

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
ENGENHARIA MECATRÔNICA

PEDRO CALORI BADINI

**MEDIÇÃO DO VOLUME DE COMBUSTÍVEL EM UM TANQUE
AUTOMOTIVO USANDO EXTENSÔMETROS**

SÃO CARLOS
2022

PEDRO CALORI BADINI

**MEDIÇÃO DO VOLUME DE COMBUSTÍVEL EM UM TANQUE
AUTOMOTIVO USANDO EXTENSÔMETROS**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Mecatrônica, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte do requisito para obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico.

Orientador: Prof. Dr. Leopoldo Pisanelli Rodrigues de Oliveira

SÃO CARLOS

2022

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

C136m Calori Badini, Pedro
Medição do Volume de Combustível em um Tanque
Automotivo Usando Extensômetros / Pedro Calori Badini;
orientador Leopoldo Pisanelli Rodrigues de Oliveira.
São Carlos, 2022.

Monografia (Graduação em Engenharia Mecatrônica)
-- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade
de São Paulo, 2022.

1. Extensômetro. 2. Aquisição de dados. 3.
Filtros. 4. Volume de combustível. I. Título.

FOLHA DE AVALIAÇÃO

Candidato: Pedro Calori Badini

Título:

MEDIÇÃO DO VOLUME DE COMBUSTÍVEL EM UM TANQUE
AUTOMOTIVO USANDO EXTENSÔMETROS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo
Curso de Engenharia Mecatrônica.

BANCA EXAMINADORA

Professor Dr. Leopoldo P.R. de Oliveira
(Orientador)

Nota atribuída: 9,5 (nove e cinco)



(assinatura)

Professor Dr. Flavio D. Marques

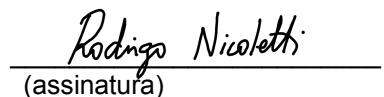
Nota atribuída: 9,5 (nove e cinco)



(assinatura)

Professor Dr. Rodrigo Nicoletti

Nota atribuída: 9,5 (nove e cinco)



(assinatura)

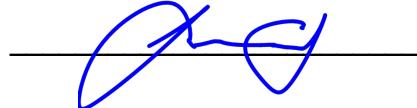
Média: 9,5 (nove e cinco)

Resultado: APROVADO

Data: 15 / 02 / 2022.

Este trabalho tem condições de ser hospedado no Portal Digital da Biblioteca da EESC

SIM NÃO Visto do orientador



DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho à minha família,
principalmente ao meu pai, minha mãe e
meu irmão.

RESUMO

BADINI, P. Medição do volume de combustível em um tanque automotivo utilizando extensômetro. 2022. 60f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecatrônica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

O trabalho tem como objetivo aplicar na prática conceitos estudados durante a graduação, como circuitos de conversão AD e aquisição de grandezas físicas. A fim de atingir isso, o projeto proposto consiste em desenvolver um sensor capaz de medir o volume de combustível de um tanque automotivo utilizando extensômetros. Para isso, foram desenvolvidos: um circuito para a amplificação dos extensômetros utilizando o amplificador instrumental INA125, um circuito de filtragem com filtros passa-baixa *anti-aliasing* e um firmware para a aquisição dos dados no microcontrolador ESP32. Todos os circuitos projetados tiveram seu esquemático e sua PCB desenhados no software de desenvolvimento eletrônico KiCAD e simulados no LTspice. Além disso, foi feita uma simulação de elementos finitos no software ANSYS do tubo no qual o tanque de combustível é fixo, que identificou os pontos de maior sensibilidade para a colagem dos extensômetros. Por fim, o circuito final foi testado através de uma simulação no LTspice, uma vez que não foi possível realizar os testes práticos devido à pandemia de COVID-19. Os dados de um sensor de nível de combustível semelhante ao projetado foram utilizados como entrada na simulação e a saída trouxe resultados satisfatórios.

Palavras-chave: Extensômetro. Aquisição de dados. Filtros. Volume de combustível.

ABSTRACT

BADINI, P. **Measurement of fuel level in an automotive tank using strain gauge.** 2022. 60f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecatrônica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

This work aims to put into practice concepts studied during graduation, such as AD conversion circuits and acquisition of physical quantities. In order to achieve this, the proposed project consists of the design of a sensor capable of measuring the fuel level in an automotive tank using strain gauges. For this, an amplification circuit for strain gauges using the INA125 instrument amplifier, a filtering circuit with anti-aliasing low-pass filters and a firmware for data acquisition in the ESP32 microcontroller were developed. All designed circuits had their schematic and PCB drawn in KiCAD electronic development software and simulated in LTspice. In addition, a finite element simulation was performed in the ANSYS software of the tube in which the fuel tank is fixed, which identified the points of greatest sensitivity for fixing the strain gauges. Finally, the final circuit was tested through a simulation on LTspice, since it was not possible to carry out the practical tests due to the COVID-19 pandemic. Data from a fuel level sensor like the one designed was used as input in the simulation and the output brought satisfactory results.

Keywords: Strain gauge. Data acquisition. filters. Fuel level.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Competição BAJA SAE Brasil	13
Figura 2 - Sensor de nível de combustível comercial	14
Figura 3 - Sensor de nível utilizado pela equipe EESC USP Baja SAE atualmente ..	15
Figura 4 – Extensômetro	17
Figura 5 - Direção de medição do extensômetro	20
Figura 6 - Divisor de tensão	21
Figura 7 - Ponte de Wheatstone	22
Figura 8 - Um quarto de ponte	24
Figura 9 - Meia ponte	25
Figura 10 - Meia ponte flexão	26
Figura 11 - Meia ponte tração	27
Figura 12 - Flexão ponte complete	28
Figura 13 - Torque ponte complete	28
Figura 14 - Amostragem de um sinal analógico	29
Figura 15 - Frequência zerada por aliasing	30
Figura 16 - Nova frequência gerada por aliasing	31
Figura 17 - Filtros analógicos passivos	32
Figura 18 - Tipos de filtros banda de passagem	33
Figura 19 - Filtro passa-baixa ativo	34
Figura 20 - Ordens filtros	35
Figura 21 - Tipos de resposta de filtros	36
Figura 22 - Esquemático INA125	39
Figura 23 - Esquemático controle de offset	39
Figura 24 - Esquemático INA125 LTspice	40
Figura 25 - Simulação circuito de amplificação	41
Figura 26 - Esquemático filtro Sallen-Key	42
Figura 27 - Simulação circuito de filtro	43
Figura 28 - First In First Out	44
Figura 29 - Layout PCB	45
Figura 30 - Modelo 3D da PCB	46
Figura 31 – Firebeetle	47
Figura 32 - Veículo Equipe EESC USP Baja SAE	48
Figura 33 - Tubo de fixação do tanque de combustível	49
Figura 34 - Modelo da simulação	49
Figura 35 - Deformação máxima do tubo	50

Figura 36 - Dados do sensor atual da equipe EESC USP Baja SAE	51
Figura 37 - Simulação do Filtro no LTspice	52
Figura 38 – Simulação com diferentes frequências de corte.....	53
Figura 39 - Comparação filtros analógico e digital	54

LISTA DE ABREVIATURAS

SG	Strain Gauge
AD	Analógico Digital

LISTA DE SIGLAS

SAE	Society of Automotive Engineers
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
USP	Capital Humano
PCB	Printed Circuit Board
GF	Gauge Factor
THT	Through Hole Technology

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 CONTEXTO	15
1.2 OBJETIVOS	16
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	17
2.1 EXTENSÔMETROS.....	17
2.1.1 Temperatura	18
2.1.2 Extensômetros Comerciais	19
2.2 PONTE DE WHEATSTONE	20
2.3 TAXA DE AMOSTRAGEM.....	29
2.3.1 Teorema de Nyquist-Shannon	30
2.4 FILTROS.....	31
2.4.1 Frequência de Corte	32
2.4.2 Banda de Passagem.....	32
2.4.3 Filtros Ativos	34
2.4.4 Ordem	35
2.4.5 Resposta em frequência	35
3 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	37
3.1 CIRCUITO DE AMPLIFICAÇÃO	38
3.2 CIRCUITO DE FILTRAGEM	41
3.3 FILTRO DIGITAL	44
3.4 PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO	45
4 MICROCONTROLADOR E FIRMWARE.....	47
5 SIMULAÇÃO DE ELEMENTOS FINITOS.....	48
6 RESULTADOS	51
7 CONCLUSÃO.....	55
8 REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

O programa Baja SAE Brasil é uma competição em que alunos de Engenharia de todo o Brasil têm a oportunidade de aplicar na prática os conhecimentos adquiridos na sala de aula. O objetivo dessa competição é projetar e construir um veículo *off-road* que seja capaz de cumprir provas dinâmicas e estáticas, incluindo uma corrida de 4 horas em uma pista indoor [1].

Figura 1 - Competição BAJA SAE Brasil



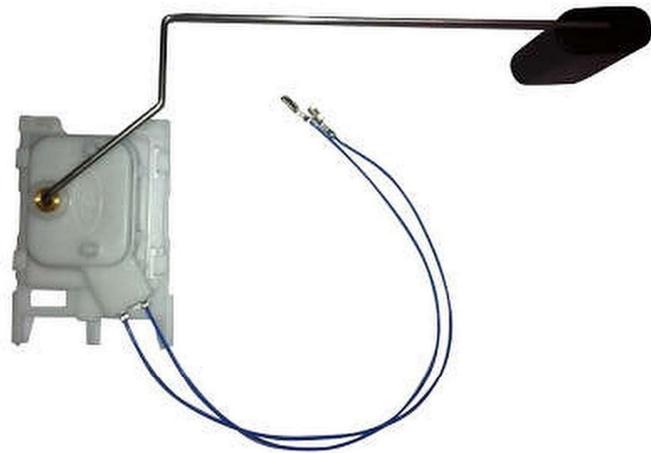
Fonte: Motormais – Disponível em: <http://motormais.com/baja-sae-brasil-2020-traz-novos-desafios-para-as-73-equipes-inscritas/>. Acesso em: 2 out. 2021.

Essa corrida de 4 horas de duração é conhecida como Enduro. Para ganhá-la é necessário completar o maior número de voltas dentro do tempo limite e sua vitória representa 40% dos pontos da competição. Um dos seus pontos críticos é o abastecimento, uma vez que a pane seca leva à desclassificação da corrida e cada parada para abastecer pode levar até 15 minutos, sendo necessárias até 3 paradas dependendo da estratégia da equipe. Porém, analisando o abastecimento, percebe-se que não é eficiente, uma vez que é realizado com o tanque ainda com 20% a 30% de sua capacidade. Isso acontece, pois, a decisão de encher o tanque é baseada

apenas no tempo em que o carro está ligado e não no volume de combustível restante.

Uma maneira de resolver esse problema é desenvolver um sensor que seja capaz de medir o volume de combustível no tanque de maneira precisa. Um dos principais desafios dessa implementação é a alta vibração presente no tanque, por se tratar de uma pista com o terreno acidentado. Outro requisito do projeto é adequar-se às regras da competição, que impendem o uso de sensores comerciais (Figura 2) já que não é permitida a saída ou entrada de cabos no tanque.

Figura 2 - Sensor de nível de combustível comercial

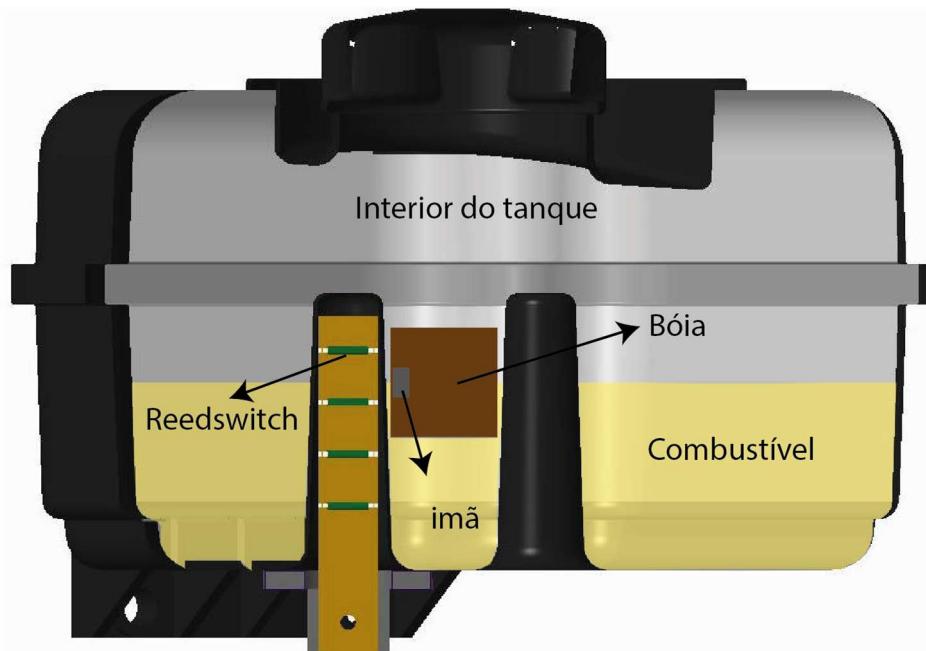


Fonte: TSA – Disponível em: <http://bd-sp.canaldapeca.com.br/TSA/24062019/tsacatalogo2019.pdf>. Acesso em: 2 out. 2021.

