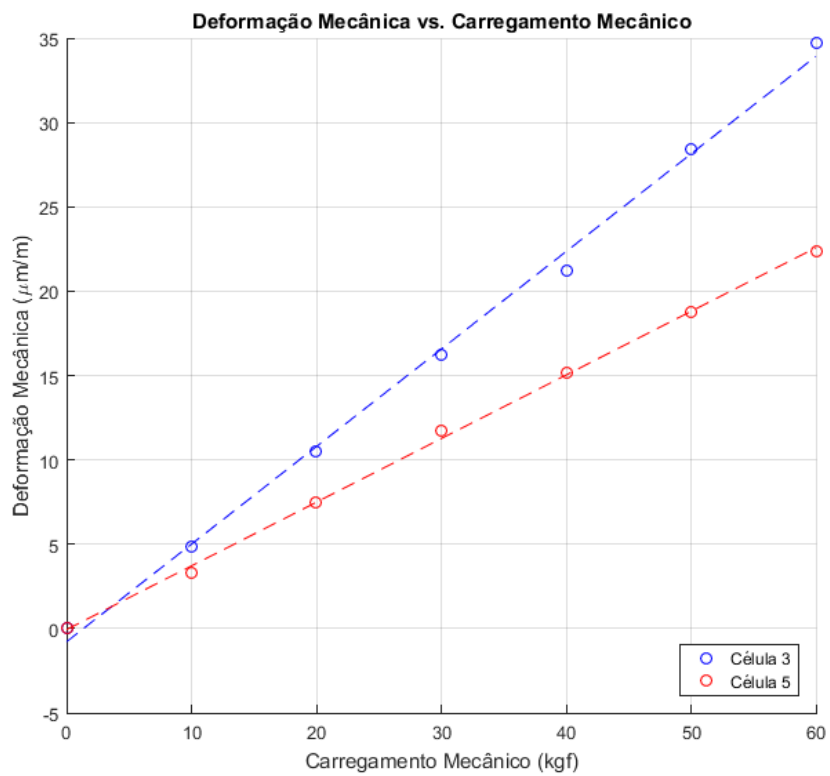
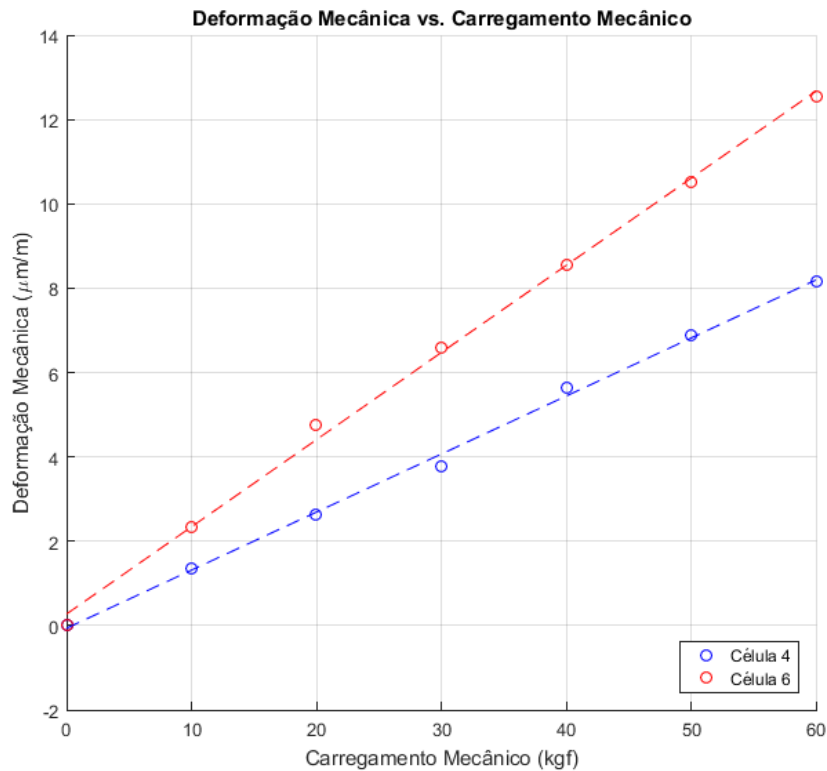


Figura 48: Função de transferência experimental obtida com o módulo NI-9237: células 4 e 6.



Destes ensaios, foi perceptível que o comportamento das células de carga seguiu o mesmo padrão dos ensaios do Capítulo 4.3, o que já era esperado, uma vez que este módulo determina a deformação mecânica do material com base na tensão de saída das células de carga e parâmetros acerca das pontes extensiométricas, que devem ser informados com base no *datasheet* dos *strain gages*. A Tabela 7 mostra as funções de transferência experimentais obtidas nestes ensaios, bem como o erro de linearidade e sensibilidade de cada célula de carga.

Tabela 7: Funções de transferência experimentais, erros de linearidade e sensibilidade para cada célula de carga, com base no módulo NI-9237.

	Função de Transferência Experimental	Erro de Linearidade	Sensibilidade ($\frac{\mu m/m}{kgf}$)
Célula 1	$ch1(\mu m/m) = -0,611 + 0,324 * Carga (kgf)$	5,4%	0,324
Célula 7	$ch7(\mu m/m) = -0,199 + 0,473 * Carga (kgf)$	3,6%	0,473
Célula 2	$ch2(\mu m/m) = -0,590 + 0,793 * Carga (kgf)$	5,7%	0,793
Célula 8	$ch8(\mu m/m) = -0,216 + 0,662 * Carga (kgf)$	6,6%	0,662
Célula 3	$ch3(\mu m/m) = -0,779 + 0,578 * Carga (kgf)$	5,1%	0,578
Célula 5	$ch5(\mu m/m) = -0,0562 + 0,377 * Carga (kgf)$	4,5 %	0,377
Célula 4	$ch4(\mu m/m) = -0,0612 + 0,137 * Carga (kgf)$	7,0%	0,137
Célula 6	$ch6(\mu m/m) = 0,275 + 0,207 * Carga (kgf)$	7,8%	0,207

As células de carga traseiras, como nos ensaios anteriores, foram ensaiadas independentemente das demais. Os dados coletados pelo módulo NI-9237 podem ser vistos na Figura 49. A Tabela 8 mostra as funções de transferência das células 9 e 10, bem como seus respectivos erros de linearidade.

Figura 49: Função de transferência experimental obtida com o módulo NI-9237: células 9 e 10.

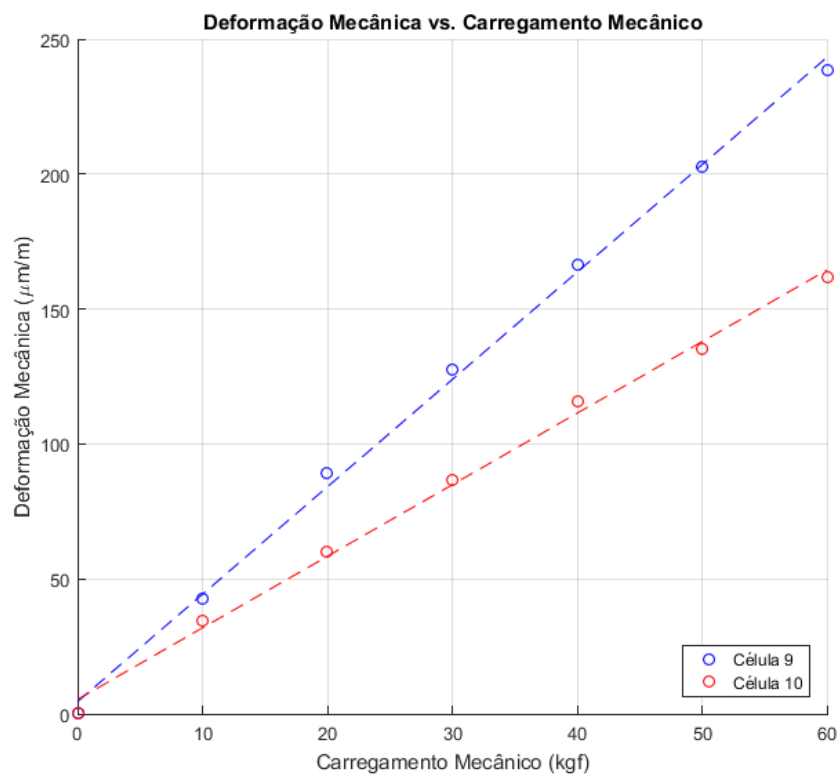


Tabela 8: Funções de transferência experimentais, erros de linearidade e sensibilidade para os ensaios com o módulo NI-9237.

	Função de Transferência Experimental	Erro de Linearidade	Sensibilidade ($\frac{\mu m/m}{kgf}$)
Célula 9	$ch9(\mu m/m) = 4,59 + 3,98 * Carga (kgf)$	5,9%	3,98
Célula 10	$ch10(\mu m/m) = 5,38 + 2,65 * Carga (kgf)$	4,1%	2,65

Da Figura 49, nota-se que a deformação máxima das células de carga traseiras foi cerca de 5,2 vezes maior que a máxima deformação registrada para as células dianteiras, o que já era esperado, levando em consideração que as células de carga traseiras permitem o ensaio individual, com cada célula de carga suportando a totalidade do carregamento mecânico aplicado.

Para fins de comparação entre os dados de deformação mecânica coletados experimentalmente e os dados provenientes de simulações computacionais, os

gráficos das Figuras 50 a 54 foram criados, onde a linha tracejada está relacionada aos dados coletados experimentalmente e a linha sólida representa os dados da simulação. É válido ressaltar que as simulações computacionais de deformação mecânica tiveram, como objetivo, somente a determinação das faixas de deformação mecânica esperadas no chassi.

Figura 50: Funções de transferência: linha sólida representa a função simulada e a tracejada a experimental para as células 1 e 7.

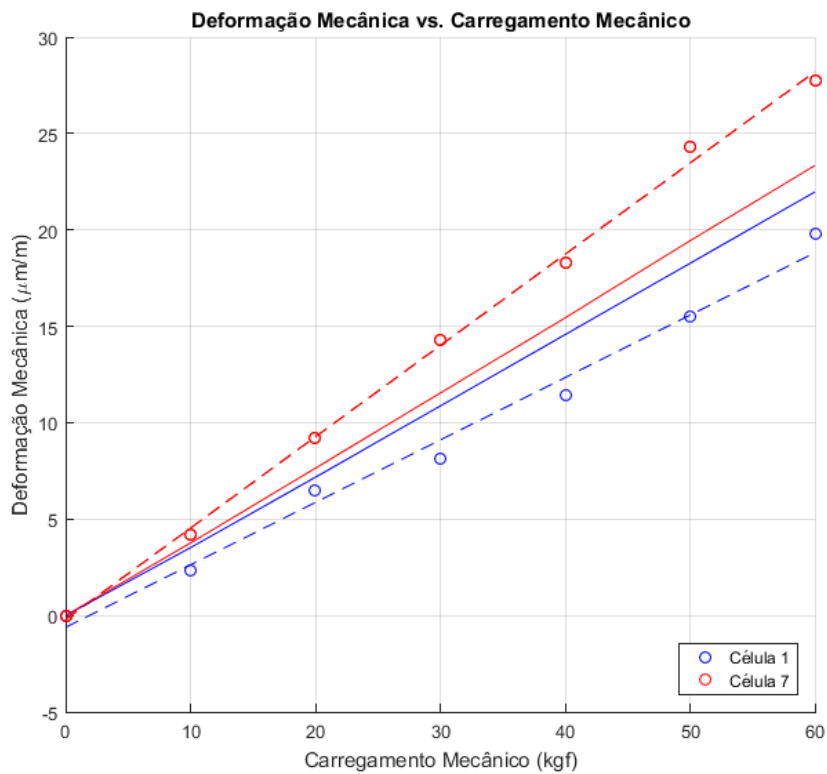


Figura 51: Funções de transferência: linha sólida representa a função simulada e a tracejada a experimental para as células 2 e 8.

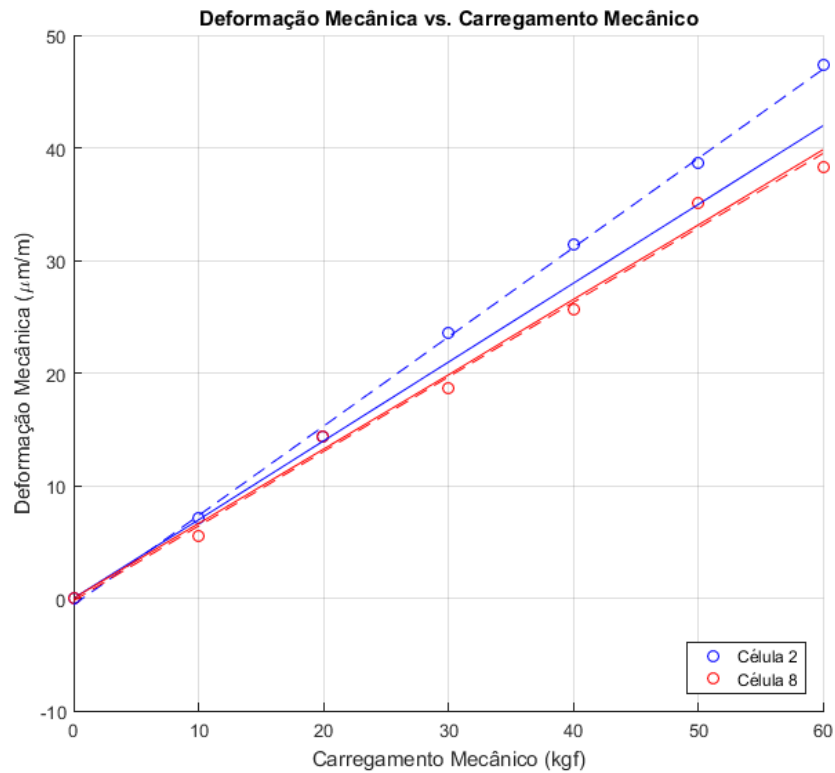


Figura 52: Funções de transferência: linha sólida representa a função simulada e a tracejada a experimental para as células 3 e 5.

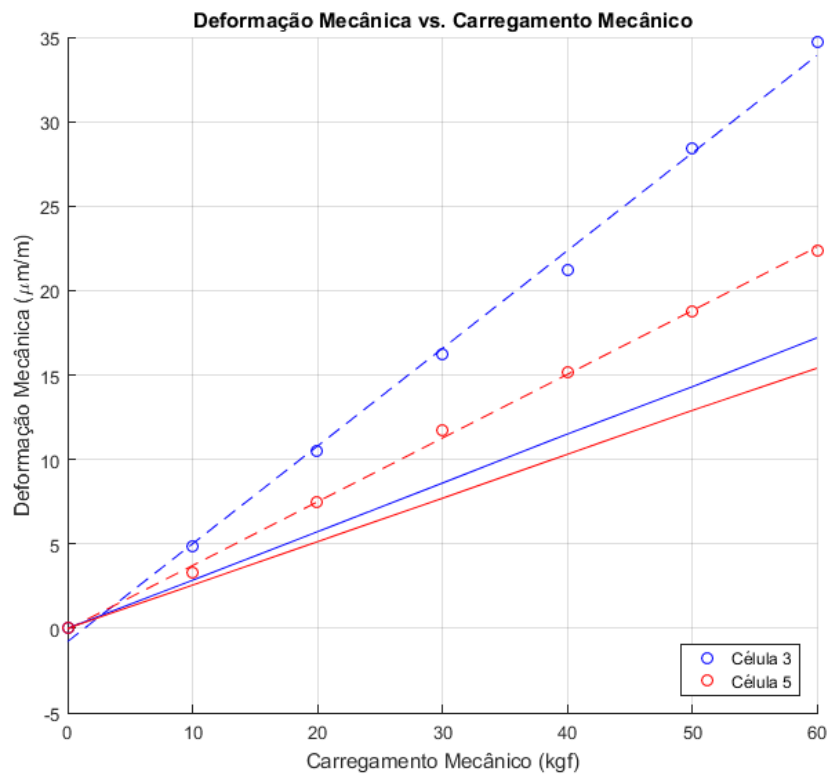


Figura 53: Funções de transferência: linha sólida representa a função simulada e a tracejada a experimental para as células 4 e 6.

