

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS - CCT
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

VITOR LUIS FERNANDES RIBEIRO

EXTENSOMETRIA APLICADA EM UM VEÍCULO BAJA

JOINVILLE

2019

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS - CCT
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

VITOR LUIS FERNANDES RIBEIRO

EXTENSOMETRIA APLICADA EM UM VEÍCULO BAJA

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Bacharelado em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina, para a obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Vidal Garcia Oliveira

JOINVILLE

2019

VITOR LUIS FERNANDES RIBEIRO

EXTENSOMETRIA APLICADA EM UM VEÍCULO BAJA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora

Orientador:

Prof. Dr. Sérgio Vidal Garcia Oliveira
UDESC

Membros:

Prof. Dr. Volney Coelho Vincence
UDESC

Prof. Dr. Joselito Anastácio Heerd
UDESC

Suplente Prof. Ms. Joaquim Rangel Codeço
UDESC

Joinville, 18 de Junho 2019.

Aos que sempre estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente ao meu pai, Romário e a minha mãe, Danielle. Pra mim sempre serão o Ro e a Dany. O amor, paciência e investimento em minha carreira acadêmica, foram fundamental. Obrigado por nunca terem desistido de mim. Espero poder orgulhá-los da mesma forma que me orgulho por tê-los como meus pais. Aos meus irmãos João Pedro e Luisa Helena, contem comigo para o que der e vier, seremos sempre nós. A minha namorada Ana Carolina que sempre me motivou e me apoiou em todos o momentos, obrigado.

Ao meu professor orientador, professor Dr. Sérgio Vidal Garcia Oliveira. Por toda paciência e auxílio na conclusão desse trabalho. Sua paciência e calma foram fundamentais para esse projeto acontecer. Aos meus amigos que estiveram sempre perto, Fernando Oliveira, Luis Gustavo Tafner e Mauro Murara obrigado. Vivenciaram de perto o que foi essa jornada e me ajudaram sempre.

Aos meus amigos de Apucarana, levo vocês para a vida toda.

Muito obrigado para todos os participantes do projeto UDESC Velociraptor Baja. Sem o auxílio de vocês este trabalho não teria acontecido. A todos os professores da Universidade do Estado de Santa Catarina que de certa forma se envolveram nesse trabalho e discutiram ideias e soluções.

“[...] Always tell the truth. Always take the high road. Live each day like it could be your last. Drink it in. Be adventurous, be bold, but savor it, It goes fast”
(Captain Fantastic)

RESUMO

Nas competições da Baja SAE Brasil, durante as competições são realizadas as apresentações de 7 subsistemas, sendo a eletrônica um deles. Com o objetivo de melhoria de projeto e consequentemente nas competições, a eletrônica deve-se obter dados e trata-los da melhor forma possível. A instrumentação eletrônica do veículo tem objetivo de dar suporte aos dispositivos que sejam adequadamente projetados, para isso será medido a deformação sofrida em peças críticas do carro. Esse estudo é chamado extensometria. Assim, o presente trabalho visa analisar e comparar as principais topologias de extensômetros e seus respectivos usos, e as principais técnicas existentes, visando introduzir a aplicação em um veículo baja, mostrando dados reais de esforços sofridos pelas peças mais críticas do protótipo. Nesse trabalho foi utilizado extensômetros PA-06-125BA-120-L. Para medir a diferença de potencial foi utilizado um amplificador de instrumentação, INA125p que amplificará a diferença de potencial na ponte de *Wheatstone*, com o uso de um algoritmo implementado em linguagem de programação C no microcontrolador ATmega328P e guardando os dados em cartão de memória.

Palavras-chave: Veículo Baja. Instrumentação eletrônica. Extensometria. Deformação.