1.1 CONTEXTO

A Equipe EESC USP Baja SAE já possui um sistema de medição que se enquadra nas regras da competição BAJA SAE Brasil (Figura 3). Ele é composto por uma boia com um ímã, que flutua dentro do tanque de combustível, e uma placa eletrônica com *reed switches* no exterior do tanque, que representam níveis de combustível.

Figura 3 - Sensor de nível utilizado pela equipe EESC USP Baja SAE atualmente



Fonte: Autoria própria

O *reed switch* é um componente eletrônico normalmente aberto, que, na presença de um campo magnético, fecha seu contato. Assim, o ímã preso à boia aciona o *reed switch* no exterior do tanque, tornando possível determinar a quantidade de combustível no tanque.

Esse método de medição possui diversos problemas que o tornam impreciso e não confiável. Um dos principais problemas está relacionado à boia. Já foram notados casos em que a boia ficou presa e que perdeu sua flutuabilidade e, assim, passou a indicar valores errados. Além disso, a boia ocupa espaço que poderia ser usado para colocar mais combustível no tanque.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem o objetivo de desenvolver um sistema de aquisição do volume de combustível de um tanque automotivo que seja mais preciso e menos invasivo que o atual da equipe do estudo. Para isso, serão utilizados extensômetros colados à estrutura de suporte do tanque que detectarão variações no volume de combustível através da variação dos esforços na estrutura de suporte.

Os objetivos específicos são:

- Desenvolver placa PCB com circuito de amplificação e tratamento do sinal dos extensômetros.
- Desenvolver um programa para a aquisição dos dados em um microcontrolador embarcado.
- Simulação por elementos finitos para decisão de onde os extensômetros serão colados.

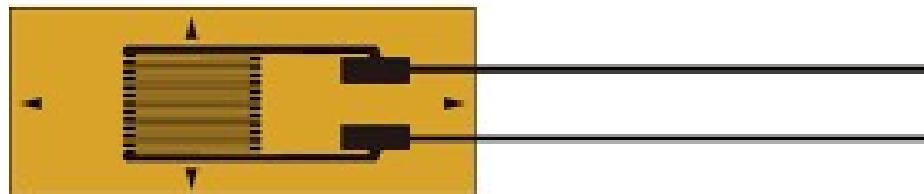
2 REVISÃO DA LITERATURA

Este trabalho tem o objetivo de desenvolver na prática conceitos estudados durante o curso de Engenharia Mecatrônica, como instrumentação de elementos mecânicos e a discretização de dados. A fim de fundamentar as decisões tomadas durante o desenvolvimento desse projeto, este tópico apresentará alguns dos conceitos que serviram de base para os resultados que serão apresentados.

2.1 EXTENSÔMETROS

Os extensômetros, ou *strain gauges*, são transdutores capazes de converter deformações mecânicas em mudanças de resistência elétrica.

Figura 4 – Extensômetro



Fonte: Althen Sensors – Disponível em: <https://www.althensensors.com/sensors/strain-sensors-strain-gauges/special-application-strain-gauges/4476/dsf-series-for-high-endurance-strain-gauges/>. Acesso em: 10 dez. 2021.

De maneira simplificada, o extensômetro é um fio de resistência elétrica conhecida, que é colado a uma estrutura da qual se deseja extrair dados de deformações. Devido à cola, toda deformação da peça é transferida para o extensômetro.

A Equação (2.1) descreve a resistência elétrica de um fio [2]:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad (2.1)$$

sendo ρ a resistividade elétrica do material, l e S representam, respectivamente, o comprimento do fio e sua área de seção transversal. Dessa maneira, conclui-se que a deformação da estrutura causa uma variação no comprimento do *strain gauge*, que altera sua resistência.

$$\Delta R = \frac{\rho \cdot \Delta l}{S} \quad (2.2)$$

É importante observar que a variação na resistência é muito pequena, uma vez que deformações não permanentes em metais estão na casa dos micrômetros.

Quando se trabalha com deformação de metais, é muito comum dividir a variação de comprimento pelo comprimento total, para chegar em equações que independam do comprimento total da peça ou do *strain gauge*. Assim, aplicando essa divisão na Eq. (2.2), têm-se:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\rho \cdot \epsilon}{S} \quad (2.3)$$

em que ϵ é a variação do comprimento dividido pelo comprimento total.

O *Gauge Factor* é o termo comercialmente usado para determinar a relação de deformação e variação na resistência de um extensômetro.

$$GF = \frac{\Delta R / R}{\epsilon} \quad (2.4)$$

2.1.1 Temperatura

Os *strain gauges* são muito sensíveis à temperatura, pois a deformação causada pela sua variação em metais é significativa quando comparada com a de esforços mecânicos. O aço SAE 1020, por exemplo, possui módulo de elasticidade de 205 GPa, tensão de escoamento de 210 MPa e coeficiente de dilatação térmica linear de $11 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. A tensão sobre uma peça que sofre esforços mecânicos pode ser descrita pela Equação (2.5) e a deformação específica causada pela variação de temperatura é descrita pela fórmula (2.6). Com isso, é possível determinar a variação

de temperatura que causa a mesma deformação no aço 1020 que aplicar uma tensão equivalente à metade do escoamento do material [3].

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (2.5)$$

$$\epsilon = T \cdot \alpha \quad (2.6)$$

Utilizando-se da Eq. (2.5) e os dados apresentados acima:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = 5,1 \times 10^{-4} \quad (2.7)$$

Usando o valor de deformação obtido na Eq. (2.6):

$$T = \frac{\epsilon}{\alpha} = 46,6 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.8)$$

Esse cálculo mostra que pequenas variações de temperatura apresentam a mesma deformação que quantidades imensas de tensão aplicada na estrutura. Dessa forma, é necessário se atentar com a variação de temperatura da estrutura quando se deseja medir deformações mecânicas com extensômetros.

Existem métodos para anular o impacto da temperatura nesse tipo de medição, que serão explorados mais a frente nesse trabalho.

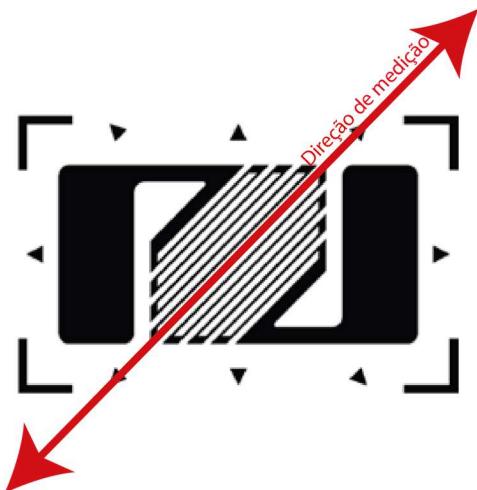
2.1.2 Extensômetros Comerciais

Os *strain gauges* atuais possuem diversas tecnologias que facilitam sua utilização. As principais características que devem ser notadas no momento da

escolha do sensor é seu tamanho, seu GF, o material para o qual é feito e a direção de deformação medida. Para conseguir compensar a deformação causada pela temperatura, os fabricantes constroem o extensômetro de maneira a deixá-lo com um coeficiente de dilatação térmico muito próximo ao do material para o qual foi feito.

Já a direção de medição é determinada pela direção da grade que compõe o sensor e pode ser vista na figura 5.

Figura 5 - Direção de medição do extensômetro

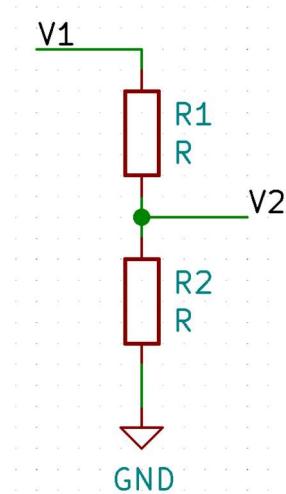


Fonte: Autoria própria

2.2 PONTE DE WHEATSTONE

Apesar do extensômetro converter a deformação mecânica em variação de resistência elétrica, para fazer a leitura desse dado por um conversor analógico-digital de um microcontrolador, ainda é necessário converter essa variação de resistência em variação de tensão. A maneira mais simples de converter variação de resistência em tensão é usando um divisor de tensão como o da figura 6.

Figura 6 - Divisor de tensão



Fonte: Autoria própria

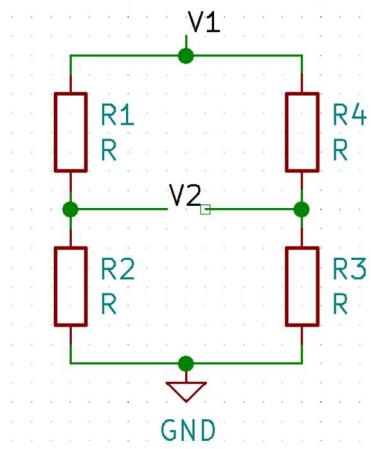
Nesse caso, supondo que R_1 seja o *strain gauge* e R_2 um resistor de valor fixo, a tensão V_2 é dada por:

$$V_2 = V_1 \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.9)$$

O problema desse método está ligado não somente à relação não linear de R_1 e V_2 , mas também à dificuldade em perceber pequenas variações em R_1 , uma vez que a tensão não é centrada em zero, tornando inviável amplificar o sinal.

A ponte de Wheatstone é um arranjo de resistores que resolve o problema observado acima, possibilitando a presença de uma tensão nula entre os terminais de V_2 (Figura 7).

Figura 7 - Ponte de Wheatstone



Fonte: Autoria própria

A tensão na saída da ponte (V_2) é dada pela fórmula:

$$V_2 = V_1 \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \quad (2.10)$$

Para aplicações de extensômetros é muito importante que a tensão em V_2 seja zero, pois permitirá a amplificação do sinal de saída. Quando isso acontece, diz-se que a ponte está balanceada.

A ponte é balanceada quando:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (2.11)$$

A fim de avaliar a resposta da tensão V_2 quando ocorrem pequenas variações nos resistores e de balancear a ponte, a Equação (2.12) será desenvolvida considerando o valor dos resistores iguais.

$$V_2 = V_1 \left(\frac{R_2 + \Delta R_2}{R_1 + R_2 + \Delta R_1 + \Delta R_2} - \frac{R_3 + \Delta R_3}{R_3 + R_4 + \Delta R_3 + \Delta R_4} \right) \quad (2.12)$$

Como $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$

$$V_2 = V_1 \left(\frac{R + \Delta R_2}{2R + \Delta R_1 + \Delta R_2} - \frac{R + \Delta R_3}{2R + \Delta R_3 + \Delta R_4} \right) \quad (2.13)$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{(R + \Delta R_2)(2R + \Delta R_3 + \Delta R_4) - (R + \Delta R_3)(2R + \Delta R_1 + \Delta R_2)}{(2R + \Delta R_1 + \Delta R_2)(2R + \Delta R_3 + \Delta R_4)} \quad (2.14)$$

Para aplicações de extensômetros, os valores de ΔR são muito pequenos, portanto, os termos que são produtos de $\Delta R \times \Delta R$ serão desconsiderados.

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{-R\Delta R_1 + R\Delta R_2 - R\Delta R_3 + R\Delta R_4}{4R^2 + 2R\Delta R_3 + 2R\Delta R_4 + 2R\Delta R_1 + 2R\Delta R_2} \quad (2.15)$$

Analizando mais criteriosamente o denominador, percebe-se que os termos que são multiplicados por ΔR são muito menores que o termo que possui R^2 , uma vez que para *strain gauges* a variação na resistência não passa de $10^{-3} \Omega$ [2]. Portanto, ignorá-los não trará impactos significativos para o valor de saída da ponte. Desse modo, temos:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{-R\Delta R_1 + R\Delta R_2 - R\Delta R_3 + R\Delta R_4}{4R^2} \quad (2.16)$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{-\Delta R_1 + \Delta R_2 - \Delta R_3 + \Delta R_4}{4R} \quad (2.17)$$

Utilizando a Eq. (2.4) obtém-se seguinte relação entre a tensão de saída da ponte (V_2) e a deformação dos *strain gauges*:

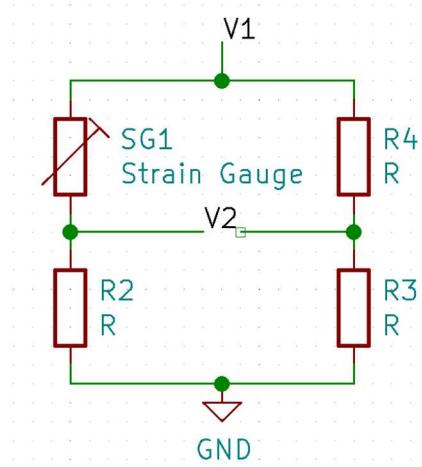
$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{GF}{4} (-\epsilon_1 + \epsilon_2 - \epsilon_3 + \epsilon_4) \quad (2.18)$$

Os cálculos anteriores foram feitos considerando que os quatro resistores da ponte de Wheatstone fossem extensômetros. O uso de 4 *strain gauges* trazem algumas vantagens como o aumento da sensibilidade do sensor à deformação. Porém é possível substituir alguns por resistores de valores fixos, reduzindo, assim, o custo

da instrumentação. A seguir serão apresentadas algumas das configurações possíveis e suas características.