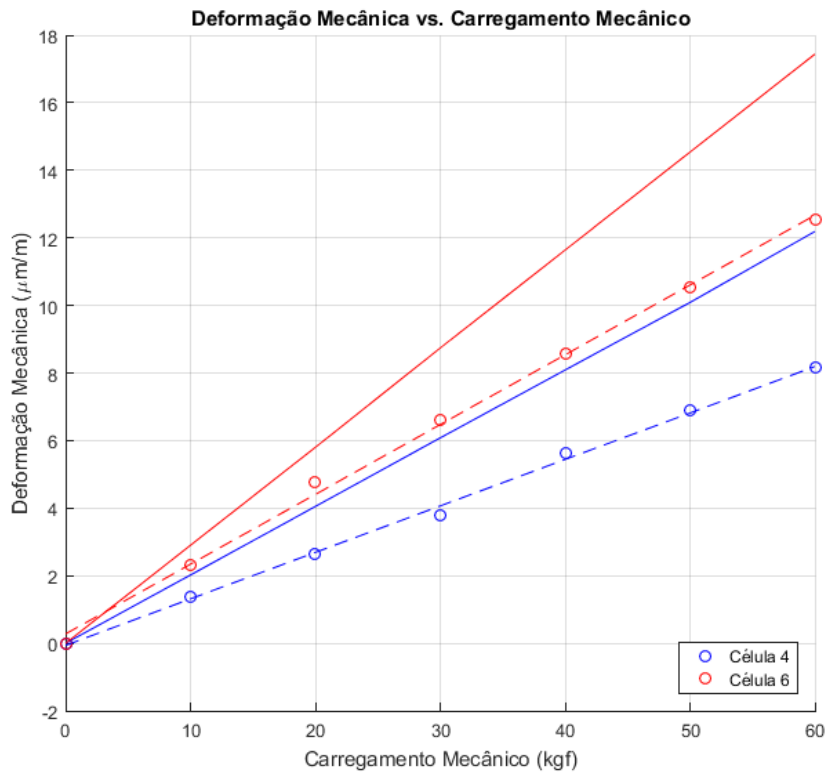
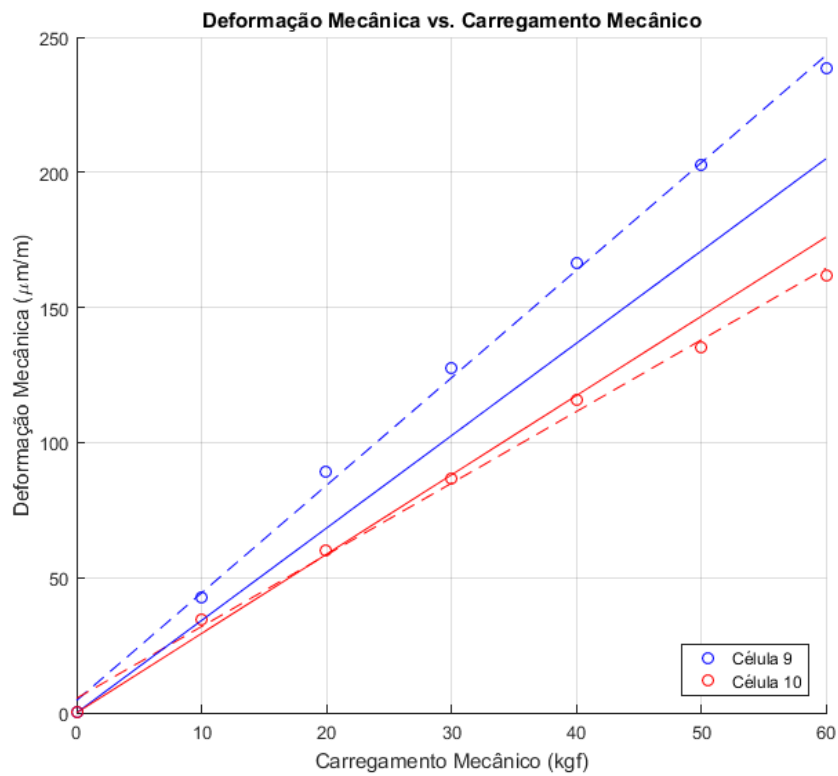


Figura 54: Funções de transferência: linha sólida representa a função simulada e a tracejada a experimental para as células 9 e 10.



Destes gráficos, ao comparar as deformações mecânicas obtidas experimentalmente através do módulo NI-9237 com as simulações computacionais, é possível observar que a diferença de sensibilidade média é, de $0,06 \mu m / (m \cdot kgf)$. A menor diferença entre os valores de sensibilidade experimentais e simulados ocorre na célula de carga número oito, que registrou uma sensibilidade simulada $0,002 \mu m / (m \cdot kgf)$ superior ao valor experimental, ao passo que a maior diferença de sensibilidade ocorreu na célula número três, cuja sensibilidade experimental foi $0,3 \mu m / (m \cdot kgf)$ superior à simulada.

4.5. Resultados do Ensaio estático com o sistema de condicionamento de sinais

Nestes ensaios, o carregamento mecânico aplicado ao chassi foi variado tal como nos ensaios anteriormente descritos. Desta vez, entretanto, as células de carga foram conectadas ao circuito de condicionamento e aquisição de dados. Considerando a situação de carregamento dianteiro, os dados coletados foram dispostos nas Figuras 55 e 56. A Tabela 9 contém as funções de transferência, os erros de linearidade e sensibilidade obtidos a partir dos dados destes ensaios. A sensibilidade em mV/V foi calculada considerando a alimentação da ponte com uma tensão elétrica de $5,000 \pm 0,001$ V. Cada ponto plotado nos gráficos representa a média de oitocentas amostras capturadas pelo conversor A/D, sendo metade delas adquiridas com o carregamento mecânico ascendente e metade com o carregamento mecânico descendente da estrutura mecânica.

Figura 55: Função de transferência experimental obtida com o uso do sistema de condicionamento: células 1, 7, 2 e 8.

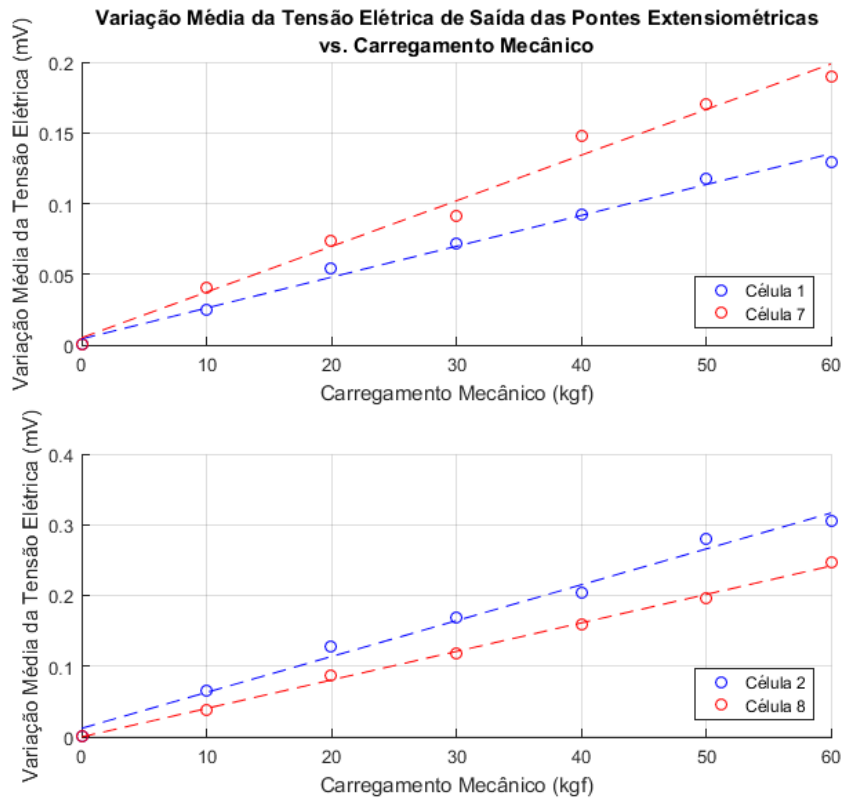


Figura 56: Função de transferência experimental obtida com o uso do sistema de condicionamento: células 3, 5, 4 e 6.

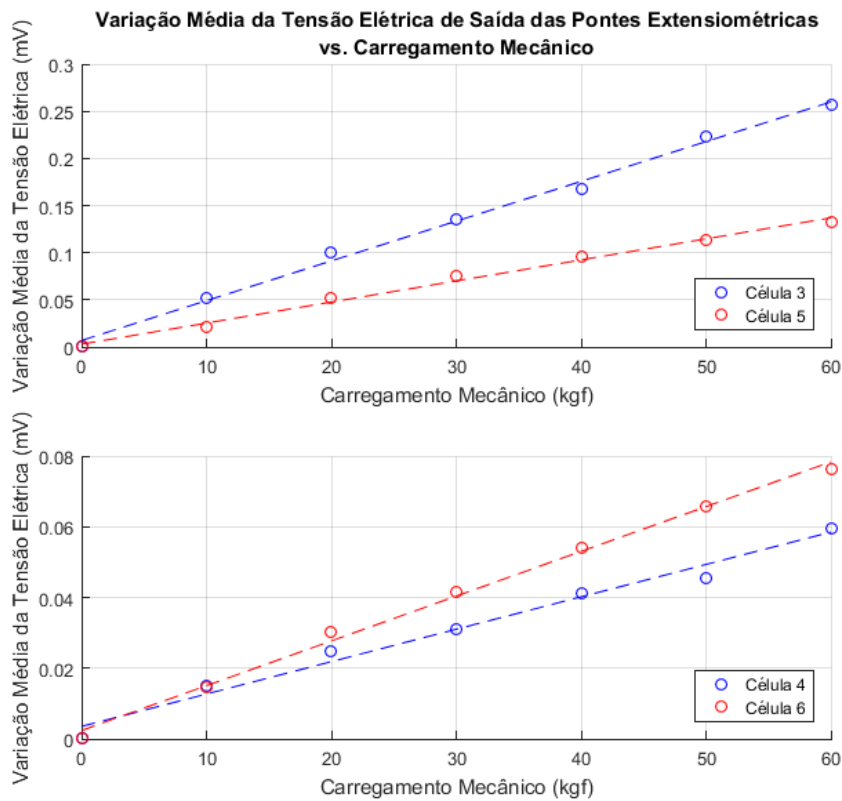


Tabela 9: Funções de transferência experimentais, erros de linearidade e sensibilidade. Dados coletados através de ensaios estáticos com o circuito de condicionamento e aquisição de dados.

	Função de Transferência Experimental	Erro de Linearidade	Sensibilidade (mV/kgf)	Sensibilidade (mV/V)
Célula 1	$ch1(mV) = 0,00433 + 0,00218 * Carga (kgf)$	9,8%	0,00218	0,026
Célula 7	$ch7(mV) = 0,00514 + 0,00323 * Carga (kgf)$	13%	0,00323	0,039
Célula 2	$ch2(mV) = 0,0118 + 0,00508 * Carga (kgf)$	5,3%	0,00508	0,061
Célula 8	$ch8(mV) = -0,000440 + 0,00403 * Carga (kgf)$	8,6%	0,00403	0,048
Célula 3	$ch3(mV) = 0,00701 + 0,00422 * Carga (kgf)$	9,4%	0,00422	0,051
Célula 5	$ch5(mV) = 0,00305 + 0,00223 * Carga (kgf)$	7,7 %	0,00223	0,027
Célula 4	$ch4(mV) = 0,00354 + 0,000916 * Carga (kgf)$	7,7%	0,000916	0,011
Célula 6	$ch6(mV) = 0,00240 + 0,00127 * Carga (kgf)$	9,7%	0,00127	0,015

Para o carregamento traseiro, os dados coletados foram dispostos na Figura 57. As funções de transferência experimentais para as células nove e dez, obtidas através do sistema de condicionamento e aquisição de dados, bem como seus respectivos erros de linearidade e sensibilidades, foram dispostos na Tabela 10.

Figura 57: Função de transferência experimental obtida com o uso do sistema de condicionamento: células 9 e 10.

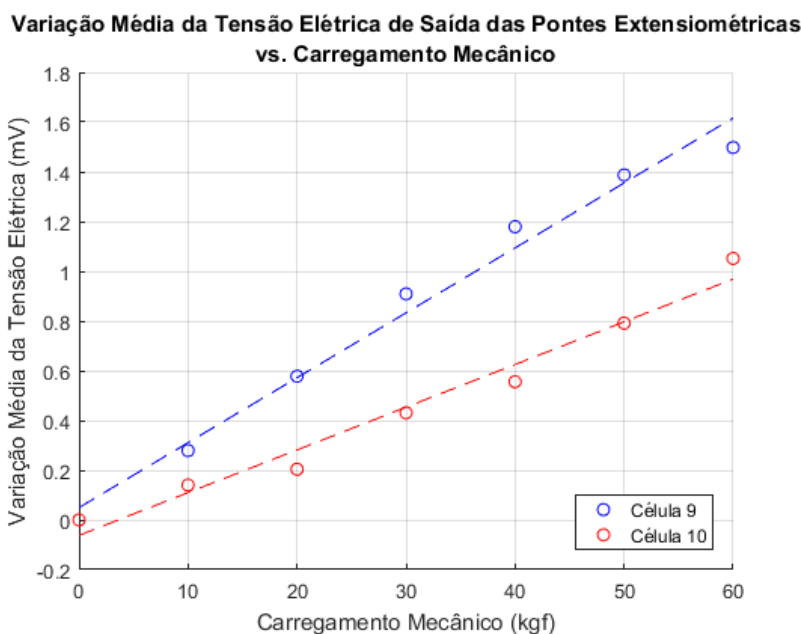


Tabela 10: Funções de transferência experimentais, erros de linearidade e sensibilidade. Dados coletados através de ensaios estáticos com o circuito de condicionamento e aquisição de dados.

	Função de Transferência Experimental	Erro de Linearidade	Sensibilidade (mV/kgf)	Sensibilidade (mV/V)
Célula 9	$ch9(mV) = 0,0495 + 0,0261 * Carga (kgf)$	7,3%	0,0261	0,31
Célula 10	$ch10(mV) = -0,0620 + 0,0172 * Carga (kgf)$	8,6%	0,0172	0,21

Em comparação com os dados da Tabela 5, os dados apresentados nas Tabelas 9 e 10 apresentaram erro de linearidade médio 3,7 pontos percentuais maior (8,9%, comparado a 5,2% da Tabela 5). Uma possível explicação para isso é presença de quatro estágios de condicionamento de sinais elétricos entre a saída das pontes extensiométricas e a leitura da tensão elétrica pelos conversores A/D. Para facilitar a comparação dos dados coletados nos ensaios da Seção 4.3 e os dados coletados nesta Seção, os dados coletados nos ensaios desta Seção foram sobrepostos nos gráficos das Figuras 40 a 44, gerando os gráficos disponíveis nas Figuras 58 a 62 onde a linha tracejada diz respeito aos dados da Seção 4.3 e a linha sólida contém os dados das Figuras 55, 56 e 57 deste subcapítulo.

Figura 58: Comparação entre as funções de transferência experimentais obtidas com o uso do multímetro de bancada (linha tracejada) e com o circuito de condicionamento (linha sólida): células 1 e 7.

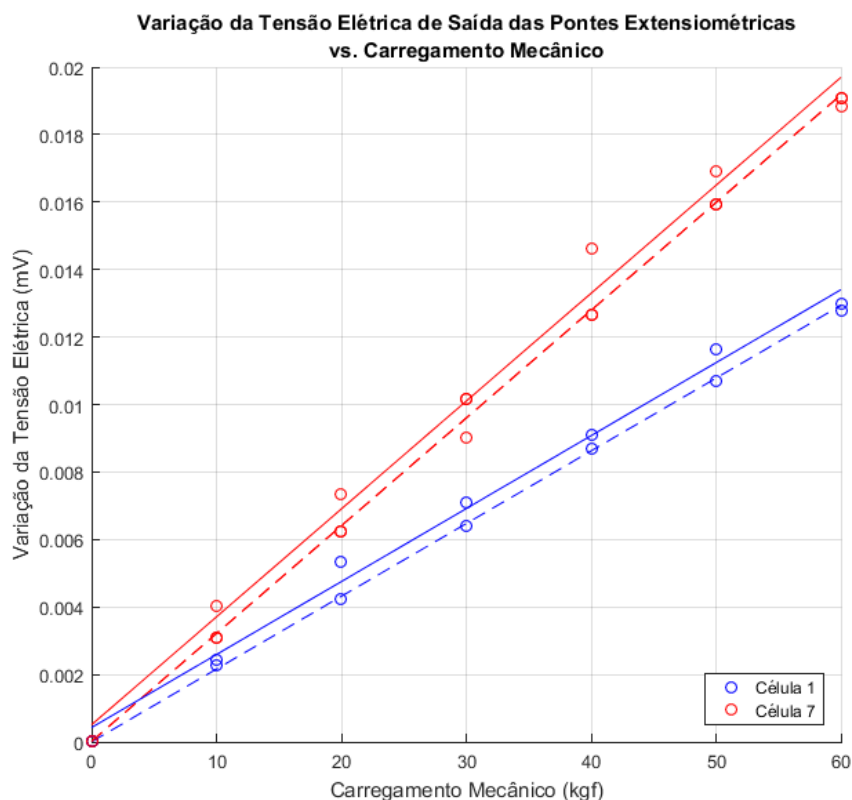


Figura 59: Comparação entre as funções de transferência experimentais obtidas com o uso do multímetro de bancada (linha tracejada) e com o circuito de condicionamento (linha sólida): células 2 e 8.