LISTA DE FIGURAS

2.1	Diagrama tensão-deformação convencional e real (aço)(sem escala)	16
2.2	Desenho representativo dos tipos de extensômetros	17
2.3	Representação ponte de Wheatstone	18
2.4	Modelo 1/4 de ponte	20
3.1	Diagrama de blocos do funcionamento do sistema de medição	22
3.2	Esquemático do sistema de medição	24
3.3	PCB da placa da extensometria	24
3.4	Vista superior da placa do sistema de medição	25
4.1	Chapa de aço 1020 com extensômetro colado	26
4.2	Gráfico de deformação teórica e prática	27
4.3	Teste no laboratório com presa hidráulica	28
4.4	Teste no laboratório obtido através do circuito projetado	29
5.1	Localização dos links traseiros do veículo(peças metálicas)	30
5.2	Links prontos para colagem	31
5.3	Extensômetro colado	31
5.4	Extensômetro colado e protegido contra choques mecânicos	32
5.5	Deformação sofrida durante o primeiro teste	33
5.6	Deformação sofrida durante o segundo teste	33

LISTA DE TABELAS

4.1 Comparativo da deformação obtida através da teoria e prática.	27
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CVT	<i>Continuous variable transmission</i>
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso

LISTA DE SÍMBOLOS

ε	Deformação
δ	Varição de comprimento [m]
σ	Tensão [Pa]
R	Resistência [Ω]
R_0	Resistência Inicial [Ω]
Δ_R	Varição de resistência [Ω]
L_0	Comprimento inicial [m]
L	Comprimento [m]
K	Constante de deformação
E	Módulo de Young ou Módulo de elasticidade [Pa]
A	Área [m ²]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Equipe Velociraptor Baja	12
1.2	Instrumentação eletrônica no veículo	13
1.3	Objetivo Geral	14
1.4	Objetivos específicos do projeto	14
2	CONCEITOS FUNDAMENTAIS	15
2.1	Tensão e deformação mecânica	15
2.2	Transdutores de força	17
2.3	Ponte de Wheatstone	18
3	SISTEMA DE MEDIÇÃO PROPOSTO	22
3.1	Amplificador de Instrumentação	23
3.2	Microcontrolador e Algoritmo	23
3.3	Circuito eletrônico embarcado proposto	23
4	RESULTADOS DE BANCADA	26
5	TESTES NO VEÍCULO	30
5.1	Colagem do extensômetro	31
6	DISCUSSÕES E CONCLUSÃO	34
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35
	ANEXO A – Glossário	36
	ANEXO B – Algoritmo do micro controlador	37

1 INTRODUÇÃO

Apresentar-se-á a seguir o projeto Baja, desde início das competições Internacionais até a chegada das mesmas para o Brasil e a formação da Equipe Velociraptor Baja Udesc, mostrando como se estrutura atualmente. Uma breve explicação de como se encontra a eletrônica embarcada em veículos e por fim, será mostrado os objetivos gerais e específicos do projeto.

1.1 EQUIPE VELOCIRAPTOR BAJA

O veículo Baja une os desafios de engenharia mecânica e elétrica para construir um veículo que suporte as adversidades de um terreno *off-road*. Os objetivos da Baja SAE são estimar, simular e construir um veículo protótipo construído pela própria equipe, tendo como requisitos respeitarem normas de segurança e que ofereça vantagens sobre os outros competidores, tanto na parte de projetos como na parte financeira.

O projeto Baja SAE foi criado na Universidade da Carolina do Sul, Estados Unidos, sendo que a primeira competição ocorreu em 1976, contando com 10 carros na inauguração. Em 1995 foi realizada a primeira competição nacional na cidade de São Paulo. A partir de então a competição expandiu para competições nacionais e regionais, sendo elas: etapa sul, sudeste e nordeste. Além da competição nacional que acontece em São José dos Campos, São Paulo.

O programa Baja SAE BRASIL é um desafio lançado aos estudantes de Engenharia que oferece a chance de aplicar na prática os conhecimentos adquiridos em sala de aula, visando incrementar sua preparação para o mercado de trabalho. Ao participar do programa Baja SAE, o aluno se envolve com um caso real de desenvolvimento de um veículo *off-road*, desde sua concepção, projeto detalhado, construção e testes (BAJA SAE BRASIL, 2017).