2.2.1.1 Um quarto de ponte

Figura 8 - Um quarto de ponte



Fonte: Autoria própria

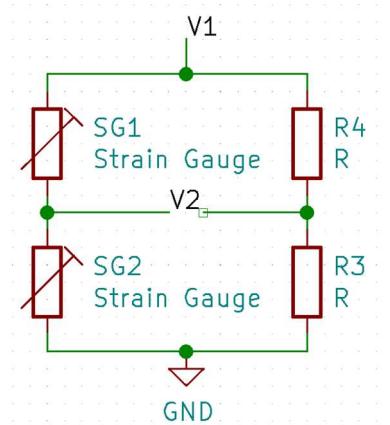
A configuração de um quarto de ponte se dá quando apenas um extensômetro é utilizado numa das posições da ponte. Essa é a configuração mais simples, sua vantagem principal é o custo, mas perde em sensibilidade, atingindo apenas um quarto da sensibilidade total que pode ser atingida com uma ponte completa.

A tensão V_2 é dada por:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{-GF \cdot \epsilon_1}{4} \quad (2.19)$$

2.2.1.2 Meia ponte

Figura 9 - Meia ponte



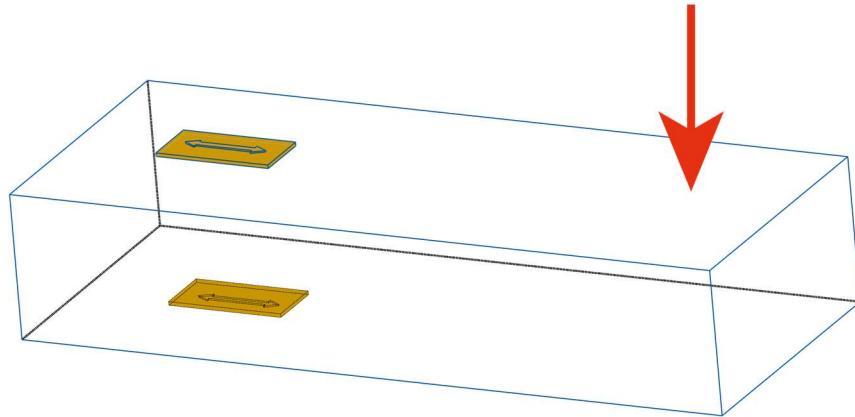
Fonte: Autoria própria

Quando dois resistores adjacentes da ponte são extensômetros, tem-se a configuração de meia ponte. A fórmula que descreve a tensão de saída da ponte com relação à deformação dos *strain gauges* é:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{GF}{4} (-\epsilon_1 + \epsilon_2) \quad (2.20)$$

É importante perceber que a deformação que ocorre em 1 deve ter sentido oposto à que acontece em 2, para que seus valores se somem e resultem numa sensibilidade maior que 1. A sensibilidade resultante depende de como os *strain gauges* vão ser colados e de que tipo de força será aplicada na estrutura.

Figura 10 - Meia ponte flexão



Fonte: Autoria própria

No caso da figura 10, os strain gauges estão colados de tal maneira que quando a barra sofre uma flexão, o primeiro extensômetro sofrerá uma tração e o segundo extensômetro sofrerá uma compressão de igual intensidade. Desse modo, as deformações serão de mesma intensidade, porém em direções opostas. Substituindo $\epsilon_2 = -\epsilon_1$ na Eq. (2.20), temos:

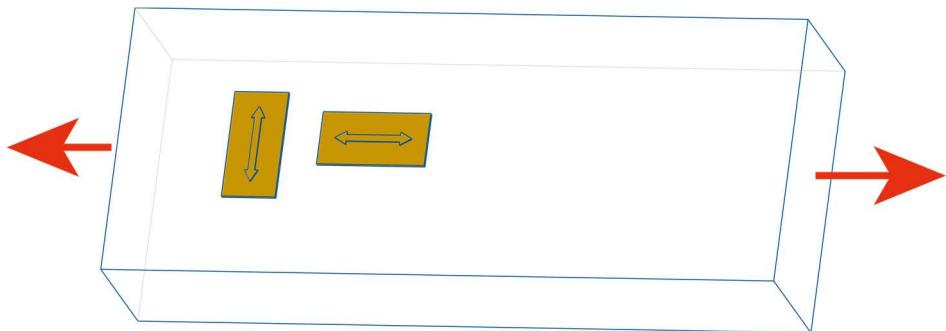
$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{GF \cdot \epsilon_2}{2} \quad (2.21)$$

Chegando, assim, numa sensibilidade duas vezes maior que o caso da configuração de um quarto de ponte.

É importante notar que apesar de dobrar a sensibilidade para o caso de flexão, para o caso de tração a sensibilidade cai para zero, uma vez que as deformações nos *strain gauges* seriam na mesma direção e mesma intensidade, cancelando-se.

Se o objetivo for medir compressão e tração, os extensômetros devem ser colados da seguinte maneira:

Figura 11 - Meia ponte tração



Fonte: Autoria própria

Assim, quando o SG1 for tracionado, o SG2 sofrerá do efeito de Poisson e será comprimido proporcionalmente à tração sofrida pela estrutura. No caso de metais, o valor de Poisson é por volta de 0,3 [3], portanto essa configuração tem uma sensibilidade de 1,3 vezes a de um quarto de ponte.

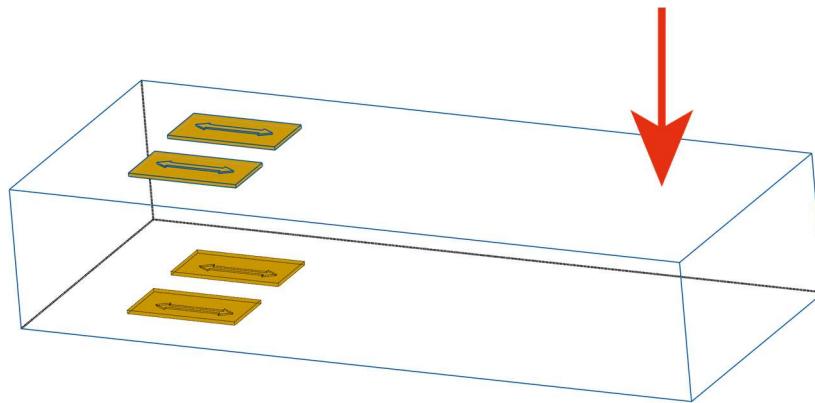
Um grande ponto positivo de configurações com mais de um extensômetro é compensação das deformações relacionadas à temperatura. Isso acontece porque os todos extensômetros sofrerão a mesma deformação por temperatura, cancelando-se.

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{GF}{4} (-(\epsilon_1 + \epsilon_T) + (\epsilon_2 + \epsilon_T)) = \frac{GF}{4} (-\epsilon_1 + \epsilon_2) \quad (2.22)$$

2.2.1.3 Ponte completa

Quando todos os resistores da ponte são extensômetros, tem-se a ponte completa. Essa é a configuração mais cara, pois necessita de quatro *strain gauges* para medir apenas um dado de deformação, porém também é a que atinge a maior sensibilidade, sendo capaz de quadriplicar a sensibilidade do sensor com relação a usar apenas um extensômetro. Além disso, continua com a vantagem de compensar deformações causadas por temperatura.

Figura 12 - Flexão ponte complete



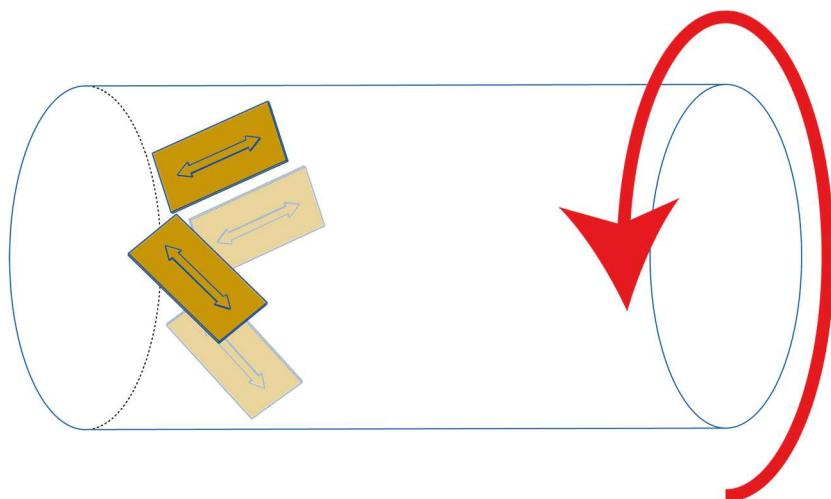
Fonte: Autoria própria

Vale lembrar que os strain gauges adjacentes na ponte devem estar em lados opostos da barra, para que suas deformações tenham direções opostas.

$$\frac{V_2}{V_1} = GF \cdot \epsilon \quad (2.23)$$

Existem ainda muitos outros tipos de configurações que podem ser feitas para medir diferentes deformações. Por exemplo, se deseja-se medir deformações em uma peça que sofre apenas torque é possível usar a configuração da figura abaixo.

Figura 13 - Torque ponte complete



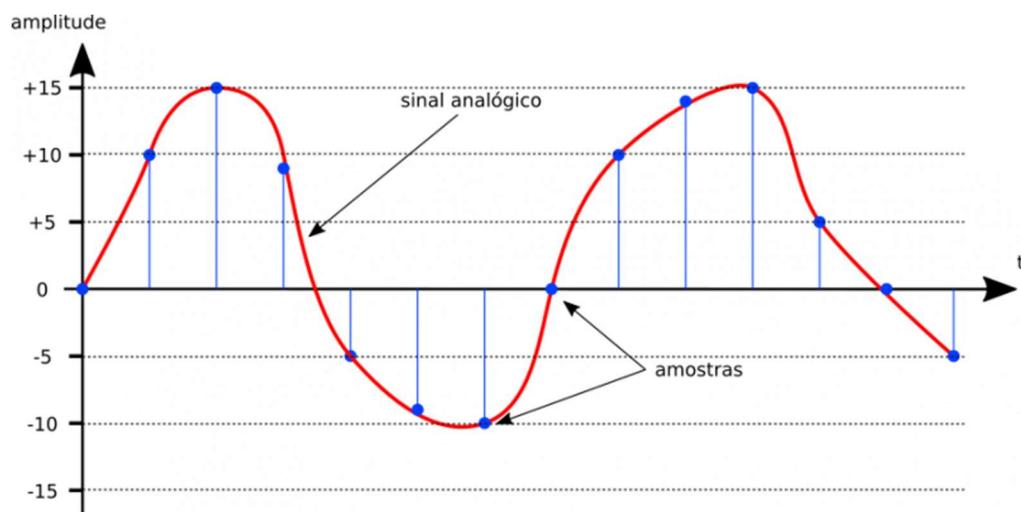
Fonte: Autoria própria

Nesse caso os strain gauges estão a 45° do eixo da barra, capturando, assim, as deformações causadas pela tensão cisalhante vinda do torque aplicado na barra.

2.3 TAXA DE AMOSTRAGEM

A taxa de amostragem é a frequência na qual amostras de um sinal analógico são coletadas na conversão analógica-digital.

Figura 14 - Amostragem de um sinal analógico



Fonte: Wiki inf UFPR – Disponível em:
http://wiki.inf.ufpr.br/maziero/doku.php?id=prog2:processamento_de_audio. Acesso em: 26 dez. 2021.

A frequência de realização de amostras na conversão AD está diretamente relacionada com a frequência do sinal que se deseja observar. Se a taxa de conversão é muito mais baixa do que a do fenômeno que se quer observar, esse fenômeno pode acontecer entre duas amostras consecutivas e passar despercebido. O oposto também deve ser evitado, frequências altas de aquisição demandam mais poder de processamento, mais consumo energético e mais espaço de armazenamento.

Outra frequência que deve ser levada em conta na hora de escolher a taxa de amostragem de um sistema é a dos ruídos presentes no sinal. Entender essas frequências permite isolá-las e filtrá-las a fim de se obter um sinal de interesse mais limpo.