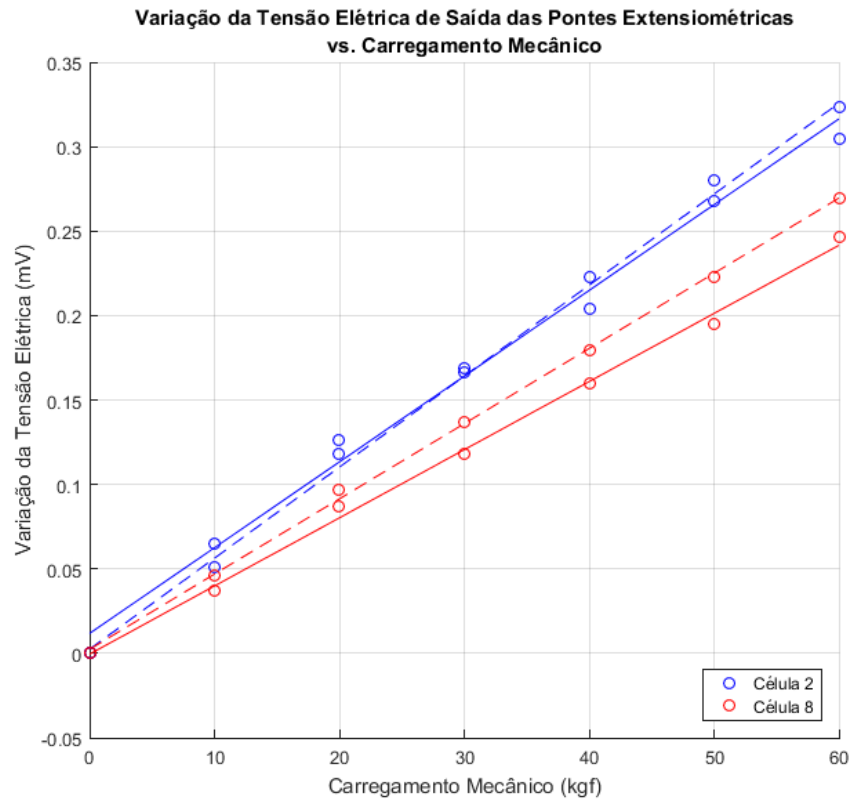


Figura 60: Comparação entre as funções de transferência experimentais obtidas com o uso do multímetro de bancada (linha tracejada) e com o circuito de condicionamento (linha sólida): células 3 e 5.

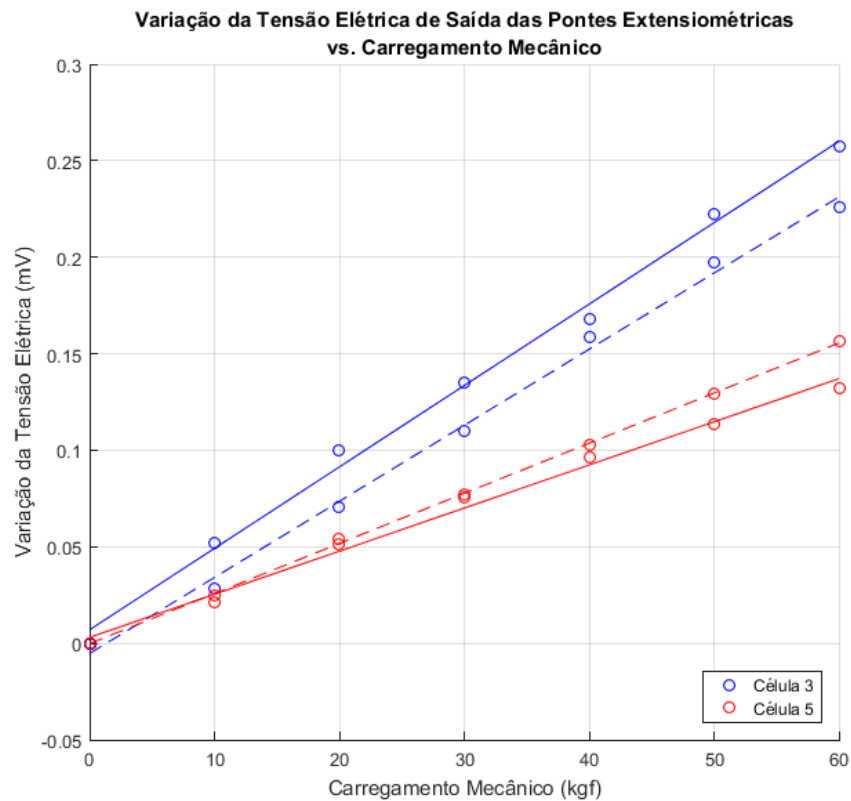


Figura 61: Comparação entre as funções de transferência experimentais obtidas com o uso do multímetro de bancada (linha tracejada) e com o circuito de condicionamento (linha sólida): células 4 e 6.

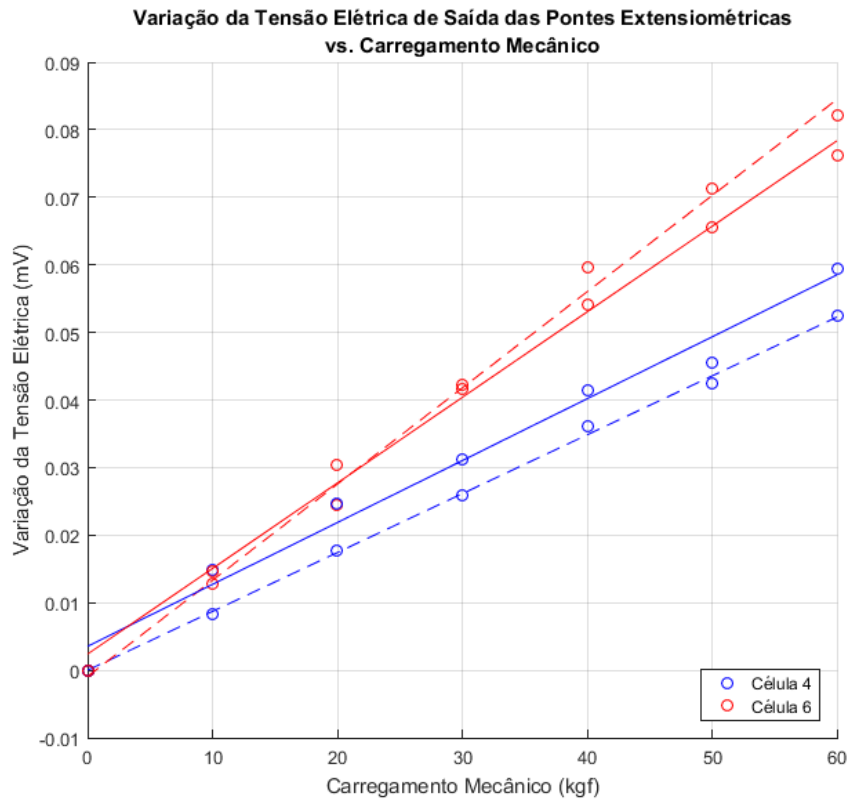
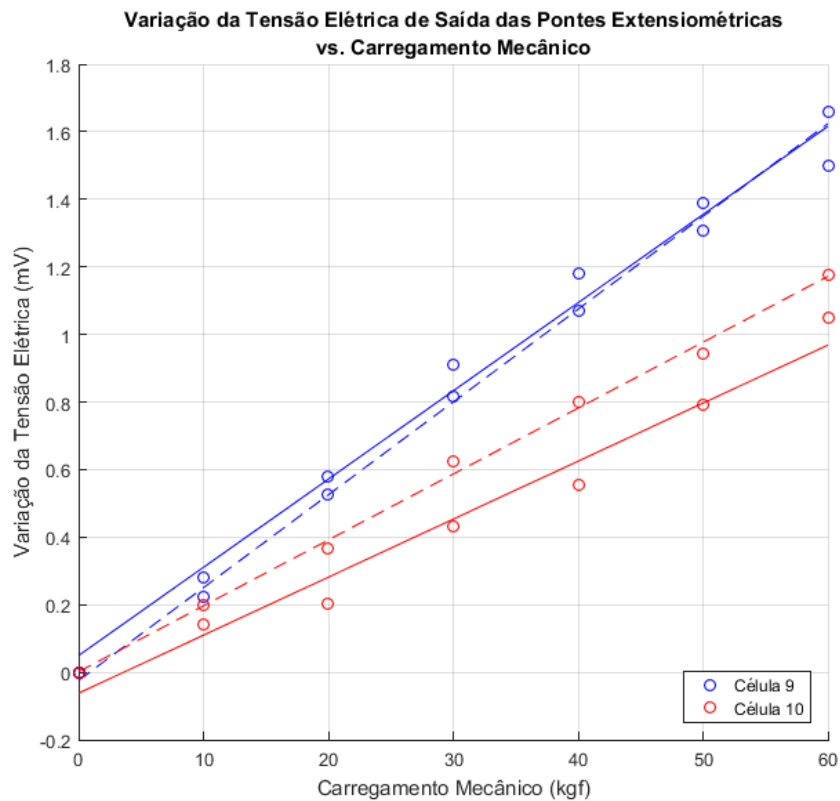


Figura 62: Comparação entre as as funções de transferência experimentais obtidas com o uso do multímetro de bancada (linha tracejada) e com o circuito de condicionamento (linha sólida): células 9 e 10.

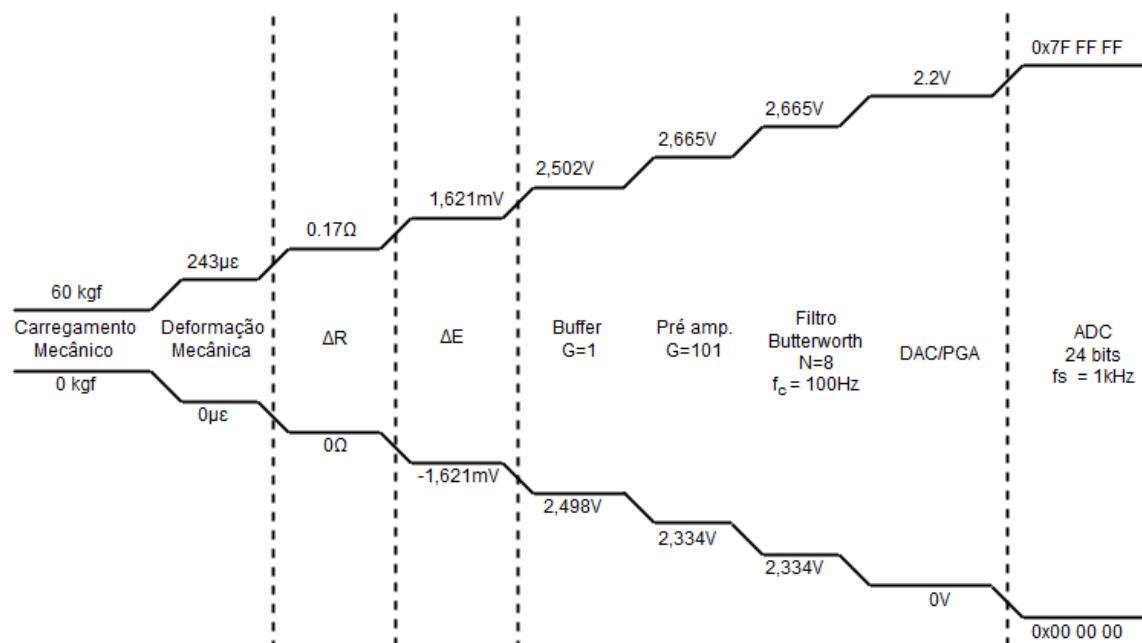


Comparando os dados das Figuras 58 a 62, a foi possível verificar que o erro de linearidade foi, em média, 3,3 pontos percentuais superior com o circuito de condicionamento e aquisição de dados, além disso, verifica-se que as sensibilidades obtidas através dos ensaios com multímetros de bancada foram, em média 0,005 mV/V superiores à sensibilidade obtida através dos ensaios com o sistema de condicionamento e aquisição de dados. Isto sugere que o condicionador de sinais introduz erros na medição da deformação mecânica, o que já era esperado, dada a incerteza associada aos componentes eletrônicos deste sistema. Estes gráficos mostram, também, que existe um erro de *offset* elétrico dos sinais comparados, o que sugere que a rotina de autocompensação da tensão elétrica de *offset* poderia ser melhor implementada, por exemplo, através do uso de um algoritmo em laço fechado de realimentação.

4.6. Cadeia de medidas experimental

De posse dos dados obtidos experimentalmente, a cadeia de medidas experimental foi obtida (ver Figura 63):

Figura 63: Cadeia de medidas experimental dividida em cinco etapas.



Da mesma forma que na cadeia de medidas proposta, a cadeia de medidas experimental foi dividida em cinco etapas. Para cada etapa, a resolução de entrada, resolução de saída, sensibilidade e erro de linearidade foram levantados experimentalmente (salvo na etapa de conversão A/D) e dispostos na Tabela 11.

Tabela 11: Resolução de entrada, resolução de saída, sensibilidade e erro de linearidade das etapas da cadeia de medidas experimental.

	Etapa				
	1	2	3	4	5
Resolução de Entrada	10±0,1kgf	38±6µm/m	25±3mΩ	0,23±0,05mV	156±37mV
Resolução de Saída	38±6µm/m	25±3mΩ	0,23±0,05mV	156±37mV	23 bits
Sensibilidade	3,9±0,7 $\frac{\mu\text{m}/\text{m}}{\text{kgf}}$	0,7±0,8 $\frac{\text{m}\Omega}{\mu\text{m}/\text{m}}$	9,3±2,8mV/Ω	680±12,1V/V	0,3µV/bit
Erro de Linearidade	5,7±0,41%	4,6±0,9%	4,9±0,4%	8,9±0,7%	0,004%

Para a primeira etapa da cadeia de medidas, foi verificado experimentalmente que a menor variação da entrada capaz de alterar a saída de um extensômetro foi da ordem de 10 kgf. Como resolução de saída desta etapa foi obtida com o uso do módulo NI-9237, que faz uso das pontes extensiométricas para determinar a deformação mecânica do corpo sob teste, a incerteza relacionada à deformação mecânica foi considerada do tipo A, com quarenta amostras para cada valor de carregamento mecânico. Na segunda etapa, a variação de resistência elétrica foi determinada com o uso dos multímetros Tektronix DMM-4050, no modo de medição de quatro fios para a resistência elétrica. Devido à resistência elétrica nominal de $350 \pm 1,01\Omega$ dos extensômetros, foi utilizada a escala de 1 kΩ do multímetro, com cuja resolução é de 1 mΩ, com incerteza também de 1 mΩ. A terceira etapa levou em consideração os dados obtidos nos ensaios para o levantamento das funções de transferência em tensão elétrica, que fizeram uso dos mesmos multímetros Tektronix DMM-4050, utilizados anteriormente. Nestes ensaios, para cada valor de carregamento mecânico distinto, foram utilizadas doze amostras para a determinação da incerteza padrão do tipo A. Para a quarta etapa, foram levados em consideração os ensaios realizados com o circuito de condicionamento e aquisição de dados, bem como, incertezas obtidas experimentalmente para os componentes passivos integrantes deste circuito eletrônico, de modo que esta incerteza foi avaliada como

sendo também do tipo A. Na quinta etapa, os dados fornecidos pelo fabricante Maxim Integrated, disponíveis no *datasheet* do conversor A/D MAX11040k foram utilizados, caracterizando, portanto, uma incerteza do tipo B.

Tal como realizado para a cadeia de medidas proposta, a incerteza propagada das etapas foi calculada como especificado em (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, p.10; p.18, 2008). Assim sendo, foi obtido que a incerteza propagada, ao final da segunda etapa, é de $\pm 4,2 \text{ m}\Omega$ (2,4%). Similarmente, a incerteza propagada ao final da terceira e quarta etapa, foram, respectivamente, $\pm 48 \text{ }\mu\text{V}$ (3%) e $\pm 0,34 \text{ V}$ (15%). Como a resolução do conversor A/D é de $0,3 \text{ }\mu\text{V}$, com incerteza de dois bits menos significativos, considera-se que a resolução da conversão A/D é muito superior à resolução dos demais sinais envolvidos, de modo que as incertezas da conversão não influenciam na incerteza propagada final do sistema de medições experimental, portanto, é estimado que a incerteza final deste sistema de medição é da ordem de 9,7kgf (15%), 5,4% superior àquela do sistema de medição proposto anteriormente. Além disso, foi verificado que a maior fonte de incertezas é a etapa quatro da cadeia de medidas (circuito condicionador), o que possivelmente pode ser justificado pelas incertezas relacionadas aos componentes eletrônicos utilizados.

5. Conclusões

Através dos dados coletados nos ensaios, foi possível validar o funcionamento do sistema de condicionamento e aquisição de dados, que, embora tenha atingido os requisitos de projeto, teve dificuldades para a representação dos sinais das células de carga criadas no chassi, possivelmente devido à baixa sensibilidade destas. Um ponto que poderia ser melhorado, no condicionador de sinais, é o layout da placa de circuitos, de modo a melhorar a relação sinal-ruído deste circuito eletrônico, possivelmente por meio de placas *multilayer*. Outra melhoria possível seria a implementação de uma rotina de autocompensação da tensão elétrica de *offset* das pontes extensiométricas em laço fechado. Da maneira como esta rotina foi concebida, ela captura dados de tensão elétrica e ajusta a saída dos conversores D/A de modo a reduzir ou anular a tensão de *offset*. Experimentalmente, possivelmente devido às incertezas dos componentes empregados, foi verificado que esta tensão elétrica *offset* era reduzida pela rotina de autocompensação, mas não se tornava nula, o que ocasionava a saturação do conversor A/D em determinadas situações de operação, sobretudo se o ganho dos PGAs fosse ajustado para valores superiores a 20 V/V. Para tornar o condicionador de sinais mais robusto, seria possível substituir esta rotina por uma baseada num controlador PID, atuando em laço fechado. A implementação de um controlador desse tipo, no entanto, foge do escopo deste trabalho.