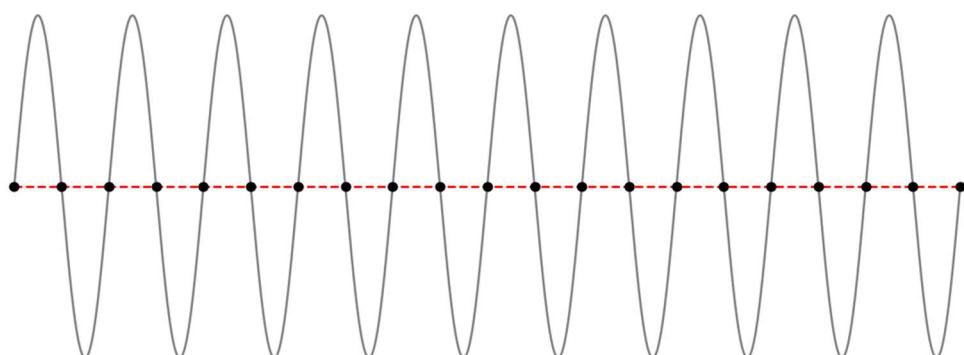
2.3.1 Teorema de Nyquist-Shannon

O teorema de Nyquist-Shannon é uma das bases para a conversão de sinais contínuos em sinais discretos. Ele descreve as condições mínimas para que uma aquisição discreta consiga capturar toda a informação de um evento contínuo. Dentre essas condições, está a taxa mínima de amostragem para que seja possível reconstruir um sinal após sua conversão para digital. Essa frequência de aquisição não pode ser menor que o dobro da frequência do fenômeno de interesse (Eq. (2.24)) [4].

$$f_{amostragem} > 2f_{sinal} \quad (2.24)$$

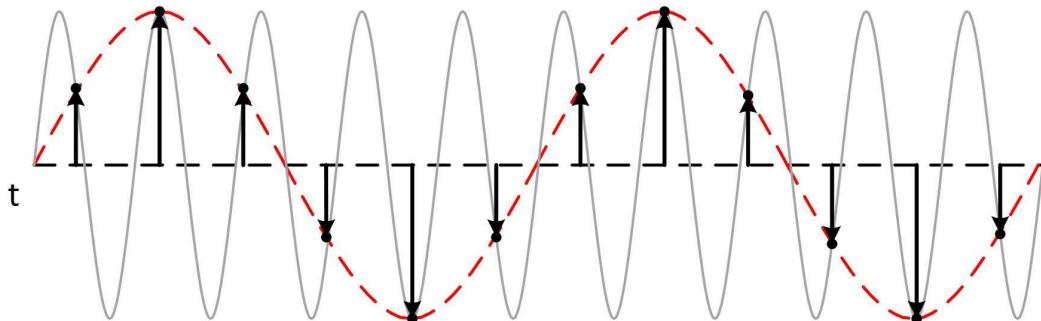
Quando a frequência do sinal que está sendo discretizado é maior que metade da taxa de aquisição, pode ocorrer o erro de *Aliasing*. Quando um sinal com *aliasing* é reconstruído, frequências que existiam no sinal original podem deixar de existir (Figura 15) ou, até mesmo, originar frequências que não existiam originalmente (Figura 16).

Figura 15 - Frequência zerada por aliasing



Fonte: Autoria própria

Figura 16 - Nova frequência gerada por aliasing



Fonte: National Instruments – Disponível em: <https://www.ni.com/pt-br/innovations/white-papers/06/acquiring-an-analog-signal--bandwidth--nyquist-sampling-theorem-.html>. Acesso em: 28 dez. 2021.

Em ambas as fotos a onda cinza é o sinal analógico original, os pontos pretos são os momentos de amostragem e a linha pontilhada vermelha é o sinal reconstruído a partir das amostras.

Analizando a figura 15 percebe-se que os momentos de amostragem coincidiram com os momentos em que o sinal original estava passando pelo zero. Desse modo, o sinal reconstruído não representa a onda cinza de maneira fidedigna.

Já o caso da figura 16 é mais preocupante, pois além de não representar o sinal original de maneira correta, o sinal reconstruído apresenta uma frequência que não existe na onda original.

2.4 FILTROS

Existem dois principais tipos de filtros, os digitais e os analógicos. Os primeiros modificam o sinal após a conversão AD e são funções matemáticas capazes de extrair partes de interesse de um sinal. Suas bandas de passagem e ordem são facilmente editáveis, o que facilita a análise dos dados. Um obstáculo da utilização de filtros digitais é a necessidade de um sinal amostrado de maneira correta, sem erro de *aliasing*. É aí que se fazem necessário os filtros analógicos. Eles filtram o sinal antes

da conversão AD, por isso são filtros implementados em hardware, o que dificulta a mudança de bandas de passagem e ordem do filtro.

Uma das aplicações mais comuns de filtros analógicos são os filtros anti-aliasing. Esses são filtros passa baixa desenvolvidos com frequências de corte abaixo de metade da frequência do conversor AD que vem logo após ele. Assim, eles garantem que o sinal lido pelo conversor não terá o erro de *aliasing*.

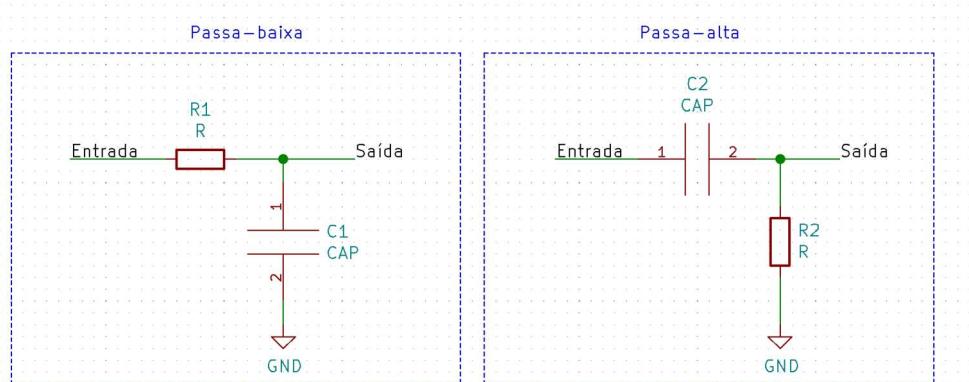
2.4.1 Frequência de Corte

A frequência de corte de um filtro é definida como a frequência cuja potência do sinal é reduzida em 3dB ou, para o caso de estudo desse trabalho, quando a tensão de saída do filtro é $\sqrt{2}$ menor que a tensão de entrada.

2.4.2 Banda de Passagem

Os filtros podem ser classificados quanto à banda de passagem em passa-baixa e passa-alta. Os passa-baixa são os que permitem a passagem das frequências baixas de um sinal, porém atenuam as frequências mais altas. Já os passa-alta fazem o contrário, atenuando as baixas e permitindo a passagem das altas.

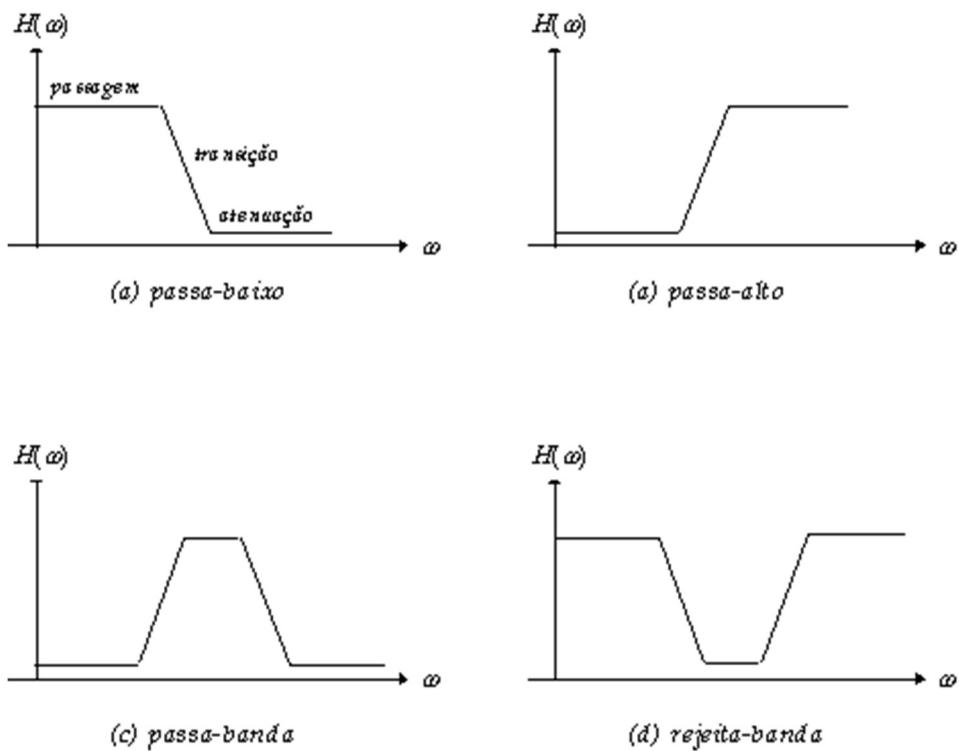
Figura 17 - Filtros analógicos passivos



Fonte: Autoria própria

A junção desses dois tipos de filtros pode gerar mais dois filtros. Se estiverem em série e as bandas de passagem deles se intersectarem, o filtro é chamado de passa-faixa, já que atenua frequências abaixo do corte de sua componente passa-alta e acima da componente passa-baixa. Caso os dois estiverem em paralelo e as bandas não se intersectarem, o filtro é chamado de rejeita faixa. A figura 18 ilustra as bandas de passagem e de rejeição dos filtros citados acima [5].

Figura 18 - Tipos de filtros banda de passagem

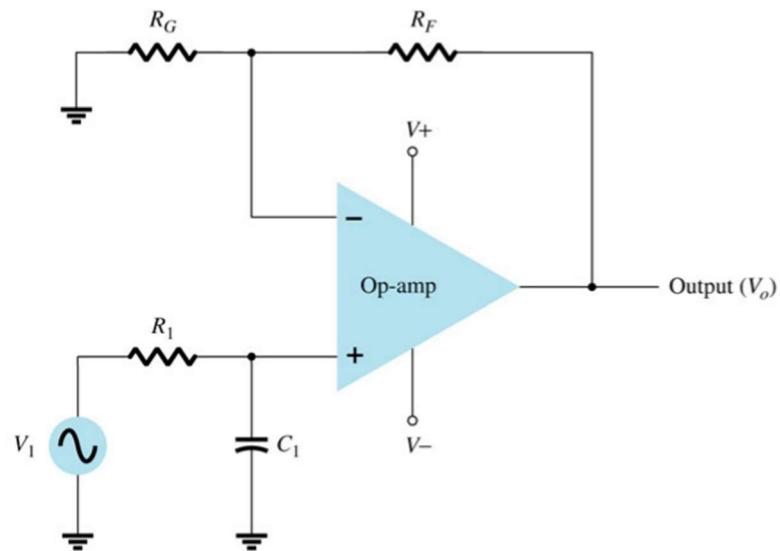


Fonte: UFRGS Aula de filtros elétrico- Disponível em:
https://www.ufrgs.br/eng04030/Aulas/teoria/cap_12/filtelec.htm. Acesso em: 24 nov. 2021.

2.4.3 Filtros Ativos

Os filtros apresentados no tópico anterior são chamados de passivos, pois utilizam apenas componentes passivos em sua construção. Quando se utiliza componentes ativos, como amplificadores operacionais, o filtro é chamado de ativo.

Figura 19 - Filtro passa-baixa ativo



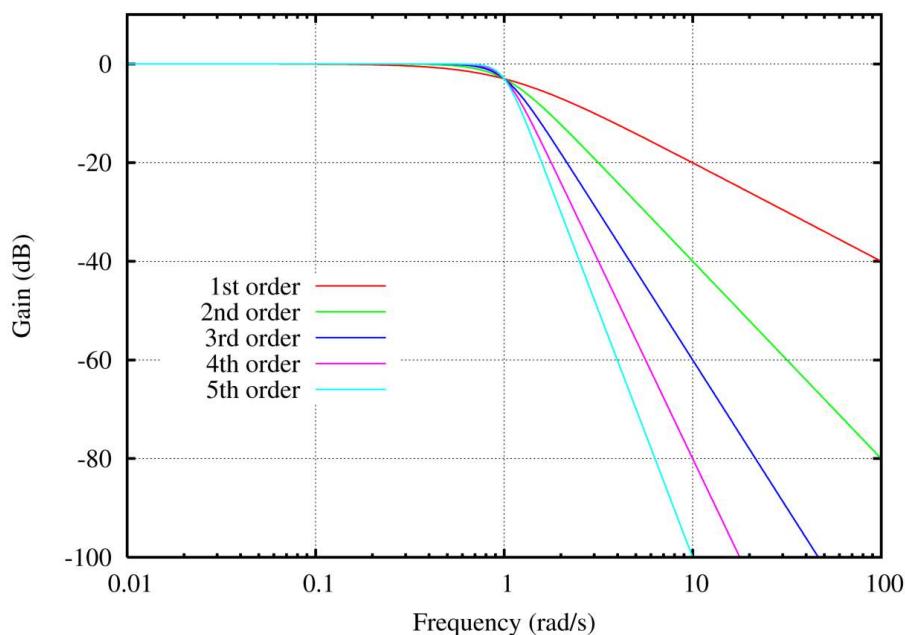
Fonte: PUCSP Aula de filtros ativos - Disponível em:
https://www.pucsp.br/~elo2eng/Aula_05_DCE4_2012.pdf . Acesso em: 24 nov. 2021.