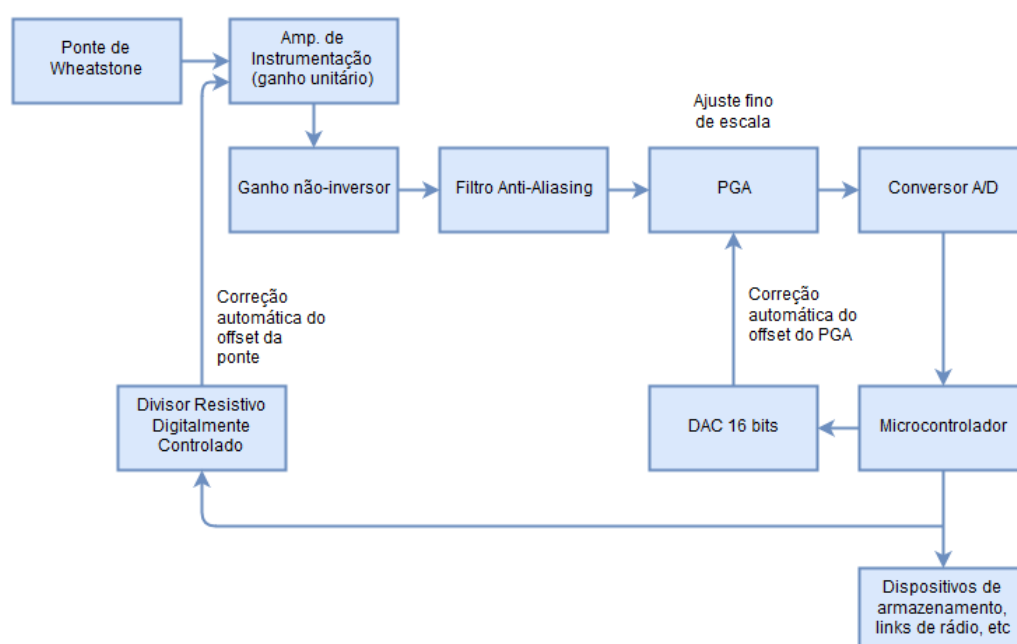
Dado que o principal objetivo deste trabalho é avaliar experimentalmente os esforços mecânicos que acometem a estrutura mecânica durante a operação do veículo, principalmente no que diz respeito às ordens grandeza dos esforços mecânicos impostos à estrutura por impactos mecânicos, é possível afirmar que o trabalho, de maneira geral, logrou êxito limitado, uma vez que a sensibilidade das pontes extensiométricas impactou substancialmente na qualidade dos resultados. Verificou-se que a incerteza propagada do circuito condicionador de sinais experimental foi de 15%, 5,4% superior à do sistema de medições proposto, o que sugere que o projeto deste condicionador poderia ser melhorado substancialmente. Uma possível melhoria a este circuito de condicionamento, por exemplo, seria a utilização de amplificadores de instrumentação com ganho fixo $G=100$, de maneira a

eliminar o pré-amplificador presente após o amplificador de instrumentação de ganho unitário, potencialmente reduzindo as incertezas associadas a esta etapa de condicionamento. Por razões de disponibilidade e custo dos componentes eletrônicos, isto não foi implementado experimentalmente. A análise dos efeitos mecânicos causados na estrutura pelos carregamentos mecânicos aos quais o veículo é submetido durante sua operação, todavia, foge do escopo deste trabalho e merece um estudo dedicado.

6. Sugestões para trabalhos futuros

Caso seja necessária a instrumentação de outros elementos da estrutura metálica do chassi, pode ser atrativo, sobretudo do ponto de vista de custos, a implementação de extensômetros na configuração de meia ponte de Wheatstone, uma vez que, para cada elemento estrutural instrumentado, seriam necessários apenas dois extensômetros, ao invés de quatro, como na configuração empregada neste trabalho. Tendo isto em mente, propõe-se a seguinte variação do Diagrama de Blocos da Figura 5. Recomenda-se a utilização de um divisor resistivo digitalmente controlado com resolução de 10 bits ou superior, tal como o MAX5496. Alternativamente, um segundo canal de conversão digital-analógica poderia ser utilizado para este fim, caso seja mais conveniente.

Figura 64: Diagrama de blocos proposto do sistema de condicionamento de sinais para operação em meia ponte.



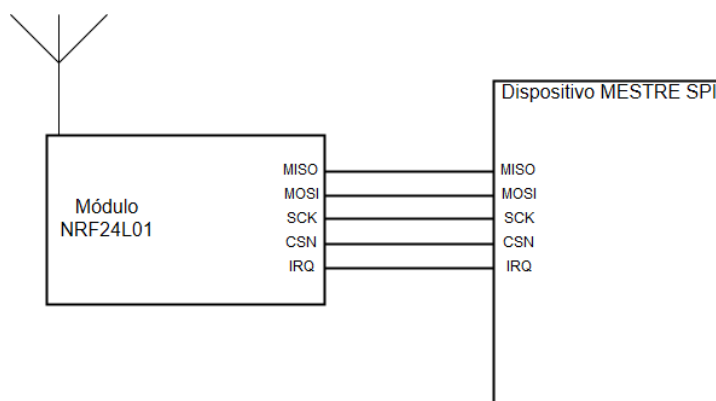
Ainda do ponto de vista do condicionador de sinais, um algoritmo melhor para a compensação da tensão elétrica de *offset* pode ser desenvolvido. Além disso, como as oscilações de deformação mecânica na estrutura são sinais de baixa frequência, tipicamente menor que 5Hz, uma rotina de *autorange* poderia ser implementada, de modo a otimizar a resolução e o alcance dinâmico do sistema de condicionamento.

Do ponto de vista de saúde estrutural do chassi, um estudo aprofundado a respeito da fadiga mecânica no chassi poderia ser realizado, tendo em vista que a suspensão do veículo não possui amortecedores, estando bastante sujeita a impactos secos durante a operação normal do veículo, o que pode comprometer, a longo prazo, a segurança do piloto e a saúde estrutural do veículo. Adicionalmente, como o piso sobre o qual o veículo se desloca não é um fator controlável nos ensaios, sugere-se um estudo sobre a influência do piso na vibração e comportamento dinâmico do veículo.

Para melhor compreender os carregamentos mecânicos aos quais o chassi está submetido durante a operação do veículo, convém a realização de ensaios para a criação de modelos dinâmicos do chassi, possibilitando a análise dinâmica dos esforços mecânicos no chassi.

Como o veículo instrumentado neste trabalho é utilizado em competições de eficiência energética, é sugerido que dados sejam coletados durante a realização das competições, nas condições de operação reais que o veículo deve enfrentar. Adicionalmente, é sugerido a implementação de um link de rádio entre o sistema de aquisição de dados e um computador, de modo que a equipe do veículo possa acompanhar a performance do chassi durante a competição, sem a necessidade de descarregar os dados após o término da seção de capturas de dados. Para a implementação desse link de rádio, é sugerido o uso do módulo NRF24L01, fabricado pela Nordic Semiconductor. Este módulo transmite na banda de 2,4GHz, e, contanto que antenas adequadas sejam utilizadas, possui alcance verificado experimentalmente da ordem de 2km, em linha de visada. A conexão deste módulo com um microcontrolador pode ser feita como mostra a Figura 65. O sinal IRQ permite que o microcontrolador seja sinalizado na ocorrência de algum evento importante, por exemplo, o recebimento de um pacote de dados. Para um programa eficiente, este sinal deverá gerar uma interrupção no microcontrolador, no entanto, a utilização deste sinal é opcional. Caso seja optado pela não utilização deste sinal, o programa deverá fazer o *polling* dos registradores do módulo NRF24L, de modo a capturar um eventual recebimento de dados.

Figura 65: Conexão entre um microcontrolador e o módulo de rádio NRF24L01.



Referências Bibliográficas

BALBINOT, A; BRUSAMARELLO, V. J. **INSTRUMENTAÇÃO E FUNDAMENTOS DE MEDIDAS**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

HIBBELER, R. C. **MECHANICS OF MATERIALS**. 8. ed. Prentice Hall, 2011.

GHAVAMI, P. **MECHANICS OF MATERIALS, AN INTRODUCTION TO ENGINEERING TECHNOLOGY**. 1. ed. Springer, 2015.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. **DISCRETE-TIME SIGNAL PROCESSING**. 3. ed. Prentice Hall, 2010.

MORRIS, A. S.; LANGARI, R. **MEASUREMENT AND INSTRUMENTATION: THEORY AND APPLICATION**. 1. ed. Elsevier, 2012.

ZUMBAHLEN, H. **LINEAR CIRCUIT DESIGN HANDBOOK**. 1. ed. Analog Devices, 2008.

KARKI, J. **ACTIVE LOW-PASS FILTER DESIGN**. Texas Instruments Application Report SLOA049B. Disponível em: <http://www.ti.com/lit/an/sloa049b/sloa049b.pdf>

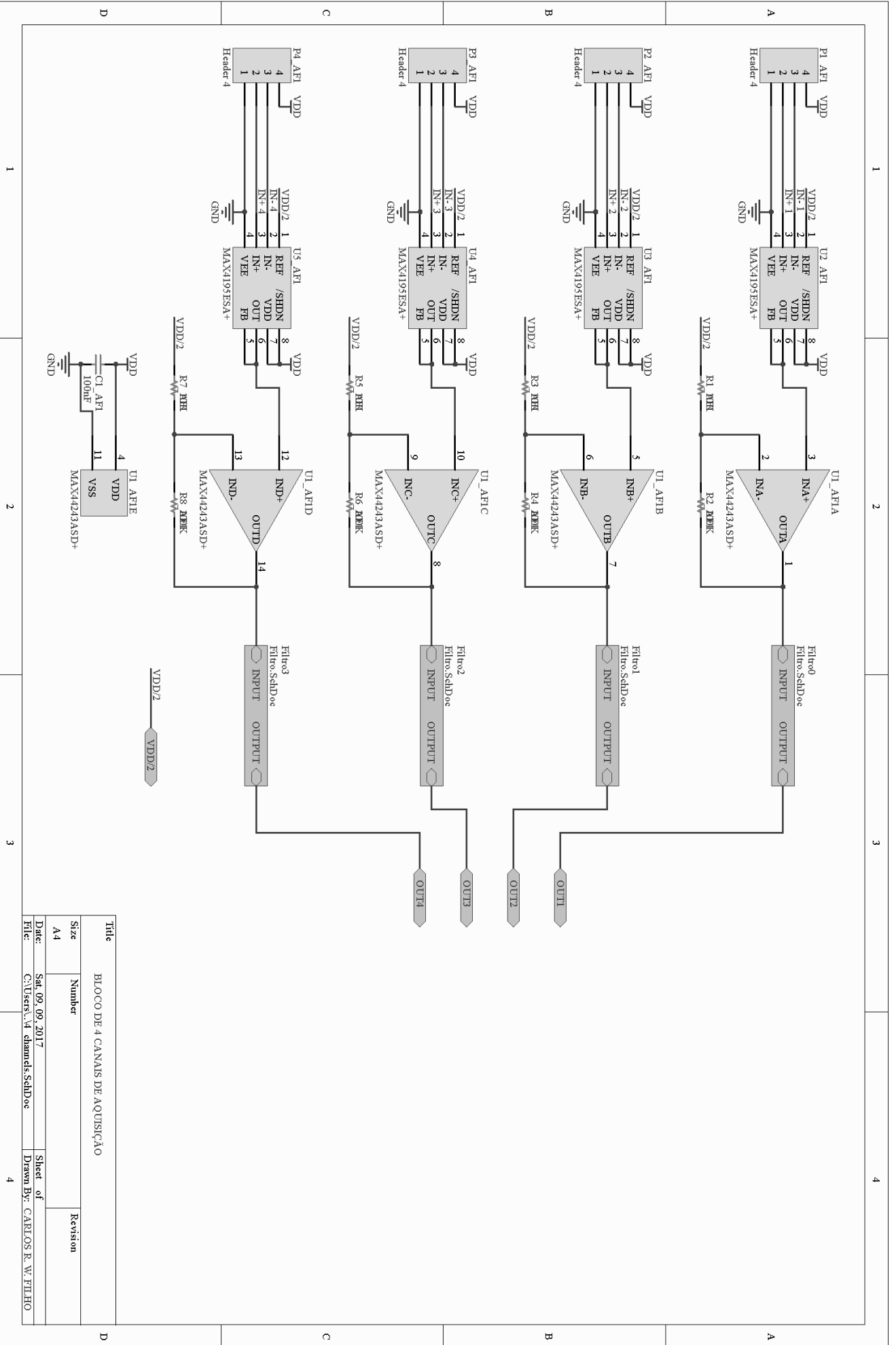
AGILENT TECHNOLOGIES. **PRACTICAL STRAIN GAGE MEASUREMENTS**. Application note 290-1. 1999. Disponível em: https://www.omega.com/techref/pdf/StrainGage_Measurement.pdf

KRAFTAUFNEHMER, A. **FORCE TRANSDUCERS BASED ON STRAIN GAGES**. HBM TEST AND MEASUREMENT. Disponível em: https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/files/technical-articles-technotes-white-papers/A_Kraftaufnehmer_in_en_LS_K.pdf

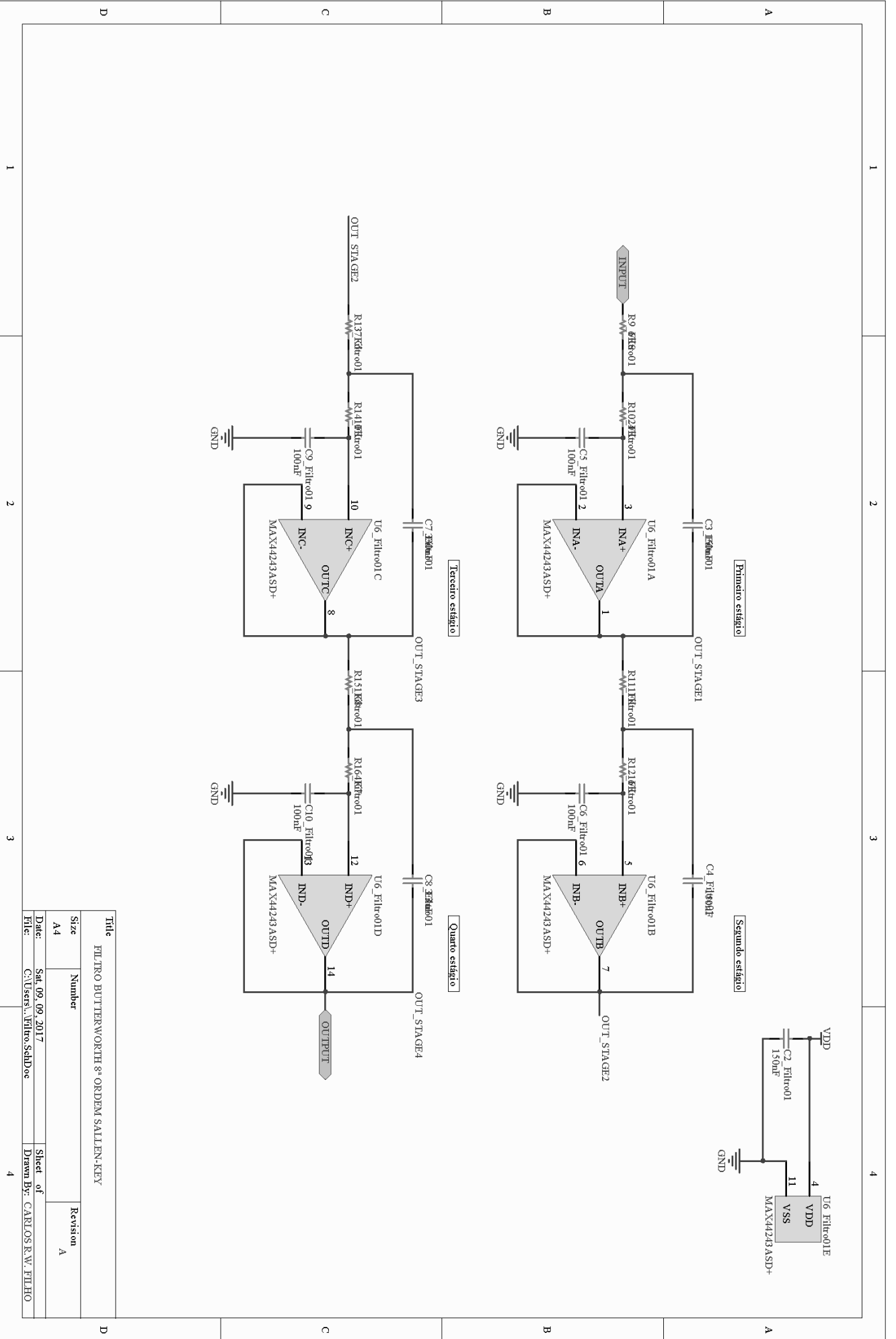
OMEGA ENGINEERING. **POSITIONING STRAIN GAGES TO MONITOR BENDING, AXIAL, SHEAR, AND TORSIONAL LOADS**. Disponível em: <https://www.omega.com/faq/pressure/pdf/positioning.pdf>

GITTINS, N. **A SHORT GUIDE TO STRAIN GAGING METHODS**. HBM TEST AND MEASUREMENT. Disponível em: http://www.disensors.com/downloads/products/Strain%20Gauge%20Installation%20Methods%20-%20Short%20Guide_786.pdf

**ANEXO I – Esquemáticos do Circuito Condicionador
para Ponte de Wheatstone com Quatro Extensômetros –
Etapa Analógica**



Title		BLOCO DE 4 CANAIS DE AQUISIÇÃO	
Size	Number	Revision	
A4			
Date:	Sat, 09. 09. 2017	Sheet of	
File:	C:\Users\...A\chamels_SchD'oc	Drawn By:	CARLOS R. W. FILHO



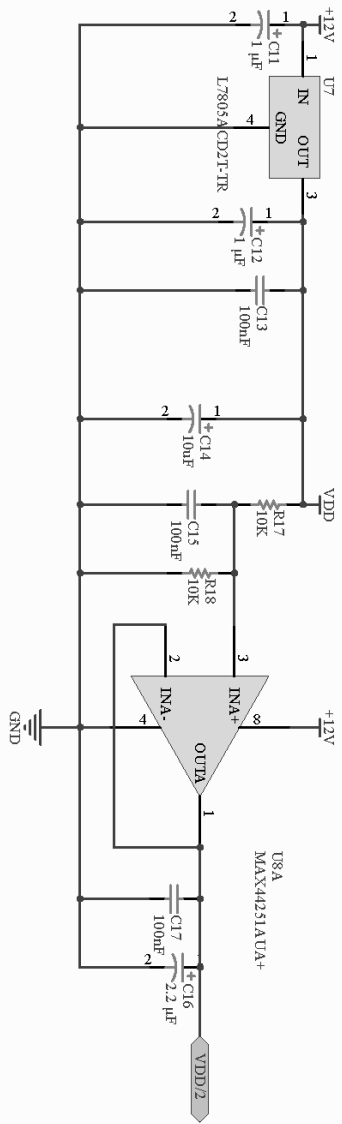
Title		FILTRO BUTTERWORTH 8° ORDENEM SALLEN-KEY	
Size	Number	Revision	
A4		A	
Date:	Sat 09_09_2017	Sheet of	
File:	C:\Users\... \Filhos_SchDoc	Drawn By: CARLOS R.W. FILHO	

1

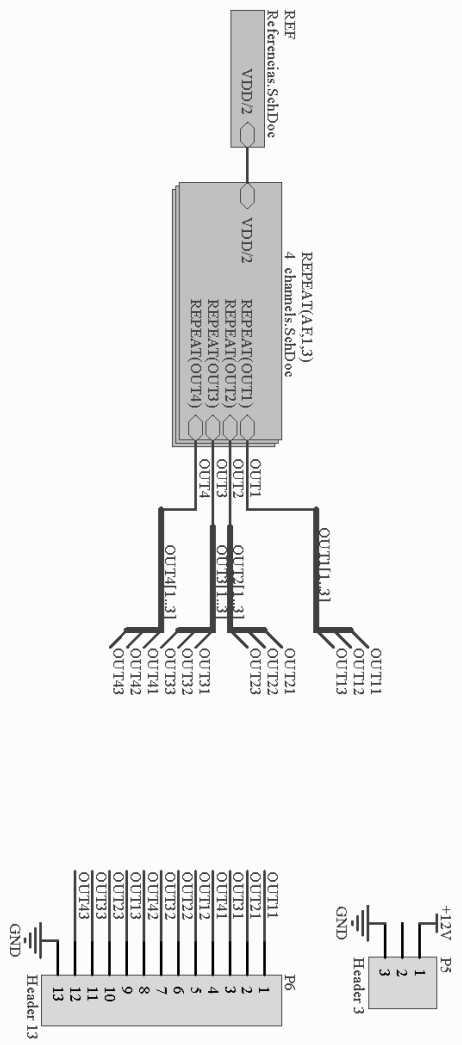
2

3

4

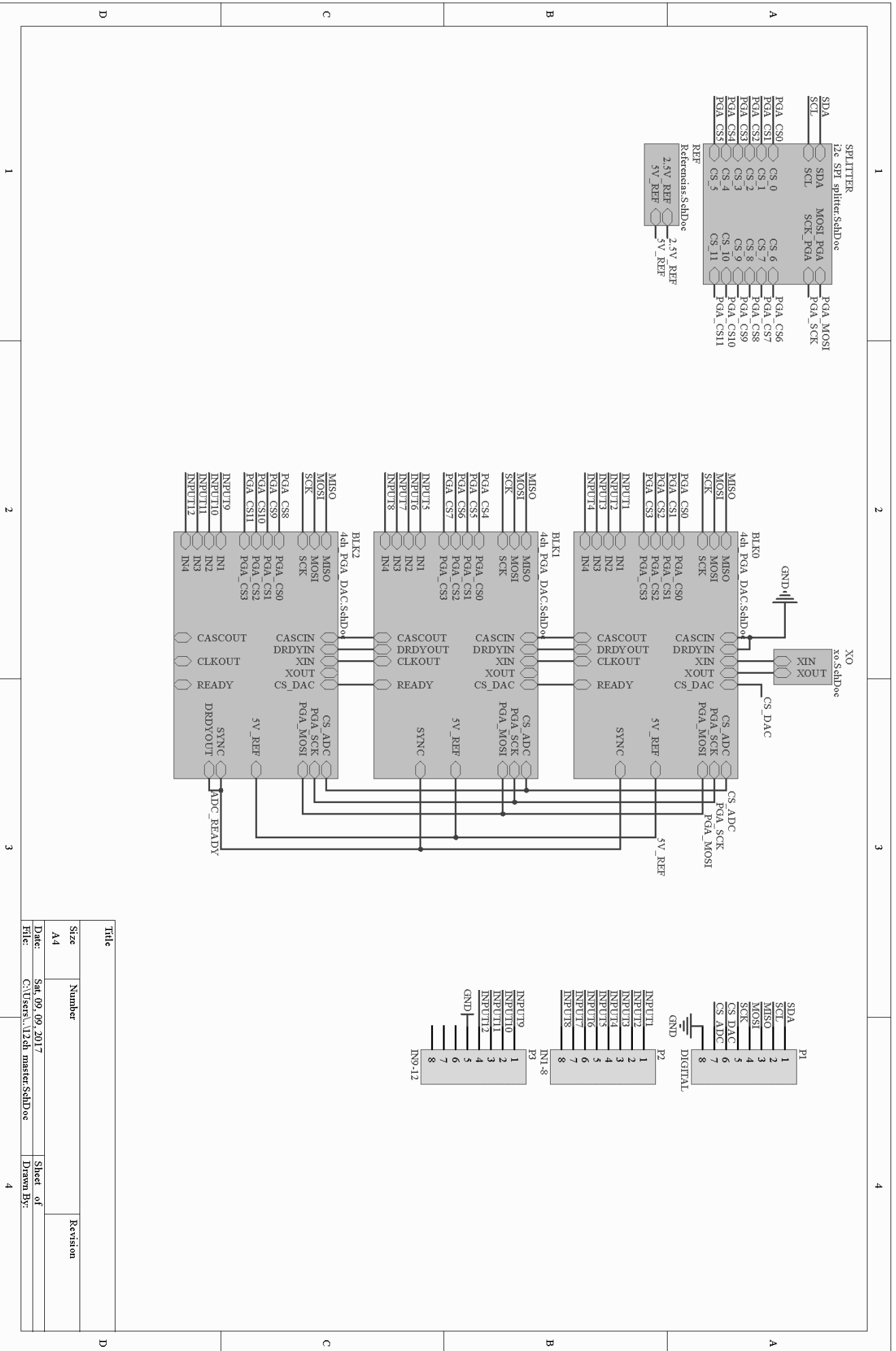


Title		Number		Revision	
Size A4		Date: Sat 09 09 2017		Sheet of Drawn By:	
File: C:\Users\... \Reterenias;SahDoe				4	

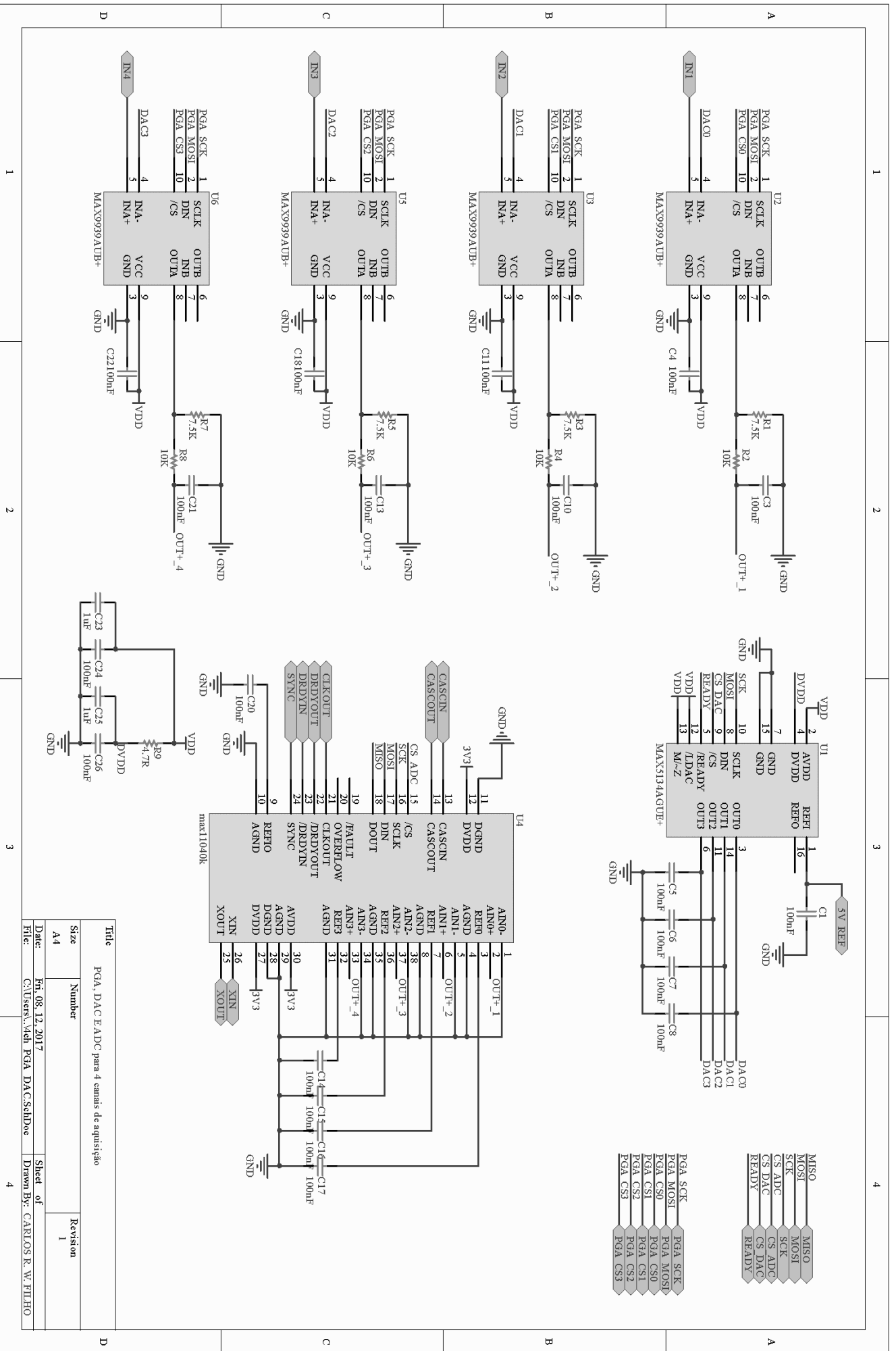


Title		Revision	
Size	Number		
A4			
Date:	Sat, 09. 09. 2017	Sheet of	
File:	C:\Users\12ch master\SchDoc	Drawn By:	

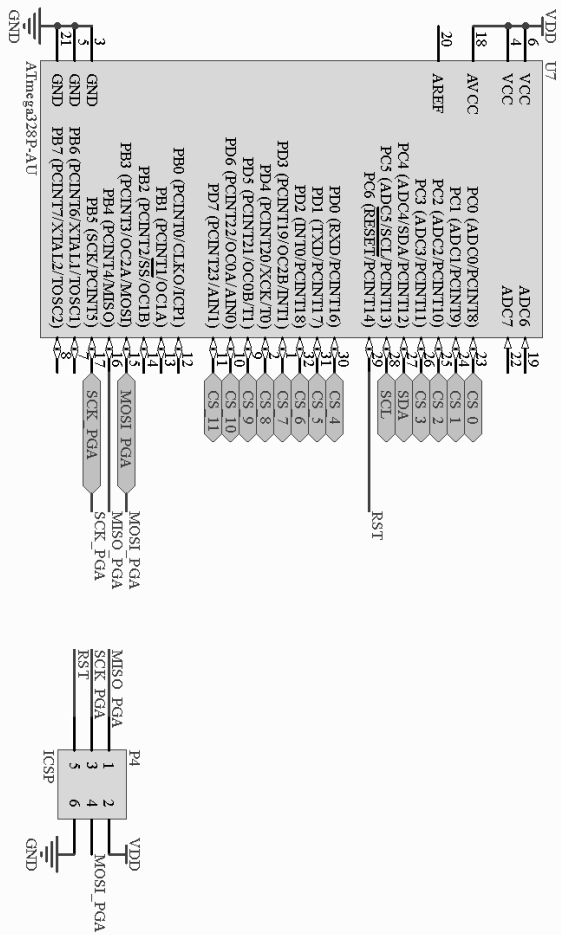
**ANEXO II – Esquemáticos do Circuito Condicionador para
Ponte de Wheatstone com Quatro Extensômetros – Etapa
Digital**



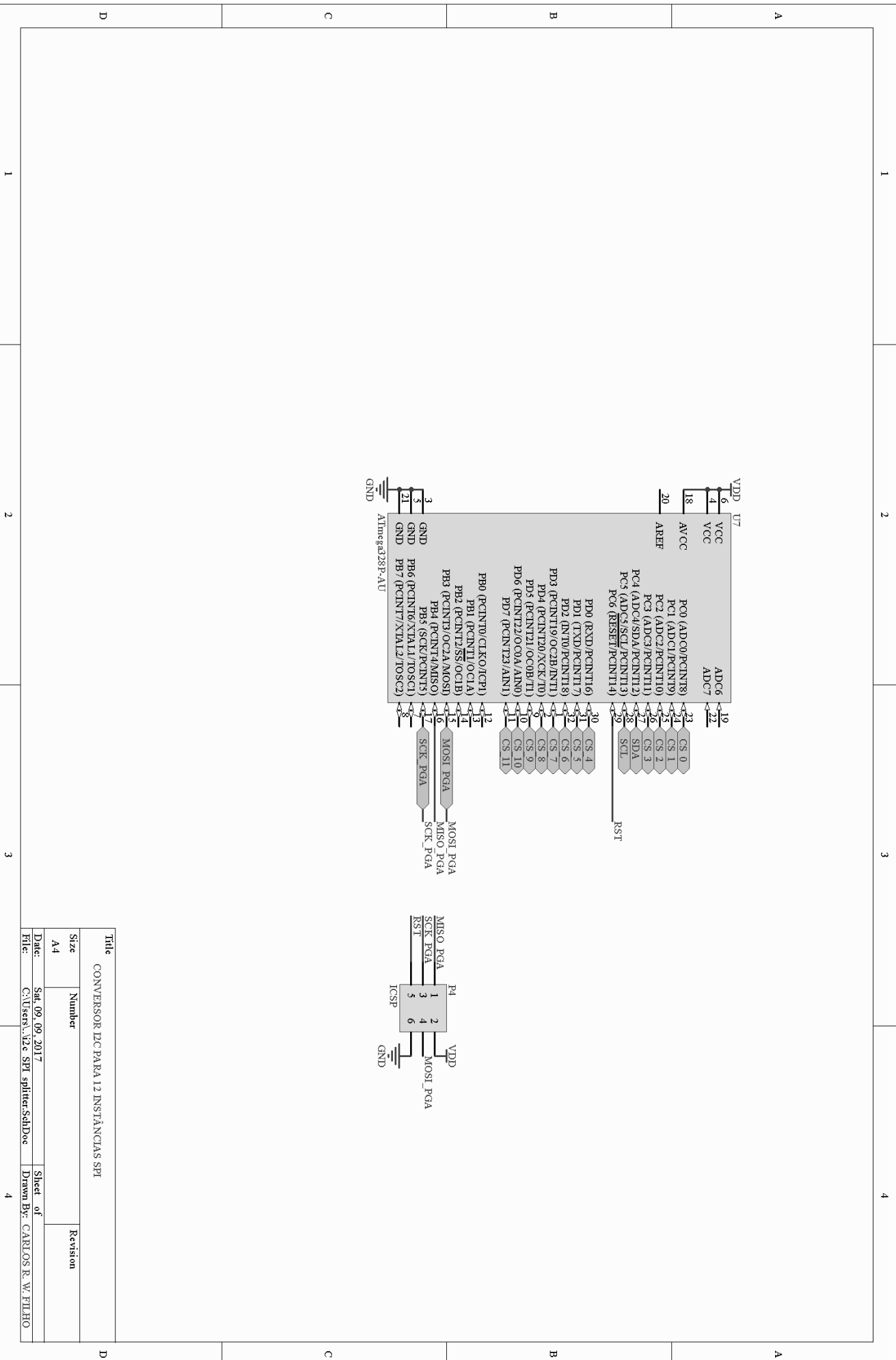
Title		Revision	
Size	Number	Sheet of	
A4		12	
Date:	Sat, 09_09_2017	Drawn By:	
File:	C:\Users\12e\master:SchDoe		