Em troca de um custo mais elevado e uma complexidade maior, esses possuem algumas vantagens sobre os passivos, como o maior controle das impedâncias de saída e de entrada. Isso possibilita projetá-lo com uma impedância alta de entrada, de maneira que influencie minimamente o sinal de interesse, e com impedância baixa de saída, tornando o sinal mais resistente a ruídos.

2.4.4 Ordem

A ordem de um filtro é definida pela inclinação de sua banda de rejeição. Quando a inclinação é de 20 dB por década, o filtro é chamado de primeira ordem, quando a inclinação é de 40 dB por década ele é chamado de segunda ordem e assim por diante (Figura 20).

Figura 20 - Ordens filtros

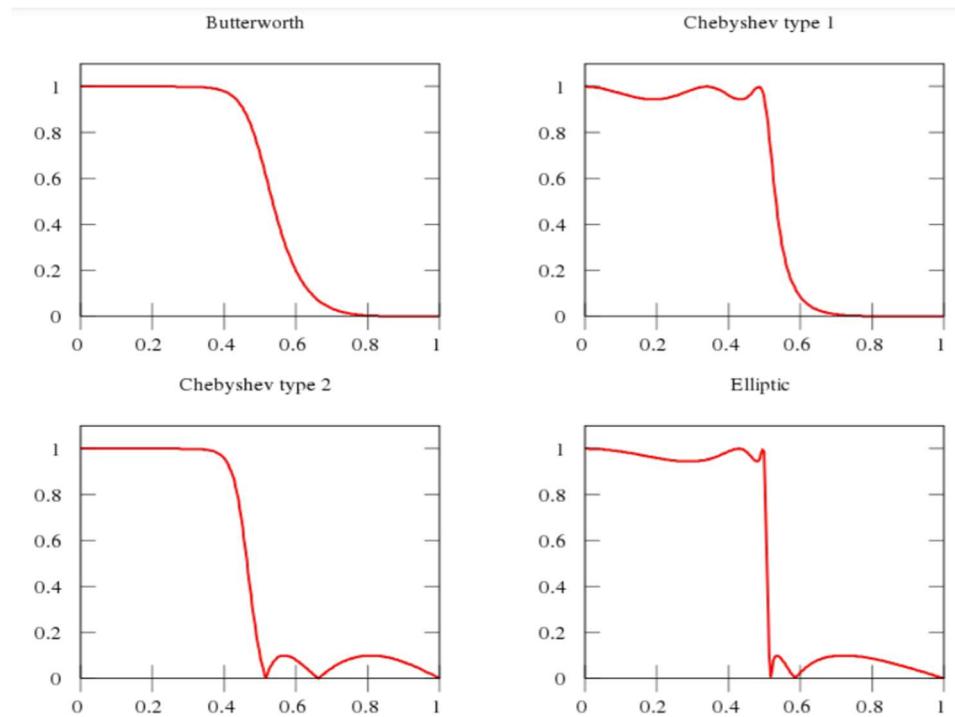


Fonte: Wikipedia - Disponível em:
https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Butterworth_orders.png. Acesso em: 24 nov. 2021.

2.4.5 Resposta em frequência

Os filtros ainda podem ser caracterizados pela sua resposta em frequência. A figura abaixo mostra algumas das possíveis classificações com relação à resposta em frequência.

Figura 21 - Tipos de resposta de filtros



Fontes: UFPR Aula de filtros ativos – Disponível em:
<http://www.eletrica.ufpr.br/marlio/te054/capitulo5.pdf>. Acesso em: 24 nov. 2021.

Como pode-se observar, o Elíptico possui uma queda abrupta após sua frequência de corte e existem deformações tanto na banda de passagem quanto na de rejeição. Já o Butterworth possui uma banda de passagem e de rejeição sem deformações, porém sua transição é mais lenta.

3 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Para a medição do volume de combustível no tanque serão usados 4 extensômetros ligados na configuração de ponte completa, assim, já compensando variações de temperatura e aumentando a sensibilidade do sensor. Eles serão colados no tubo do chassi do carro no qual o tanque vai fixado. Dessa forma, serão capazes de medir a variação da deformação causada pelo peso do tanque conforme o combustível é consumido e sua massa diminui.

Como visto na revisão da literatura, a variação da resistência de um *strain gauge* é muito baixa e, mesmo com a ponte de Wheatstone, é necessário um circuito de amplificação para facilitar a leitura dos dados. Além disso, quando o extensômetro é colado, seja por tensões residuais ou por variações na fabricação do sensor, é muito comum que a ponte esteja levemente desbalanceada, mesmo que a peça não esteja sofrendo esforços. Por isso, é importante que o circuito de amplificação tenha um controle de *offset* para pode ser se adaptar a essas situações.

Junto ao circuito de amplificação também existirá um circuito de filtragem do sinal. O chassi de um carro está sempre sujeito a esforços como a vibração do motor, cuja rotação, no caso do veículo estudado, varia de 1800 a 4200 RPM ou de 30 a 70 Hz. Como o tanque de combustível se esvazia uma vez a cada 90 minutos, a vibração do motor pode ser considerada um ruído de alta frequência para o sensor que será desenvolvido nesse trabalho. Portanto, usar um filtro passa baixa com frequência de corte abaixo da do motor, além de permitir uma taxa de aquisição menor sem que haja aliasing, ainda melhorará a qualidade do sinal lido, pois irá eliminar ruídos de alta amplitude como a vibração do motor.

Por fim, para a definição de onde serão colados os extensômetros, será feito um estudo em elementos finitos da base de fixação do tanque, definindo-se, assim, os pontos onde o sensor terá maior sensibilidade à variação da massa de combustível.

3.1 CIRCUITO DE AMPLIFICAÇÃO

Os amplificadores instrumentais são circuitos eletrônicos ideais para a amplificação do sinal de um *strain gauge*, pois possuem entradas diferenciais que podem ser ligados aos dois nós da ponte de Wheatstone. Além disso, possuem também alta impedância de entrada, influenciando, dessa forma, o mínimo possível no sistema em que estão ligados. Junto a tudo isso, geralmente têm altos valores de ganho, outro ponto importante para a amplificação dos pequenos desequilíbrios da ponte.

Por esse motivo, decidiu-se por usar o INA125 da Texas Instruments, um amplificador instrumental que possibilita um ganho de até 10 mil vezes mudando apenas um resistor.

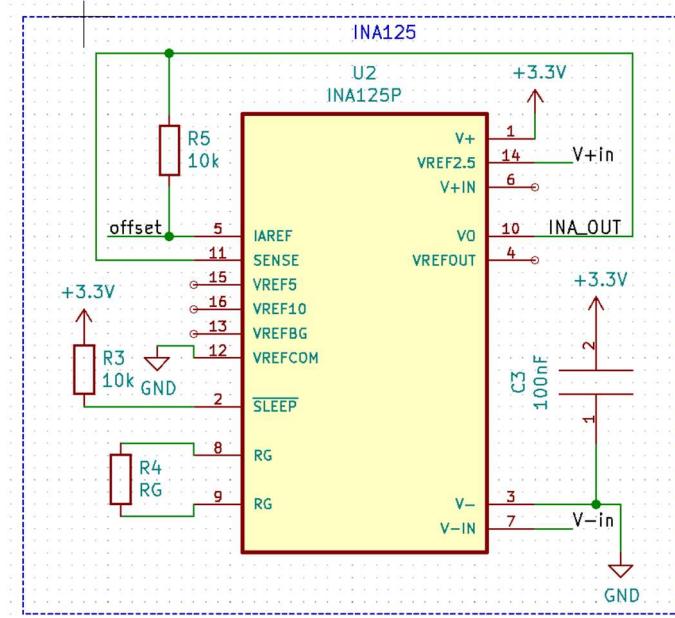
A fórmula de seu ganho está abaixo [6].

$$Ganho = 4 + \frac{60k\Omega}{R_g} \quad (3.1)$$

Esse modelo conta também com um pino de controle de *offset* de saída e com a possibilidade de ser ligado com fonte de alimentação simples, o que simplifica o circuito de aquisição, uma vez que elimina tensão negativas.

Seguindo as recomendações do manual de funcionamento do INA125 [6], o circuito de amplificação foi desenhado no *software* de desenvolvimento KiCAD e pode ser visto na figura 22.

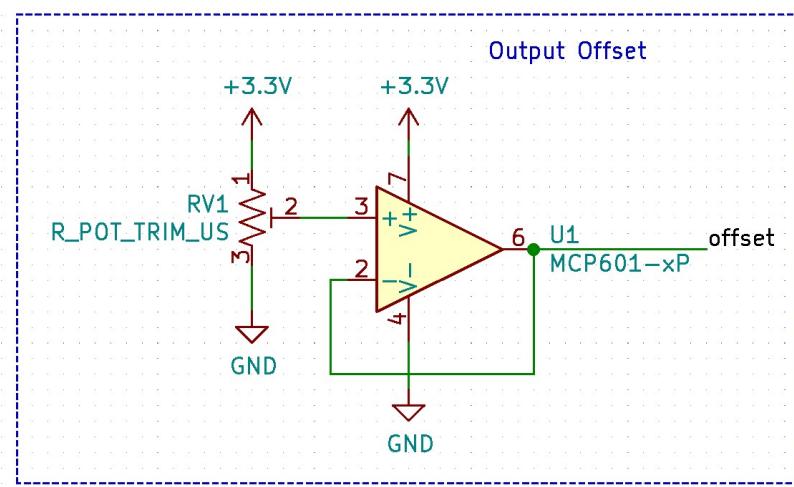
Figura 22 - Esquemático INA125



Fonte: Autoria própria

Para o controle de *offset* de saída é necessário a entrada de um sinal de tensão com baixa impedância. Para isso, utilizou-se o amplificador operacional MCP601 na configuração de repetidor de tensão juntamente com um potenciômetro. O esquemático pode ser visto na figura 23 [7].

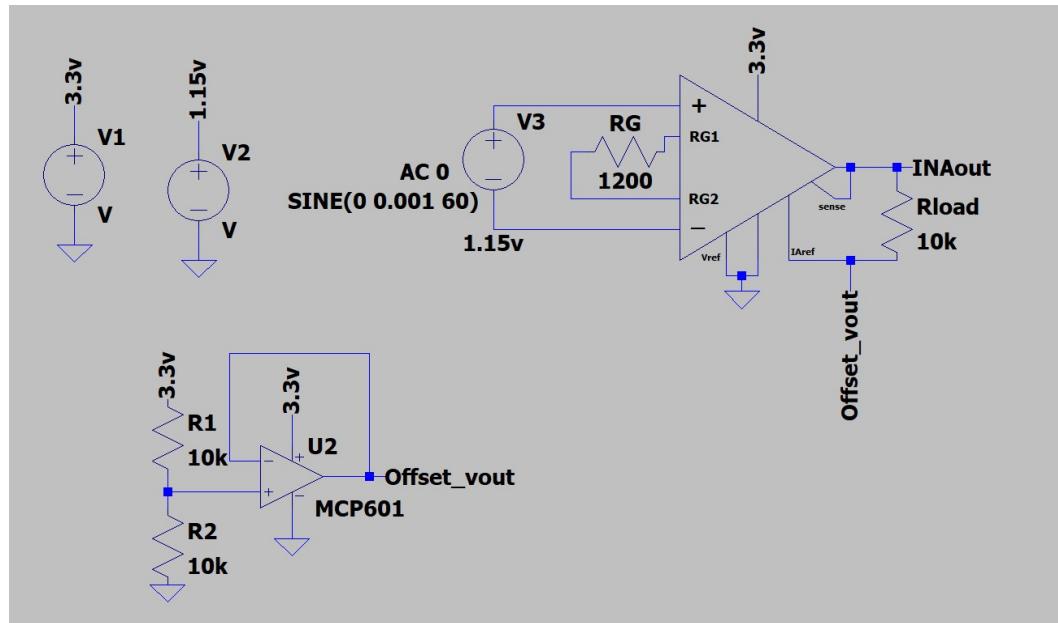
Figura 23 - Esquemático controle de offset



Fonte: Autoria própria

Para garantir que todas as ligações foram feitas corretamente e que o circuito funcionaria de acordo com o que foi projetado, foi feita uma simulação usando o software LTspice (Figura 24) com diferentes valores de offset e ganho.