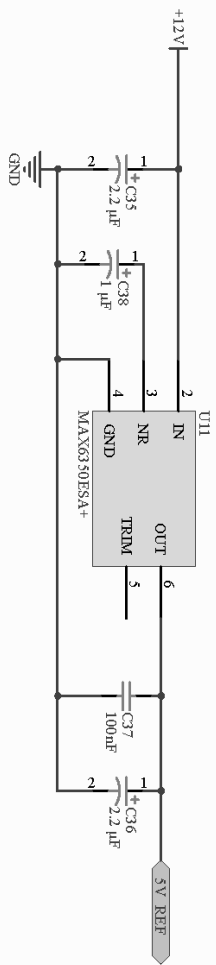
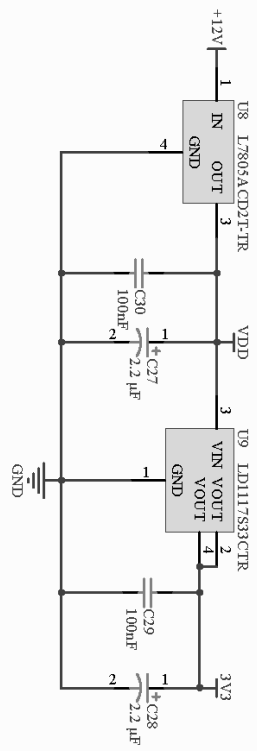


Title		PGA, DAC E ADC para 4 canais de aquisição	
Size	Number	Revision	
A4		1	
Date:	File:	Sheet of	Drawn By:
08.12.2017	C:\Users\Adeh\PGA DACSchDoc	4	CARLOS R. W. FILHO

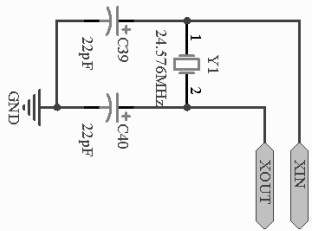


Title		CONVERSOR D/C PARA I2 INSTANCIAS SPI	
Size	Number	Revision	
A4			
Date:	Sat, 09, 09, 2017	Sheet of	
File:	C:\Users\... \2c spi splitter.schDoc	Drawn By: CARLOS R. W. FILHO	





Title		Revision	
Size	Number		
A4			
Date:	Sat. 09. 09. 2017	Sheet of	
File:	C:\Users\Referencas\SchDoc	Drawn By:	



Title		Number		Revision	
Size	A4				
Date:	Sat, 09_09_2017			Sheet of	
Title:	C:\Users\...xoi\ShdDoc			Drawn By:	

1

2

3

4

A B C D

1

2

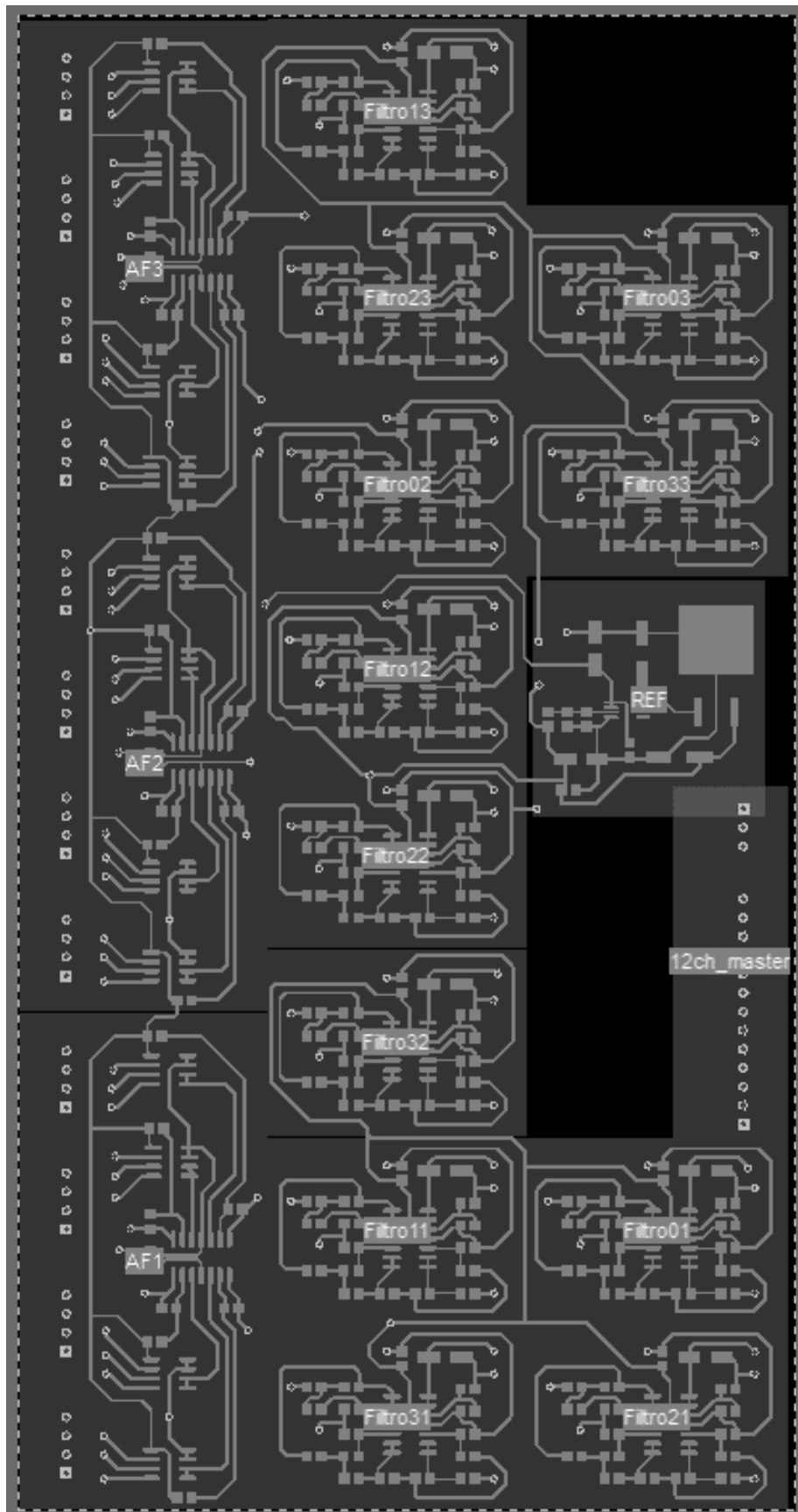
3

4

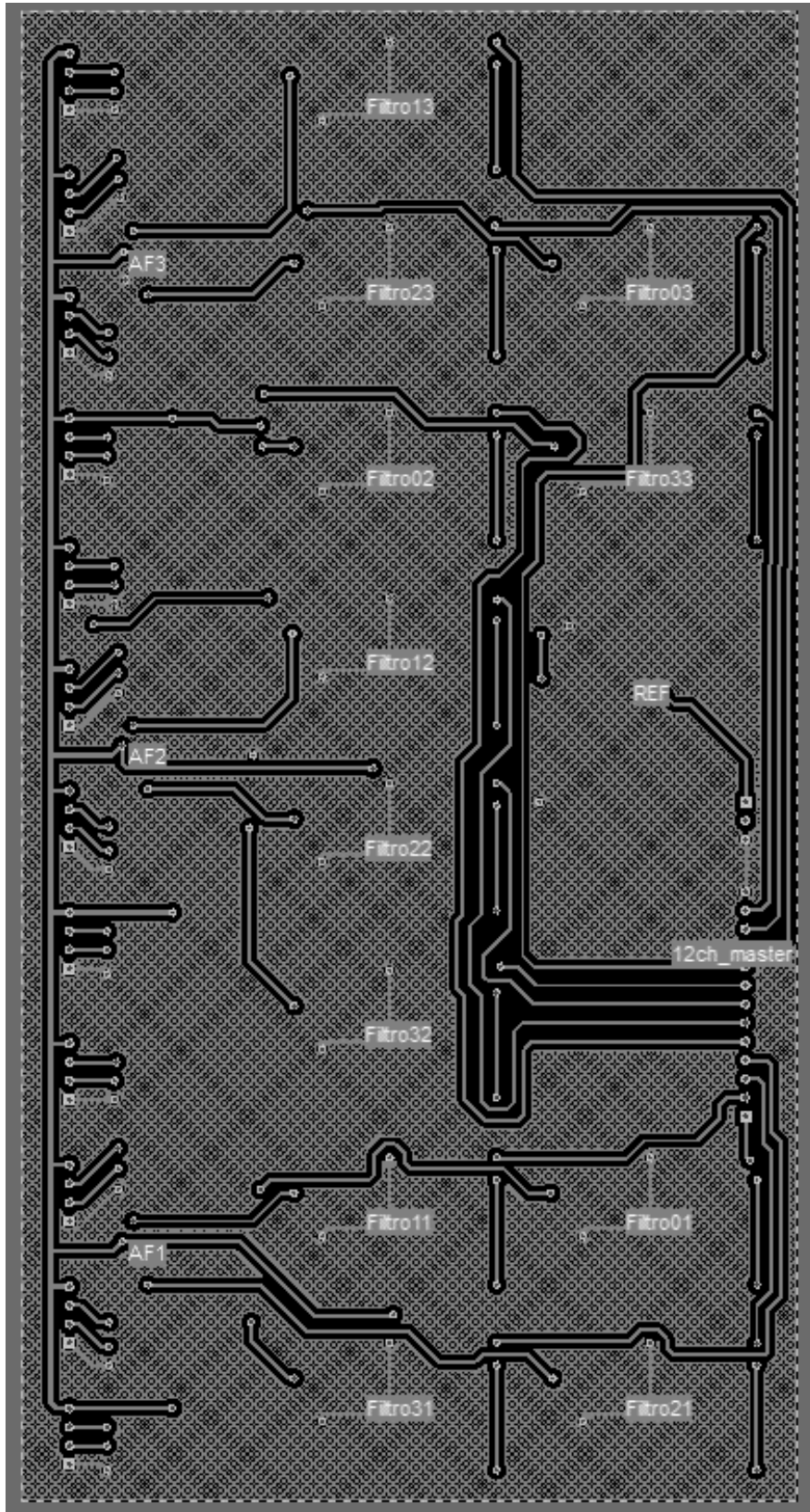
A B C D

ANEXO III – *Layouts* das placas de circuito impresso do sistema de condicionamento de sinais

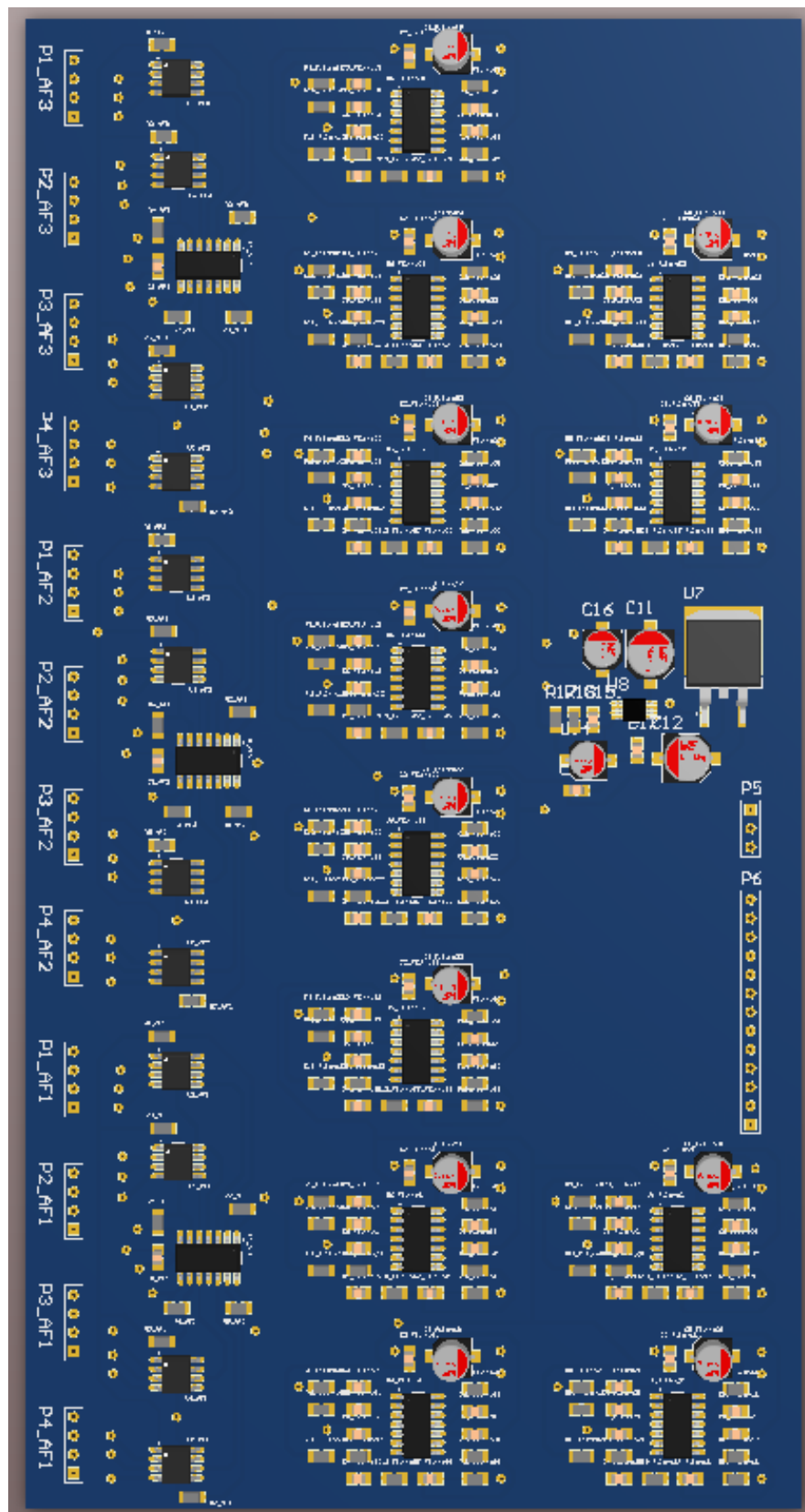
Layout da face superior da placa de circuito impresso da etapa analógica de condicionamento



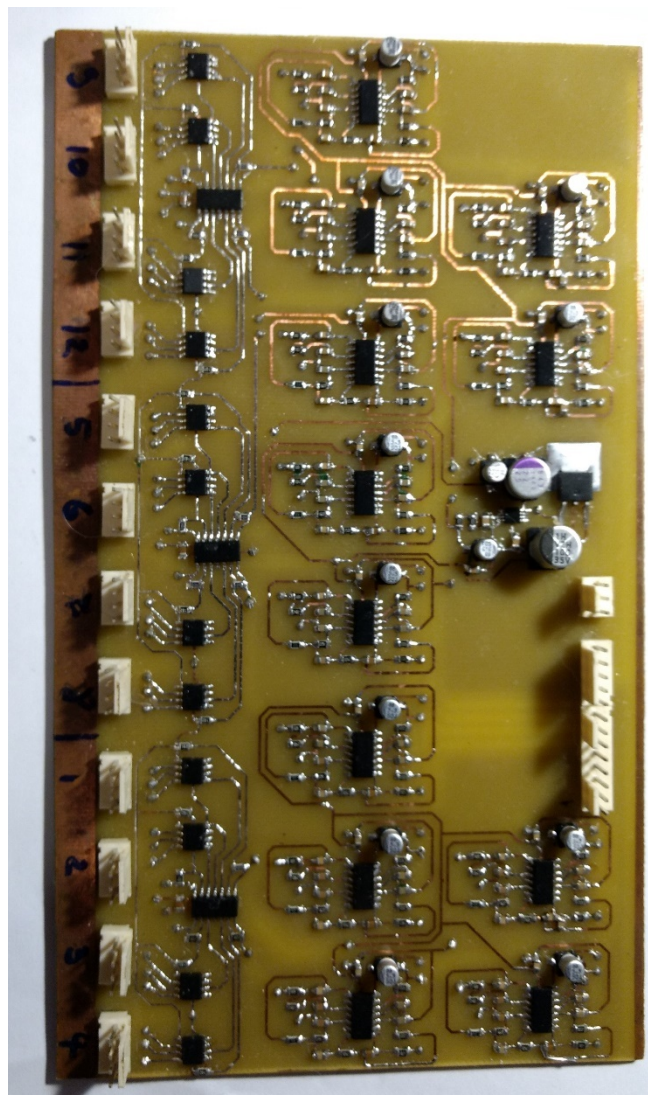
Layout da face inferior da placa de circuito impresso da etapa analógica de condicionamento