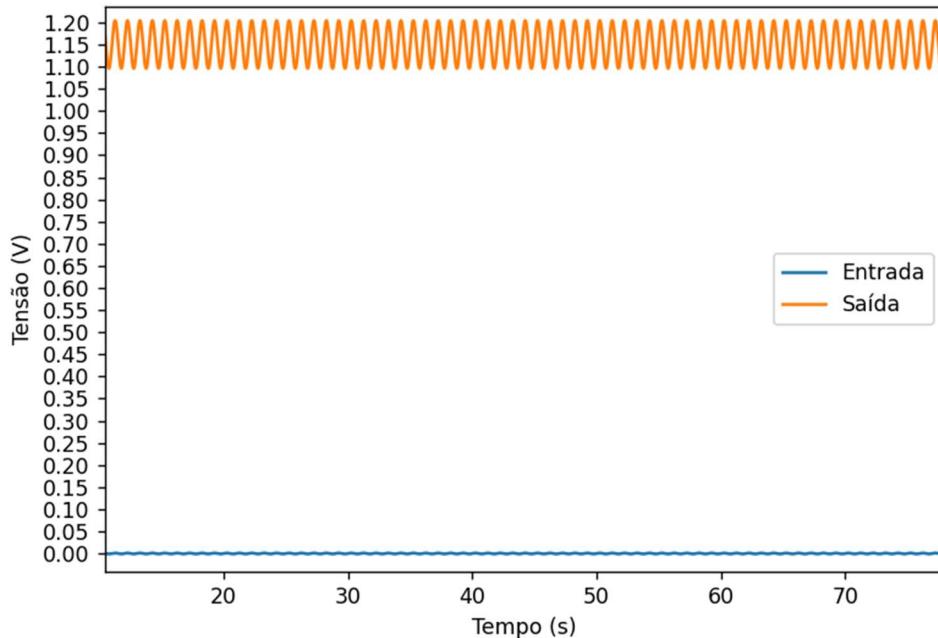
Figura 24 - Esquemático INA125 LTspice



Fonte: Autoria própria

Com o resistor de ganho em 1200Ω (ganho de 54 vezes), com o *offset* ajustado para 1.15V e uma oscilação de 1mV na entrada do amplificador o valor esperado de saída é uma oscilação de 54mV centrada em 1.15V. Os resultados da simulação podem ser vistos na figura 25.

Figura 25 - Simulação circuito de amplificação



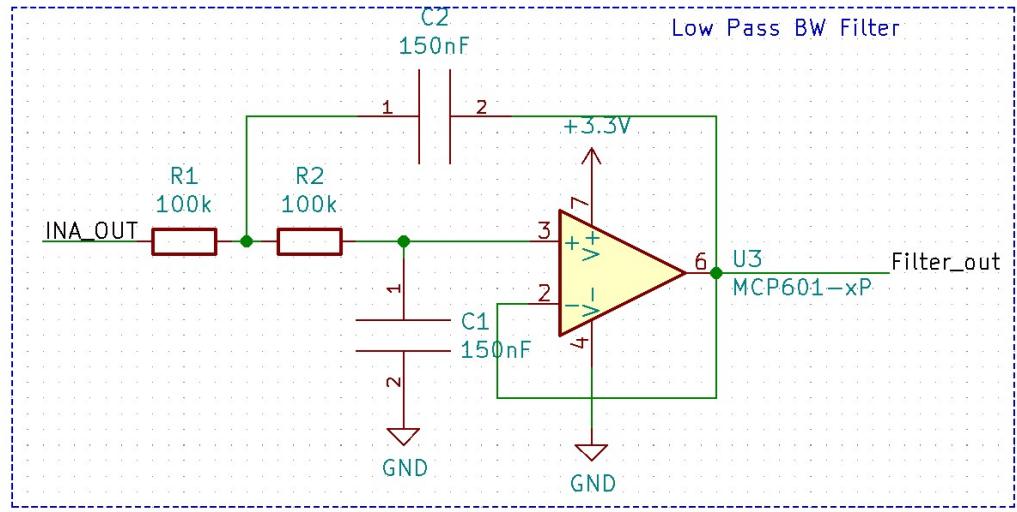
Fonte: Autoria própria

3.2 CIRCUITO DE FILTRAGEM

A filtragem dos dados é de suma importância para a qualidade da aquisição. É ela que facilitará a interpretação e a aquisição dos dados pelo microcontrolador, pois eliminará ruídos indesejáveis, como a vibração do motor, e diminuirá a taxa de amostragem necessária para que não haja erros como o *Aliasing*.

Como visto na revisão da literatura, existem vários tipos de filtros. Para esse circuito, decidiu-se por usar um filtro passa baixa ativo de segunda ordem com forma de resposta Butterworth e topologia Sallen-Key (Figura 26). Essa forma de resposta é a ideal, pois não causa deformações na banda de passagem e a topologia foi escolhida, porque permite a criação de um filtro de segunda ordem usando apenas um Amplificador Operacional [5].

Figura 26 - Esquemático filtro Sallen-Key



Fonte: Autoria própria

A frequência de corte de um filtro nessa configuração é dada pela Equação (3.2) [5]:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (3.2)$$

Para $R_1 = R_2$ e $C_1 = C_2$

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \quad (3.3)$$

Para confirmar que o circuito foi projetado corretamente, fez-se o estudo da resposta em frequência no LTspice com os valores de resistência e capacitância de $150\text{k}\Omega$ e $1\mu\text{F}$ respectivamente. Isso leva a uma frequência de corte teórica de 1,06 Hz. O esquemático e o resultado da simulação pode ser visto na figura 27.

Figura 27 - Simulação circuito de filtro

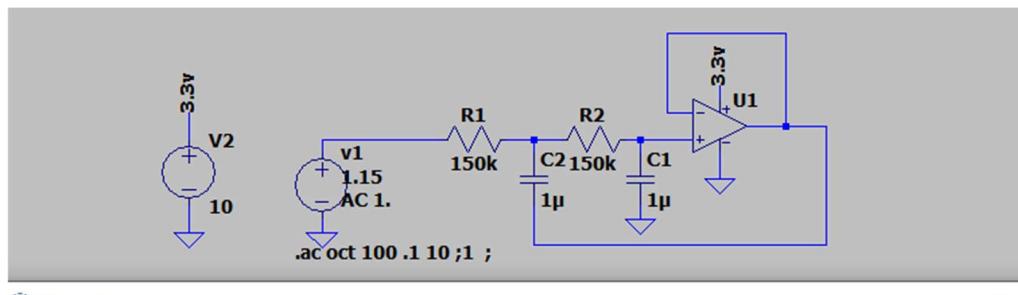
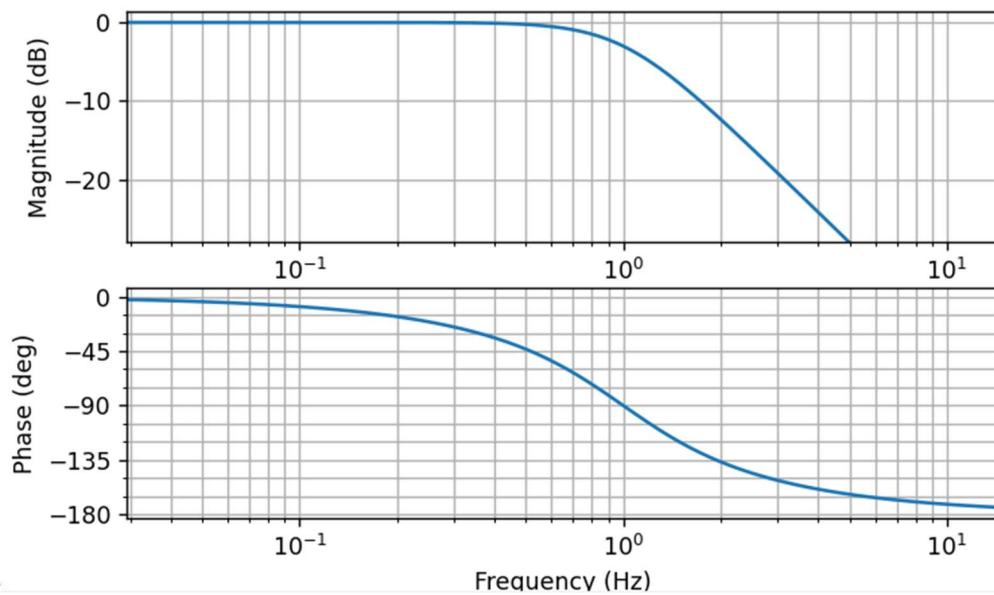


Figure 1



Fonte: Autoria própria

A figura acima é um diagrama de Bode cuja linha verde é a entrada do circuito que possui ganho zero e a linha azul representa sua saída. Como pode-se observar, o circuito apresenta o comportamento esperado, atenuando frequências acima de 10 Hz.

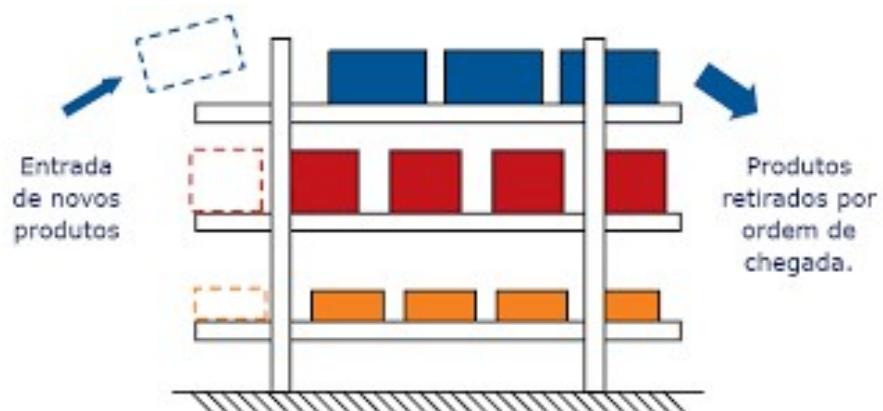
3.3 FILTRO DIGITAL

Com o carro em movimento, o tanque completo se esvazia em cerca de 90 minutos. Isso significa que a frequência do sinal de interesse é muito baixa, quando comparada com seus principais ruídos, a vibração do motor e as irregularidades da pista. Por tanto, decidiu-se remover completamente esses ruídos com um filtro passa-baixa.

O problema de usar filtros analógicos com frequência de corte muito baixa é que os componentes necessários para sua construção passam a ser mais caros e mais difíceis de se adquirir. Uma solução para isso é usar, junto aos analógicos, filtros digitais.

Algo importante para aplicações em microcontroladores é o baixo custo computacional, um filtro digital que atende a essa característica é a média móvel. Seu funcionamento consiste em retornar o valor médio das N últimas amostras de um sinal. E sua implementação em software pode ser feita, facilmente, utilizando um bloco de memória e uma lógica de *First In First Out*, já muito conhecida no ambiente da programação (Figura 28).

Figura 28 - First In First Out



Fonte: Deinfo UEPG – Disponível em: <http://deinfo.uepg.br/~alunoso/2016/FIFO/>. Acesso em: 23 dez. 2021.

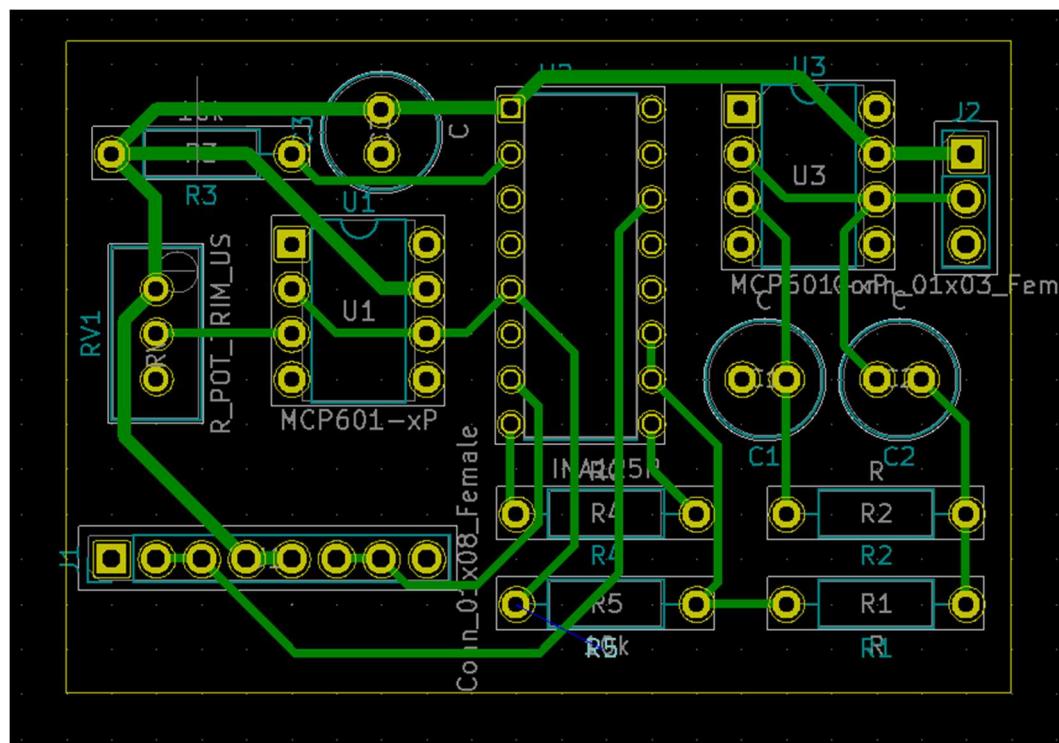
Os valores selecionados para os filtros e para a taxa de aquisição serão discutidos nos resultados desse projeto.

3.4 PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO

Após o projeto do circuito de aquisição e a validação do seu funcionamento por meio das simulações realizadas no LTspice, foi desenvolvido um esquemático de PCB no KICAD para que seja possível a manufatura do circuito. Optou-se por utilizar componentes THT (componentes que atravessam a placa), por facilitarem a manufatura manual.

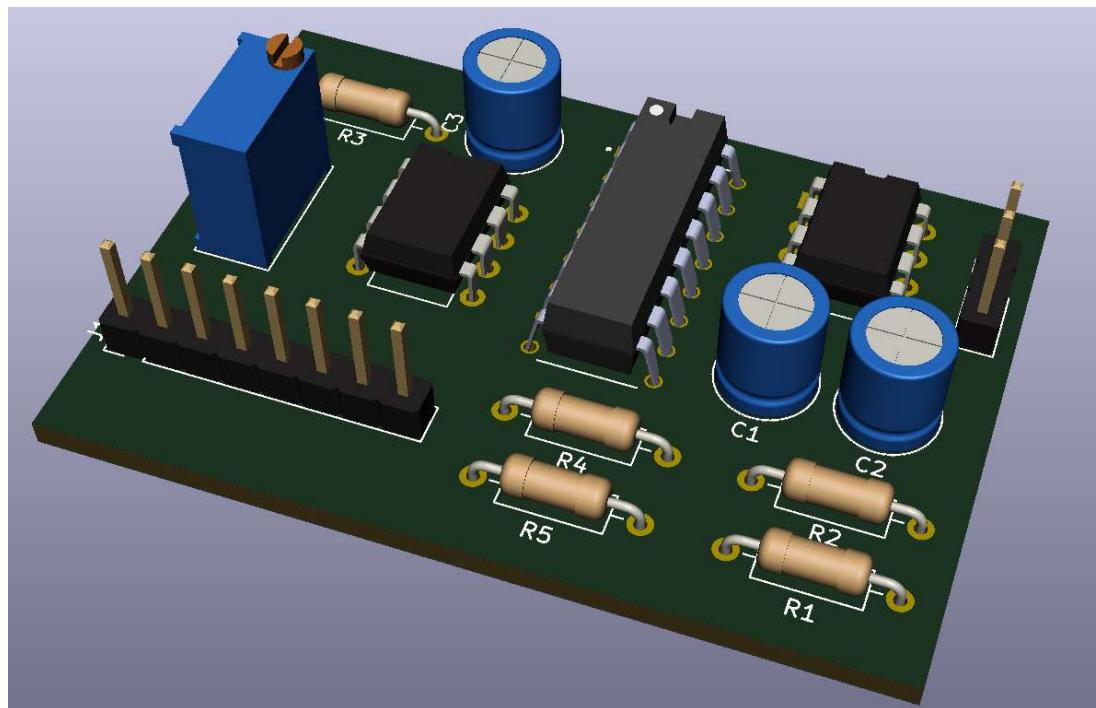
O *layout* da placa (Figura 29) e seu modelo 3D (Figura 30) podem ser vistos abaixo.

Figura 29 - Layout PCB



Fonte: Autoria própria

Figura 30 - Modelo 3D da PCB



Fonte: Autoria própria

4 MICROCONTROLADOR E FIRMWARE

Para a aquisição dos dados, optou-se pela placa de desenvolvimento Firebeetle ESP32 (Figura 31) da DFRobot, uma vez que possui o microcontrolador ESP32, um chip de 32 bits muito potente e amplamente documentado na Internet. Possui ainda 16 megabytes de memória flash, que servirá para salvar os dados adquiridos durante o movimento do carro.

Figura 31 – Firebeetle



Fonte: DFRobot – Disponível em: <https://www.dfrobot.com/product-1590.html>. Acesso em: 20 dez. 2021.

O programa do microcontrolador tem uma rotina principal, que faz a leitura do sensor salva o dado na memória *flash* (tecnologia de memória não volátil). Para que as amostras sejam feitas numa taxa constante, definiu-se uma interrupção no *timer 0* da ESP32, que dá início à rotina principal do código. Em seguida, é feita a leitura analógica da porta A0 do microcontrolador, onde está ligado o sensor. Por fim, os dados passam pelo filtro de média móvel e são salvos na memória *flash* usando a biblioteca SPIFFS.h, que cria um sistema de pasta na memória do microcontrolador e permite a criação de arquivos assim como num computador.

O código foi feito usando a editor de texto VSCode e uma de suas extensões para programação de microcontroladores, o PlatformIO. A rotina principal do programa embarcado pode ser vista no apêndice A.

5 SIMULAÇÃO DE ELEMENTOS FINITOS

A fim de definir o melhor local para fixar os extensômetros, foi feita uma simulação em elementos finitos da barra do chassi do carro na qual o tanque de combustível é fixo. A figura 32 mostra a posição do tanque com relação ao carro.

Figura 32 - Veículo Equipe EESC USP Baja SAE

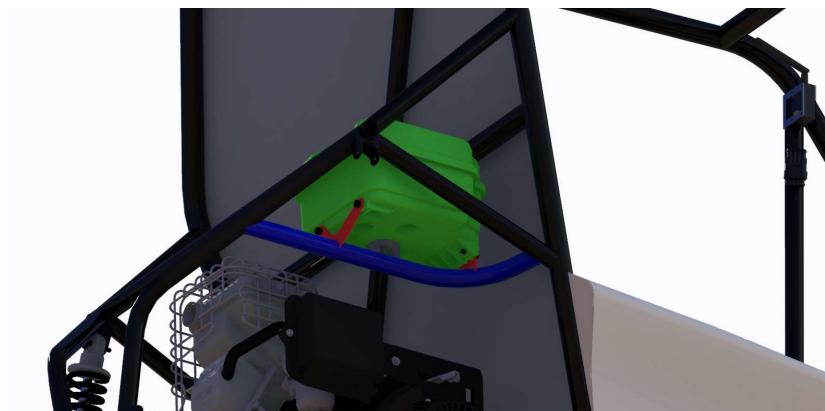


Fonte: Autoria própria

O local de colagem dos *strain gauges* é considerado bom se dois fatores coexistirem no mesmo local, a deformação deve ser relativamente alta e seu gradiente dever ser baixo. Quanto maior a deformação causada por um esforço, mais fácil é de percebê-la com *strain gauges*. Já um gradiente baixo é importante, pois o extensômetro revela a média de deformação da região onde ele está colado, portanto, se ele está colado numa região com alto gradiente, os picos de deformação serão atenuados pelos vales. Além disso, no momento da colagem podem ocorrer erros de posicionamento e se o sensor está sendo fixado numa região cuja deformação varia

muito, os resultados práticos podem ser muito diferentes dos esperados. Na figura 33, observa-se o tanque de combustível em verde e em azul o tubo no qual ele é fixado.

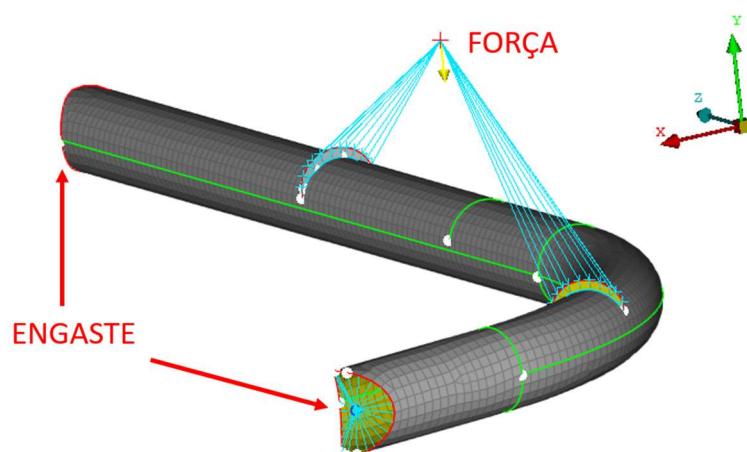
Figura 33 - Tubo de fixação do tanque de combustível



Fonte: Autoria própria

A simulação do tubo em azul foi feita utilizando o software ABAQUS. No modelo, as partes do tubo que são soldadas ao chassi foram engastadas e o peso de combustível foi simulado como uma força remota no centro de gravidade do tanque. Essa força foi transferida para as chapas de fixação (em vermelho) através de elementos rígidos. O modelo pode ser visto na figura 34.

Figura 34 - Modelo da simulação

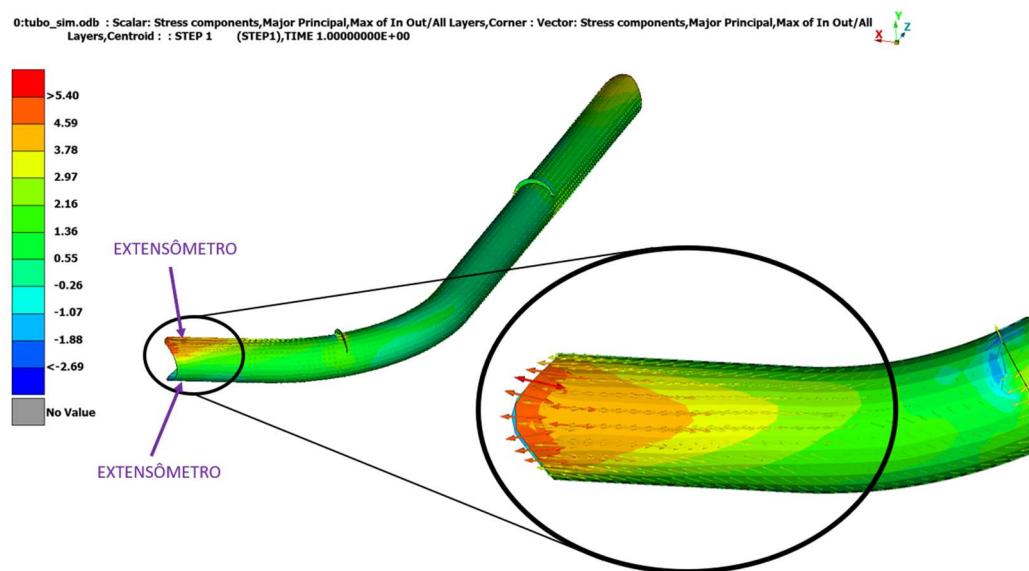


Fonte: Autoria própria

Após impor as condições de contorno, optou-se por utilizar uma malha do tipo casca, uma vez que a simulação se trata de tubos e chapas de pequena espessura, evitando, assim, possíveis erros de interpolação e diminuindo o custo computacional da simulação. A malha foi feita utilizando majoritariamente elementos quadriláteros de 3 mm de comprimento, discretizando, desse modo, a região do extensômetro (10 mm de comprimento) em 3 elementos.

As direções das deformações máximas principais obtidas na simulação podem ser vistas na figura 35.

Figura 35 - Deformação máxima do tubo



Fonte: Autoria própria

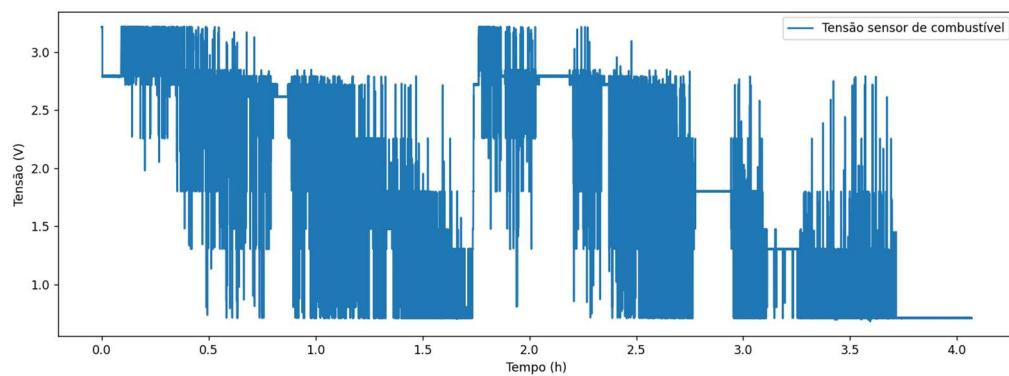
Os dois pontos destacados na imagem foram escolhidos para fixação do quatros strain gauges da ponte. Dois deles na parte superior do tubo, e outros dois na parte inferior, sofrendo deformações em sentidos opostos, aumentando, assim, a sensibilidade do sensor.