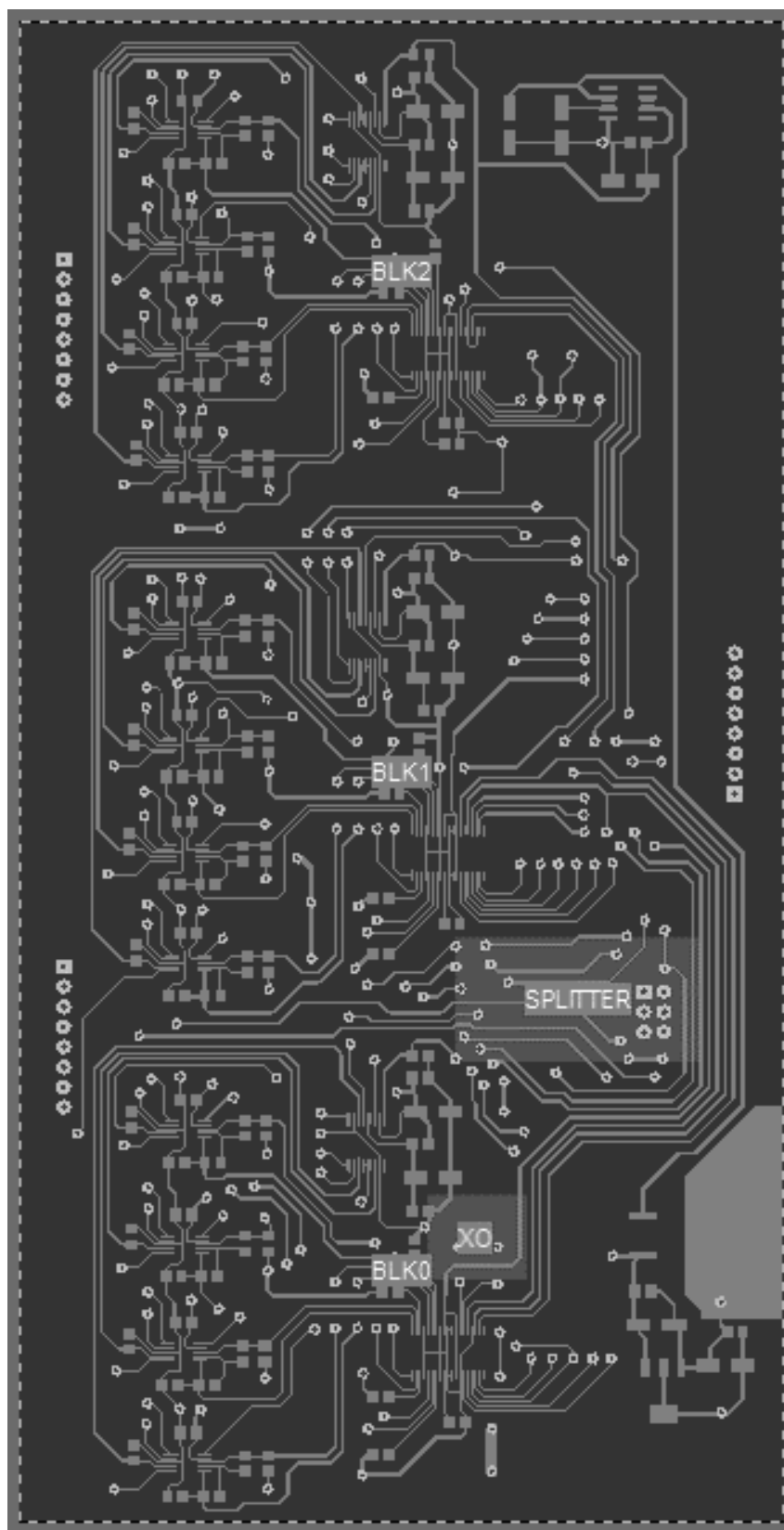
Modelo 3D da placa de circuito impresso da etapa analógica de condicionamento



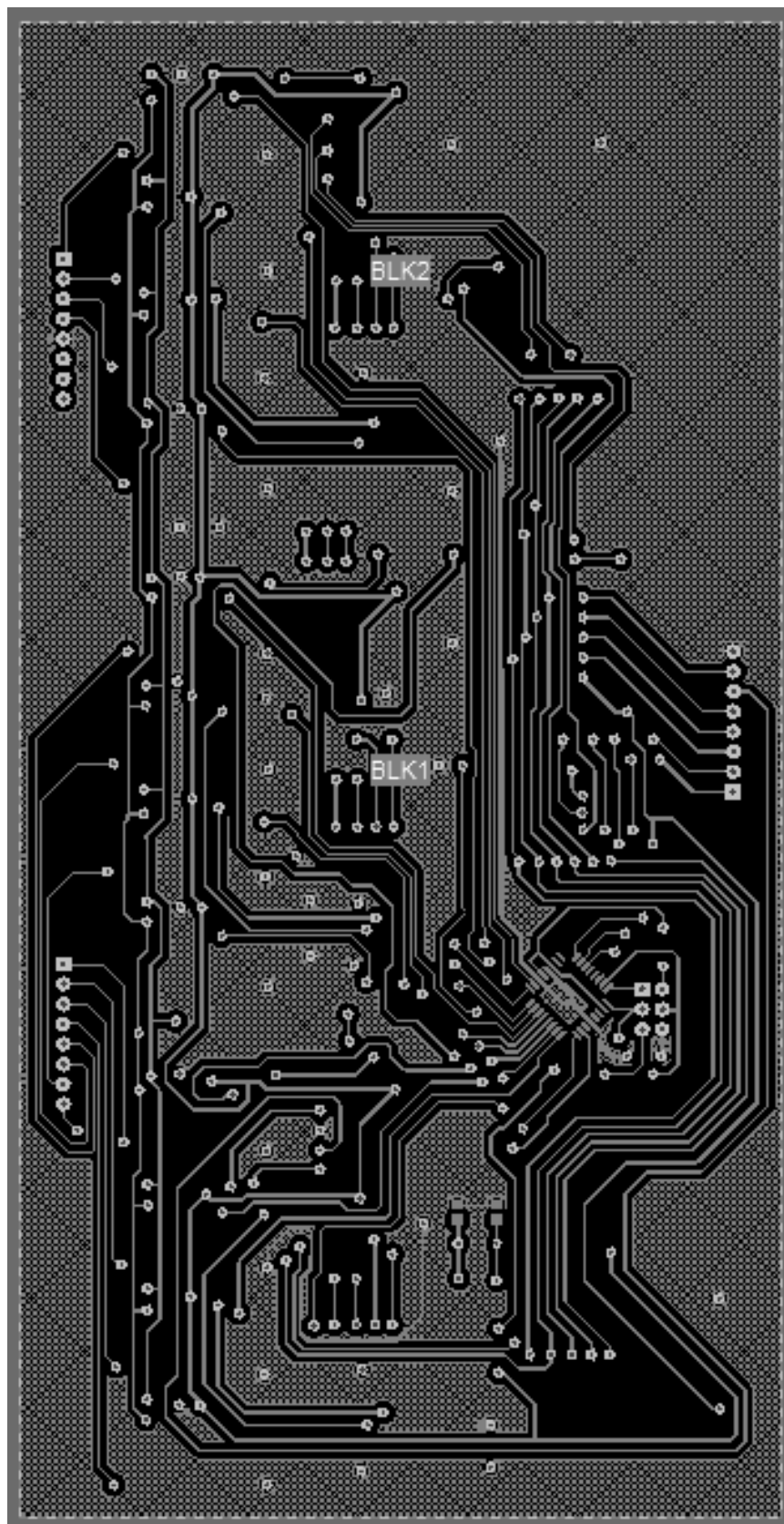
Fotografia da face superior da placa de circuito impresso da etapa analógica de condicionamento

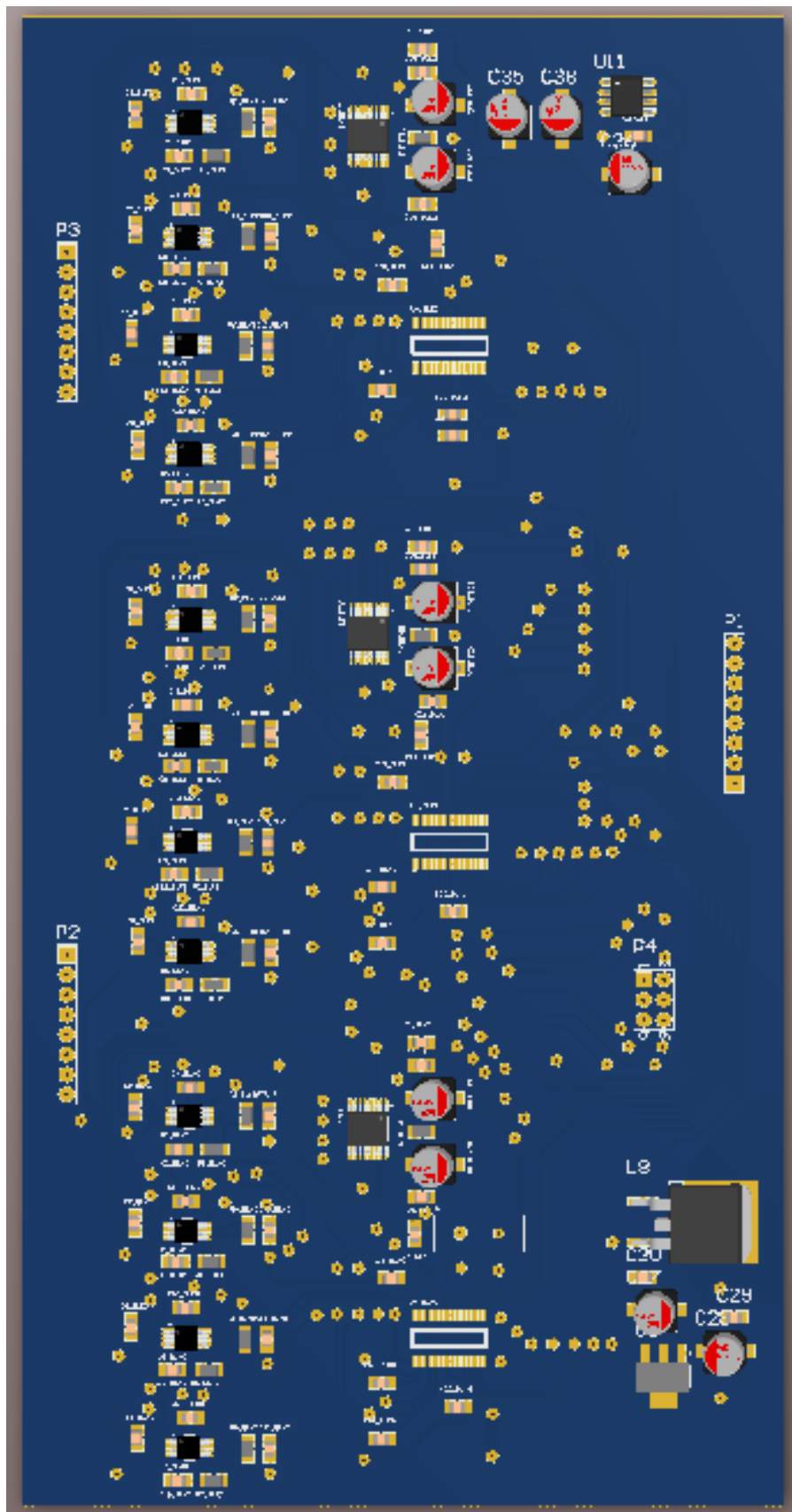


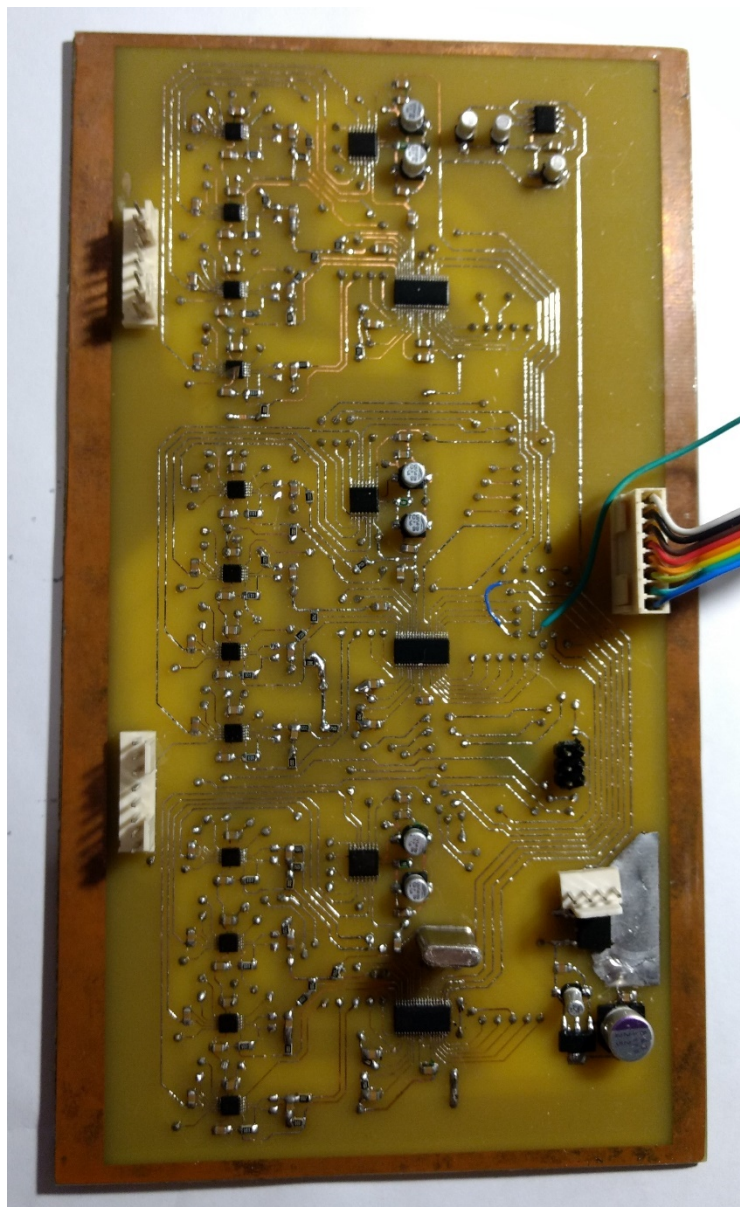
Layout da face superior da placa de circuito impresso da etapa digital de condicionamento



Layout da face inferior da placa de circuito impresso da etapa digital de condicionamento



Modelo 3D da placa de circuito impresso da etapa digital de condicionamento

Fotografia da placa de circuito impresso da etapa digital de condicionamento

ANEXO IV – Rotinas em Python 2.7 para aquisição de dados

Arquivo: autosest.py

```
001 import spidev
002 import time
003 import RPi.GPIO as GPIO
004 import smbus
005 GPIO.setmode(GPIO.BCM)
006 GPIO.setup(25, GPIO.IN, pull_up_down=GPIO.PUD_OFF)
007
008 bus = smbus.SMBus(1)
009 DEVICE_ADDRESS = 0x3d #endereço do conversor i2c -> SPI
010
011 gain1 = 0x00<<1|0x01
012 gain10 = 0x01<<1|0x01
013 gain20 = 0x02<<1|0x01
014 gain30 = 0x03<<1|0x01
015 gain40 = 0x04<<1|0x01
016 gain60 = 0x05<<1|0x01
017 gain80 = 0x06<<1|0x01
018 gain120 = 0x07<<1|0x01
019 gain157 = 0x08<<1|0x01
020 gain02 = 0x09<<1|0x01
021
022 #definições de endereço SPI dos PGAs
023 ch1 = 0x01
024 ch2 = 0x02
025 ch3 = 0x03
026 ch4 = 0x04
027 ch5 = 0x05
028 ch6 = 0x06
029 ch7 = 0x07
030 ch8 = 0x08
031 ch9 = 0x09
032 ch10 = 0x0a
033 ch11 = 0x0b
034 ch12 = 0x0c
035
036 def setPga(address, data): #função para ajuste do valor de ganho de um
PGA
037     bus.write_byte(DEVICE_ADDRESS, 0x23)
038     bus.write_byte(DEVICE_ADDRESS, 0x54)
039     bus.write_byte(DEVICE_ADDRESS, address)
040     bus.write_byte(DEVICE_ADDRESS, data+0x01)
041     bus.write_byte(DEVICE_ADDRESS, 0x0a)
042     bus.write_byte(DEVICE_ADDRESS, 0x0d)
043
044 spi = spidev.SpiDev()
045 spil = spidev.SpiDev()
046
047 NOP = 0xFF
048 WRITE_SICR = 0x40
049 WRITE_DRCCR = 0x50
050 WRITE_CFG = 0x60
051 READ_SICR = 0xC0
052 READ_DRCCR = 0xD0
053 READ_CFG = 0xE0
054 READ_DR = 0xF0
055
056 SHDN = 7
057 RST = 6
058 EN24BIT = 5
059 XTALEN = 4
```

```

060 FAULTDIS      = 3
061 PDBUF        = 2
062
063 ldac0 = [0x01, 0x01, 0x00, 0x01, 0x01, 0x00, 0x01, 0x01, 0x00]
064 ldac1 = [0x01, 0x02, 0x00, 0x01, 0x02, 0x00, 0x01, 0x02, 0x00]
065 ldac2 = [0x01, 0x04, 0x00, 0x01, 0x04, 0x00, 0x01, 0x04, 0x00]
066 ldac3 = [0x01, 0x08, 0x00, 0x01, 0x08, 0x00, 0x01, 0x08, 0x00]
067
068 def ncalc(voltage): #calcula o dado a ser enviado a um conversor D/A
para uma determinada saída em tensão
069     outBytes = [0,0]
070     n = int(round(voltage*65536/5))
071     outBytes[0]= (n>>8) & 0xff
072     outBytes[1] = n & 0xff
073     return outBytes
074
075 def twos_comp(val, bits): #calcula o complemento de dois
076     if (val & (1 << (bits - 1))) != 0:
077         val = val - (1 << bits)
078     return val
079
080 multiplier = 2.5
081 def calcCorr(reading):
082     return
[(multiplier*reading[0]),(multiplier*reading[1]),(multiplier*reading[2]),(m
ultiplier*reading[3]),(multiplier*reading[4]),(multiplier*reading[5]),(mult
iplier*reading[6]),(multiplier*reading[7]),(multiplier*reading[8]),(multipl
ier*reading[9]),(multiplier*reading[10]),(multiplier*reading[11])]
083
084 def calcChannels(received):
085     ch1int = ((received[1]<<16)|(received[2]<<8)|received[3])
086     ch2int = ((received[4]<<16)|(received[5]<<8)|received[6])
087     ch3int = ((received[7]<<16)|(received[7]<<8)|received[9])
088     ch4int = ((received[10]<<16)|(received[11]<<8)|received[12])
089     ch5int = ((received[13]<<16)|(received[14]<<8)|received[15])
090     ch6int = ((received[16]<<16)|(received[17]<<8)|received[18])
091     ch7int = ((received[19]<<16)|(received[20]<<8)|received[21])
092     ch8int = ((received[22]<<16)|(received[23]<<8)|received[24])
093     ch9int = ((received[25]<<16)|(received[26]<<8)|received[27])
094     ch10int = ((received[28]<<16)|(received[29]<<8)|received[30])
095     ch11int = ((received[31]<<16)|(received[32]<<8)|received[33])
096     ch12int = ((received[34]<<16)|(received[35]<<8)|received[36])
097     ch1 = twos_comp(ch1int,24)*2.2/8388608
098     ch2 = twos_comp(ch2int,24)*2.2/8388608
099     ch3 = twos_comp(ch3int,24)*2.2/8388608
100     ch4 = twos_comp(ch4int,24)*2.2/8388608
101     ch5 = twos_comp(ch5int,24)*2.2/8388608
102     ch6 = twos_comp(ch6int,24)*2.2/8388608
103     ch7 = twos_comp(ch7int,24)*2.2/8388608
104     ch8 = twos_comp(ch8int,24)*2.2/8388608
105     ch9 = twos_comp(ch9int,24)*2.2/8388608
106     ch10 = twos_comp(ch10int,24)*2.2/8388608
107     ch11 = twos_comp(ch11int,24)*2.2/8388608
108     ch12 = twos_comp(ch12int,24)*2.2/8388608
109     return [ch1, ch2, ch3, ch4, ch5, ch6, ch7, ch8, ch9, ch10, ch11,
ch12]
110
111
112 def setupADC(): #configura ADC
113     spi.xfer2([WRITE_CFG, 0x30])
114     spi.xfer2([WRITE_DRCCR, 0x25, 0xff])

```

```

115
116 def fetchData(): #captura dados do conversor A/D
117     receive = spi.xfer2([READ_DR,
118         0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,
119         0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,
120         0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00])
121     chn = calcCorr(calcChannels(receive))
122     return chn
123
124 #reseta o ganho de todos os PGAs para G=1
125 print 'resetting PGA gains...'
126 setPga(ch1, gain1)
127 time.sleep(0.05)
128 setPga(ch2, gain1)
129 time.sleep(0.05)
130 setPga(ch3, gain1)
131 time.sleep(0.05)
132 setPga(ch4, gain1)
133 time.sleep(0.05)
134 setPga(ch5, gain1)
135 time.sleep(0.05)
136 setPga(ch6, gain1)
137 time.sleep(0.05)
138 setPga(ch7, gain1)
139 time.sleep(0.05)
140 setPga(ch8, gain1)
141 time.sleep(0.05)
142 setPga(ch9, gain1)
143 time.sleep(0.05)
144 setPga(ch10, gain1)
145 time.sleep(0.05)
146 setPga(ch11, gain1)
147 time.sleep(0.05)
148 setPga(ch12, gain1)
149
150 #ajusta todos os conversores D/A para meia escala
151 res0 = [0x11,0x80,0x00,0x11,0x80,0x00,0x11,0x80,0x00]
152 res1 = [0x12,0x80,0x00,0x12,0x80,0x00,0x12,0x80,0x00]
153 res2 = [0x14,0x80,0x00,0x14,0x80,0x00,0x14,0x80,0x00]
154 res3 = [0x18,0x80,0x00,0x18,0x80,0x00,0x18,0x80,0x00]
155
156 spil.open(0,1)
157 spil.mode = 2
158 print 'resetting DAC channels' #atualiza valores dos registradores do
159 D/A
160 spil.xfer2(res0)
161 time.sleep(0.1)
162 spil.xfer2(res1)
163 time.sleep(0.1)
164 spil.xfer2(res2)
165 time.sleep(0.1)
166 spil.xfer2(res3)
167 time.sleep(0.1)
168 print 'resetting DAC outputs...' #envia comando para atualizar a tensão
169 de saída
170 spil.xfer2(ldac0)
171 time.sleep(0.1)
172 spil.xfer2(ldac1)
173 time.sleep(0.1)
174 spil.xfer2(ldac2)
175 time.sleep(0.1)

```

```

171 spi1.xfer2(ldac3)
172 time.sleep(0.1)
173
174 spi1.close()
175
176 time.sleep(1)
177
178 spi.open(0,0)
179 spi.mode = 2
180
181 setupADC()
182 fetchData()
183
184 acc = [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]
185
186 print 'aquiring data points...' #adquire 1000 amostras de todos os
canais a uma taxa de 40Hz
187 for i in range (0, 1000):
188     for j in range (0,12):
189         acc[j] += fetchData()[j]
190         time.sleep(0.025)
191
192 for k in range (0, 12):
193     acc[k] = acc[k]/1000
194
195 spi.close()
196
197 #pacotes com os valores de correção prontos a serem enviados aos
conversores D/A
198 update0 =
[0x11,ncalc(acc[0])[0],ncalc(acc[0])[1],0x11,ncalc(acc[4])[0],ncalc(acc[4])
[1],0x11,ncalc(acc[8])[0],ncalc(acc[8])[1]]
199 update1 =
[0x12,ncalc(acc[1])[0],ncalc(acc[1])[1],0x12,ncalc(acc[5])[0],ncalc(acc[5])
[1],0x12,ncalc(acc[9])[0],ncalc(acc[9])[1]]
200 update2 =
[0x14,ncalc(acc[2])[0],ncalc(acc[2])[1],0x14,ncalc(acc[6])[0],ncalc(acc[6])
[1],0x14,ncalc(acc[10])[0],ncalc(acc[10])[1]]
201 update3 =
[0x18,ncalc(acc[3])[0],ncalc(acc[3])[1],0x18,ncalc(acc[7])[0],ncalc(acc[7])
[1],0x18,ncalc(acc[11])[0],ncalc(acc[11])[1]]
202 ldac0 = [0x01, 0x01, 0x00, 0x01, 0x01, 0x00, 0x01, 0x01, 0x00]
203 ldac1 = [0x01, 0x02, 0x00, 0x01, 0x02, 0x00, 0x01, 0x02, 0x00]
204 ldac2 = [0x01, 0x04, 0x00, 0x01, 0x04, 0x00, 0x01, 0x04, 0x00]
205 ldac3 = [0x01, 0x08, 0x00, 0x01, 0x08, 0x00, 0x01, 0x08, 0x00]
206
207 print 'corrections:'
208 print ('ch1: ', acc[0])
209 print ('ch2: ', acc[1])
210 print ('ch3: ', acc[2])
211 print ('ch4: ', acc[3])
212 print ('ch5: ', acc[4])
213 print ('ch6: ', acc[5])
214 print ('ch7: ', acc[6])
215 print ('ch8: ', acc[7])
216 print ('ch9: ', acc[8])
217 print ('ch10: ', acc[9])
218 print ('ch11: ', acc[10])
219 print ('ch12: ', acc[11])
220
221 #atualiza valores dos conversores D/A

```

```

222 spil.open(0,1)
223 spil.mode = 2
224 print 'updating DAC channels...'
225 spil.xfer2(update0)
226 time.sleep(0.1)
227 spil.xfer2(update1)
228 time.sleep(0.1)
229 spil.xfer2(update2)
230 time.sleep(0.1)
231 spil.xfer2(update3)
232 time.sleep(0.1)
233 print 'loading DAC outputs...'
234 spil.xfer2(ldac0)
235 time.sleep(0.1)
236 spil.xfer2(ldac1)
237 time.sleep(0.1)
238 spil.xfer2(ldac2)
239 time.sleep(0.1)
240 spil.xfer2(ldac3)
241 time.sleep(0.1)
242
243 spil.close()

```

Arquivo: setPGA.py

```

01 import smbus
02 import time
03 bus = smbus.SMBus(1)
04 DEVICE_ADDRESS = 0x3d #endereço do conversor i2c -> SPI
05
06 gain1  = 0x00<<1|0x01
07 gain10 = 0x01<<1|0x01
08 gain20 = 0x02<<1|0x01
09 gain30 = 0x03<<1|0x01
10 gain40 = 0x04<<1|0x01
11 gain60 = 0x05<<1|0x01
12 gain80 = 0x06<<1|0x01
13 gain120 = 0x07<<1|0x01
14 gain157 = 0x08<<1|0x01
15 gain02 = 0x09<<1|0x01
16
17 #endereços dos PGAs no barramento SPI
18 ch1  = 0x01
19 ch2  = 0x02
20 ch3  = 0x03
21 ch4  = 0x04
22 ch5  = 0x05
23 ch6  = 0x06
24 ch7  = 0x07
25 ch8  = 0x08
26 ch9  = 0x09
27 ch10 = 0x0a
28 ch11 = 0x0b
29 ch12 = 0x0c
30
31 def setPga(address, data): #envia pacote de dados no barramento i2c
32     bus.write_byte(DEVICE_ADDRESS, 0x23)
33     bus.write_byte(DEVICE_ADDRESS, 0x54)
34     bus.write_byte(DEVICE_ADDRESS, address)

```

```

35         bus.write_byte(DEVICE_ADDRESS, data+0x01)
36         bus.write_byte(DEVICE_ADDRESS, 0x0a)
37         bus.write_byte(DEVICE_ADDRESS, 0x0d)
38
39 #ajusta o ganho dos PGAs
40 print 'setting PGA gains...'
41 setPga(ch1, gain10)
42 time.sleep(0.05)
43 setPga(ch2, gain10)
44 time.sleep(0.05)
45 setPga(ch3, gain10)
46 time.sleep(0.05)
47 setPga(ch4, gain10)
48 time.sleep(0.05)
49 setPga(ch5, gain10)
50 time.sleep(0.05)
51 setPga(ch6, gain10)
52 time.sleep(0.05)
53 setPga(ch7, gain10)
54 time.sleep(0.05)
55 setPga(ch8, gain10)
56 time.sleep(0.05)
57 setPga(ch9, gain10)
58 time.sleep(0.05)
59 setPga(ch10, gain10)
60 time.sleep(0.05)
61 setPga(ch11, gain10)
62 time.sleep(0.05)
63 setPga(ch12, gain10)
64 print 'gains set successfully'

```

Arquivo: cont_acquire.py

```

001 import spidev
002 import binascii
003 import time
004 import sys
005 import signal
006 import RPi.GPIO as GPIO
007
008 def signal_handler(signal, frame):
009     print('\\nYou pressed Ctrl+C!')
010     spi.close()
011     f.close()
012     sys.exit(0)
013
014 signal.signal(signal.SIGINT, signal_handler)
015
016 GPIO.setmode(GPIO.BCM)
017 GPIO.setup(25, GPIO.IN, pull_up_down=GPIO.PUD_OFF)
018
019 filename = sys.argv[1]+' .csv'
020
021 avg_count = 1 #numero de amostras para calculo de média
022
023 spi = spidev.SpiDev()
024
025 NOP          = 0xFF
026 WRITE_SICR  = 0x40

```

```

027 WRITE_DRCCR = 0x50
028 WRITE_CFG   = 0x60
029 READ_SICR   = 0xC0
030 READ_DRCCR  = 0xD0
031 READ_CFG    = 0xE0
032 READ_DR     = 0xF0
033
034 SHDN        = 7
035 RST         = 6
036 EN24BIT    = 5
037 XTALLEN    = 4
038 FAULTDIS   = 3
039 PDBUF      = 2
040
041 counter = 0
042 sumation = [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]
043
044 try: #tenta abrir arquivo, se não for possível, cria novo arquivo e
salva os dados
045     with open(('runlogs/'+filename)) as file:
046         file.close()
047         f = open(('runlogs/'+filename), "a+")
048
f.write(force+';'+str(acc[0])+';'+str(acc[1])+';'+str(acc[2])+';'+str(acc[3
])+';'+str(acc[4])+';'+str(acc[5])+';'+str(acc[6])+';'+str(acc[7])+';'+str(
acc[8])+';'+str(acc[9])+';'+str(acc[10])+';'+str(acc[11])+'\n')
049     print 'data saved'
050 except IOError as e:
051     print "Unable to open file, creating new one..."
052     f = open(('runlogs/'+filename),"w+")
053     f.write('"sep=";\n')
054     f.write('ch1;ch2;ch3;ch4;ch5;ch6;ch7;ch8;ch9;ch10;ch11;ch12\n')
055     print 'file created'
056
057
058 def my_callback(channel):
059     global counter
060     global sumation
061     if counter < avg_count:
062         data = fetchData()
063         for i in range (len(data)):
064             sumation[i] += data[i]
065         counter+=1
066     else:
067         counter = 0
068         for i in range (len(sumation)):
069             sumation[i]=sumation[i]/avg_count
070         print 'sum:'
071         print sumation
072
f.write(str(sumation[0])+';'+str(sumation[1])+';'+str(sumation[2])+';'+str(
sumation[3])+';'+str(sumation[4])+';'+str(sumation[5])+';'+str(sumation[6])
+';'+str(sumation[7])+';'+str(sumation[8])+';'+str(sumation[9])+';'+str(sum
ation[10])+';'+str(sumation[11])+'\n')
073     sumation = [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]
074     fetchData()
075
076 GPIO.add_event_detect(25, GPIO.FALLING, callback=my_callback) #ativa
evento na borda de descida do GPIO 25
077
078 def twos_comp(val, bits): #calcula complemento de dois

```



```

079     if (val & (1 << (bits - 1))) != 0:
080         val = val - (1 << bits)
081     return val
082
083
084 def calcChannels(received): #calcula valor inteiro da conversão AD
085     ch1int = ((received[1]<<16)|(received[2]<<8)|received[3])
086     ch2int = ((received[4]<<16)|(received[5]<<8)|received[6])
087     ch3int = ((received[7]<<16)|(received[7]<<8)|received[9])
088     ch4int = ((received[10]<<16)|(received[11]<<8)|received[12])
089     ch5int = ((received[13]<<16)|(received[14]<<8)|received[15])
090     ch6int = ((received[16]<<16)|(received[17]<<8)|received[18])
091     ch7int = ((received[19]<<16)|(received[20]<<8)|received[21])
092     ch8int = ((received[22]<<16)|(received[23]<<8)|received[24])
093     ch9int = ((received[25]<<16)|(received[26]<<8)|received[27])
094     ch10int = ((received[28]<<16)|(received[29]<<8)|received[30])
095     ch11int = ((received[31]<<16)|(received[32]<<8)|received[33])
096     ch12int = ((received[34]<<16)|(received[35]<<8)|received[36])
097     ch1 = twos_comp(ch1int,24)
098     ch2 = twos_comp(ch2int,24)
099     ch3 = twos_comp(ch3int,24)
100     ch4 = twos_comp(ch4int,24)
101     ch5 = twos_comp(ch5int,24)
102     ch6 = twos_comp(ch6int,24)
103     ch7 = twos_comp(ch7int,24)
104     ch8 = twos_comp(ch8int,24)
105     ch9 = twos_comp(ch9int,24)
106     ch10 = twos_comp(ch10int,24)
107     ch11 = twos_comp(ch11int,24)
108     ch12 = twos_comp(ch12int,24)
109     return [ch1, ch2, ch3, ch4, ch5, ch6, ch7, ch8, ch9, ch10, ch11,
110            ch12]
111
112 def setupADC():
113     spi.xfer2([WRITE_CFG, 0x38])
114     spi.xfer2([WRITE_DRCR, 0x40, 0x00]) #1kS/s
115
116 def fetchData():
117     receive = spi.xfer2([READ_DR,
118                        0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,
119                        0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,
120                        0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00])
121     chn = calcChannels(receive)
122     return chn
123
124
125 spi.open(0,0)
126 spi.mode = 2
127 spi.max_speed_hz = 10 #1MHz bus speed
128
129 setupADC()
130 fetchData()
131
132 print 'aquiring data points...'
133
134 signal.pause()
135
136 spi.close()
137 f.close()

```