6 RESULTADOS

Devido às restrições impostas pela pandemia de COVID-19, os testes práticos desse trabalho tiveram que ser cancelados. A fim de conseguir validar o circuito de aquisição de dados, o circuito de filtragem dos dados foi simulado usando como entrada os dados aquisitados pela equipe de baja da EESC USP com o sensor já citado nesse trabalho.

O funcionamento do sensor que forneceu os dados já foi explicado na seção de 1.1 desse trabalho. Apesar de usar métodos bem diferentes para a medição do combustível, a boia do sensor sofre dos mesmos ruídos que se deseja eliminar no sensor desenvolvido nesse projeto, como a vibração do motor e as vibrações impostas pela pista no carro.

Figura 36 - Dados do sensor atual da equipe EESC USP Baja SAE



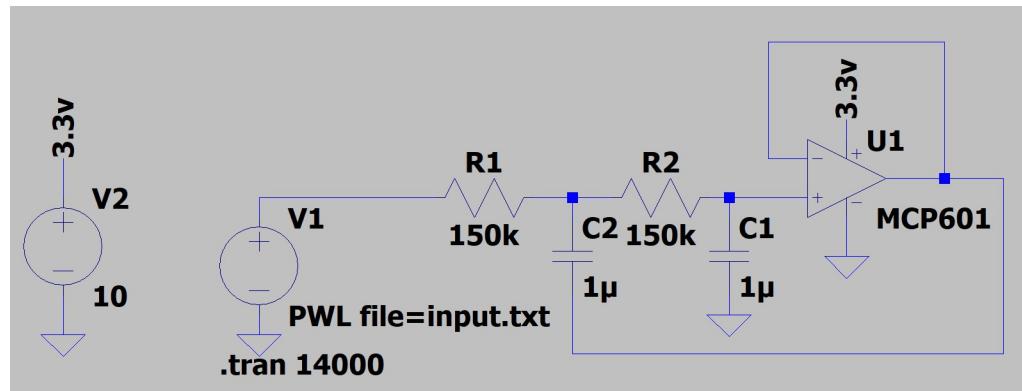
Fonte: Autoria própria

Os dados da figura 36 foram obtidos numa frequência de amostragem de 100hz. Apesar de muito ruidosos, é possível perceber duas curvas descendentes a primeira até as 1,75 horas e a segunda das 2 horas em diante. Observa-se também, o momento que ocorreu o reabastecimento do carro, por volta das 1,75 horas de prova.

Para a simulação, os dados emprestados pela equipe foram convertidos para valores de tensão e foram espaçados no tempo por um período de 10ms, uma vez que foram aquisitados a 100 Hz. Desse modo, serviram de entrada para o valor de

tensão de uma fonte (V1) do LTspice, que foi ligada à entrada do circuito, como pode ser visto na figura 37.

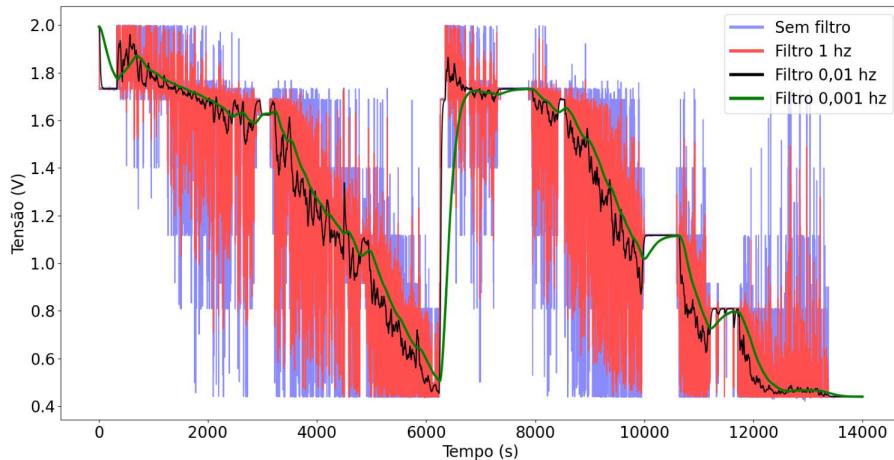
Figura 37 - Simulação do Filtro no LTspice



Fonte: Autoria própria

Foram simulado cerca de 4 horas de dados com diversos valores de frequência de corte no filtro. Os resultados das simulações podem ser vistos na figura 38.

Figura 38 – Simulação com diferentes frequências de corte

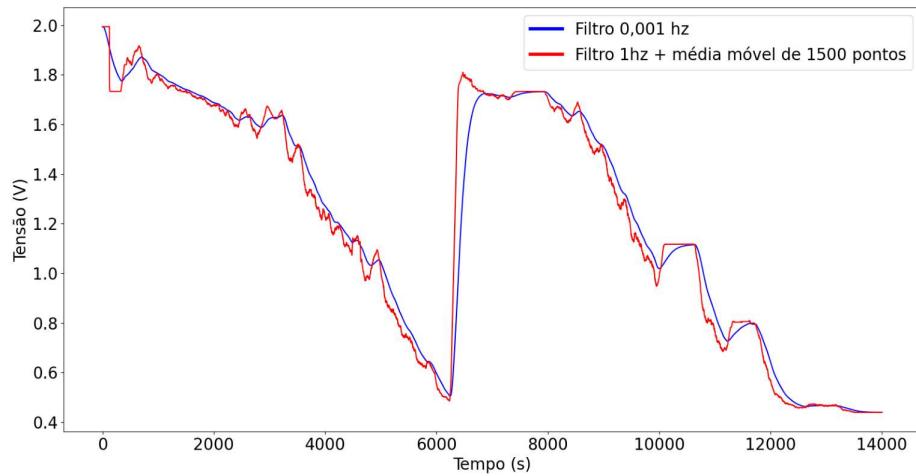


Fonte: Autoria própria

O gráfico mostra que o dado sem filtro e o com frequência de corte de 1Hz são muito ruidosos, o que dificulta sua interpretação. Contudo, os dados com frequências corte menores já são interpretados mais facilmente, mostrando duas curvas decrescentes do nível de combustível e um abastecimento por volta dos 6000 segundos.

Como já foi discutido na seção 3.3, usar filtros analógicos com frequência de corte muito baixa não é muito viável na prática e a solução para isso é usar um conjunto de filtros de *hardware* e de *firmware*. O gráfico abaixo compara o dado filtrado com frequências de corte de 0,01 Hz com o dado filtrado com frequência de corte de 1hz, com taxa de amostragem de 10 Hz e uma média móvel de 1500 pontos.

Figura 39 - Comparação filtros analógico e digital



Fonte: Autoria própria

Como é possível ver no gráfico da figura 39, a combinação do filtro analógico de 1 Hz com o filtro digital de média móvel com 1500 pontos traz resultados muito próximos ao filtro analógico de 0,001 Hz sozinho. Esse resultado em conjunto com as simulações feitas do circuito de amplificação, comprovam que o circuito projetado consegue amplificar o sinal de saída da ponte com os extensômetros e entregar um sinal filtrado e de fácil interpretação.

Os próximos passos do projeto, que foram impedidos pela pandemia, incluem fazer testes práticos com o carro em movimento e encontrar a correlação dos valores lidos pelo sensor e o volume de combustível presente no tanque.

7 CONCLUSÃO

O trabalho realizado mostra que é possível desenvolver um sistema de aquisição de dados que seja capaz amplificar, filtrar e salvar dados de extensômetros de maneira simples e barata. Utilizando apenas componentes facilmente encontrados no mercado e obedecendo critérios, como o de Nyquist, que garantem a qualidade dos dados.

Junto a isso, o trabalho mostra o poder da aquisição e leitura de deformação mecânica, que é facilmente convertida em força que, por sua vez, governa todas as interações entre corpos. Portanto, com um circuito de amplificação e filtragem de dados, como o apresentado, e a configuração correta dos extensômetros, é possível medir desde o peso de uma pessoa, como em uma balança, e volume de combustível de um tanque, até esforços dinâmicos em corpos com geometrias complexas.

Além disso, as restrições impostas pela pandemia de COVID-19 influenciaram na forma como esse projeto foi feito, aumentando o número de simulações e validações virtuais em detrimento das práticas. Isso mostrou que com a tecnologia atual e com as ferramentas certas é possível validar e testar grande parte de um projeto de engenharia muito antes dele sair do papel. O que significa uma grande economia de tempo e de dinheiro, uma vez que para testes virtuais não é necessário esperar o tempo e nem gastar o dinheiro da manufatura de um protótipo.

8 REFERÊNCIAS

- [1] SAE BRASIL. **REGULAMENTO BAJA SAE BRASIL (RATBSB) – EMENDA 3. 2/133.** Comitê Baja Sae Brasil, 2018.
- [2] ANDRADE, R. A. P. **Análise e melhoria de um sistema não invasivo de monitoramento de pressão intracraniana.** Dissertação (mestrado) – EESC, USP, São Carlos, 2013.
- [3] SHIGLEY, JE, **Projeto de engenharia mecânica** - 23^a edição- Editora Bookman, 2005
- [4] GUERREIRO, M.: **Estudo e análise comparativa das técnicas de compressed sensing subamostragem.** Trabalho de conclusão de curso, UTFPR, pato branco, 2017.
- [5] PERTENCE JUNIOR, A.: **Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos.** Editora Bookman, Porto Alegre, sexta ed., 2003. Reimpressão 2007.
- [6] TEXAS INSTRUMENTS. Datasheet: **INA125, Instrumentation Amplifier with Precision Voltage Reference.** Burr-Brown, 1998.
- [7] MICROCHIP. Datasheet: **MCP601, 2.7V to 6.0V Single Supply CMOS Op Amps.** Microchip Technology Inc, 2007.

APÊNDICE A - Firmware do Sensor

```

#include <Arduino.h>
#include <SPIFFS.h>

#define SECOND_TO_MICROSECOND 1000000
#define STRAIN_GAUGE_PIN 36
#define MOVMEAN_SIZE 1500

uint32_t vec_movmean[MOVMEAN_SIZE];
hw_timer_t * timer;
portMUX_TYPE timer_mux;
volatile bool timer_interrupt;

void StartTimer(float freq);
void IRAM_ATTR OnTimerInterrupt();
float MovMean(uint32_t new_val, uint32_t *vec_values, uint32_t size);
bool SaveDataSPIFFS(float data);

void setup() {
    // Starting moving mean vector with zeros
    for(uint32_t i = 0; i < MOVMEAN_SIZE; i++){
        vec_movmean[i] = 0;
    }

    // Setting up timer interrupt to 10 hz
    StartTimer(10);
}

void loop() {
    -
    while (!timer_interrupt); // Waiting for the timer interrupt
    timer_interrupt = false; // Clearing interrupt flag

    uint32_t analog_value = analogRead(STRAIN_GAUGE_PIN); // Reading Analog value
    from the sensor

    float mean = MovMean(analog_value, vec_movmean, MOVMEAN_SIZE); // Calculating
    the mov mean
}

```

```

    SaveDataSPIFFS(mean); // Saving on flash memory
}

void StartTimer(float freq){
    uint32_t period = (1 / freq) * SECOND_TO_MICROSECOND;
    timerAttachInterrupt(timer, &OnTimerInterrupt, true);
    timerAlarmWrite(timer, period, true);
    timerAlarmEnable(timer);
}

void IRAM_ATTR OnTimerInterrupt(){
    // Setting interrupt flag
    portENTER_CRITICAL_ISR(&timer_mux);
    timer_interrupt = true;
    portEXIT_CRITICAL_ISR(&timer_mux);
    return;
}

float MovMean(uint32_t new_val, uint32_t *vec_values, uint32_t size){
    float mean = 0;
    for(uint32_t i = size - 1; i > 0; i--){
        vec_values[i] = vec_values[i - 1];
        mean += vec_values[i] / (float) size;
    }
    vec_values[0] = new_val;
    mean += vec_values[0] / (float) size;

    return mean;
}

bool SaveDataSPIFFS(float data){
    if(!SPIFFS.begin(true)){
        return false;
    }
    File file = SPIFFS.open("/data.bin", FILE_APPEND);
    file.write((uint8_t *)&data, sizeof(float));
    file.close();
    return true;
}

```