Na competição da SAE Brasil, o protótipo se deparará com 2 etapas para estar apto a competir. A primeira etapa é chamada de segurança estática, o carro é submetido a uma criteriosa análise, identificando se todos os componentes estão dentro das regras de segurança imposta. A segunda parte é a segurança dinâmica, frenagem. Em seguida começam as provas dinâmicas (frenagem, aceleração, conforto, suspensão e tração, manobrabilidade). E por fim, o Enduro onde o veículo é colocado para competir em um circuito fechado com terreno *off-road* com duração de 4h nas competições nacionais e 3h nas competições regionais.

A equipe UDESC Velociraptor Baja teve início em 1998 com o atual coordenador do projeto, professor Nicodemus Neto da Costa Lima. Atualmente a equipe é formada por 36

alunos de cursos incluindo engenharia mecânica e elétrica. A equipe se divide em dois grupos chamados subsistemas de projeto e administrativos. Os subsistemas de projeto são: eletrônica, suspensão traseira, suspensão dianteira e direção, transmissão, freio, CVT, design. Já os subsistemas administrativos: plano de negócios, administração, gestão de projetos e financeiro.

1.2 INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA NO VEÍCULO

A aplicação da instrumentação eletrônica tem como objetivo complementar os experimentos desenvolvidos, assim como, comprovar a eficácia dos materiais utilizados em um determinado experimento. A instrumentação eletrônica serve como suporte para a validação de cálculos ou algoritmos pré-estipulados via software computacional. Os processos de comprovação levam à necessidade de medição de grandezas que remetem às teorias e leis que fundamentam a ciência (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2013).

Para a indústria automobilística, a aplicação de transdutores serve para quantificar a eficácia dos materiais utilizados. O uso de extensômetros- fitas resistivas que variam sua resistência conforme aplicado uma deformação sobre o mesmo; podem servir como meio de determinar a flambagem, quando o material perde sua forma via esforço de compressão axial; ou cisalhamento, quando o material empregado rompe-se ou perde sua rigidez. Com isso, o emprego apropriado de outros instrumentos para medição de parâmetros físicos, tais como: fluxo, pressão, temperatura, nível, deslocamento; retorna para a indústria automotiva, veículos com maior nível de segurança. A importância da Instrumentação poderia ser resumida em uma frase: “A medição é a base do processo experimental”; seja em um processo que deve ser controlado, seja em pesquisa ou uma linha de produção dentro de uma indústria, o processo da medição de grandezas físicas é fundamental (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2013).

Em todas as competições as equipes buscam vencer a competição, para isso é necessário um projeto bem planejado e organizado. Após as etapas de segurança é feita uma apresentação de todo projeto desenvolvido para o desenvolvimento do protótipo para juízes que analisarão e darão notas para a apresentação. Nesse momento é importante que os integrantes dos subsistemas de estruturas justifiquem o dimensionamento de tubos e peças. Com esse intuito é essencial que saibam quais são os valores das forças atuantes no sistema.

Os maiores desafios em medir a deformação em uma peça de um protótipo baixa são um sinal de saída muito pequeno em decorrência da mínima deformação sofrida pelo material, causando a necessidade de um grande ganho, necessidade de colagem do extensômetro com precisão, ocorrência de pequenas variações encontradas mesmo em resistores de precisão.

1.3 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um sistema de medição capaz de conseguir mensurar com exatidão as máximas forças exercidas em peças críticas enquanto o veículo está em movimento usando amplificador operacional INA125p.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS DO PROJETO

Os objetivos específicos deste trabalho de conclusão de curso envolvem:

- Investigar as soluções disponíveis para medição de deformação;
- Realizar testes de validação da solução proposta;
- Realizar testes no veículo em movimento.

2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Nesse capítulo serão introduzidos alguns conceitos necessários para o entendimento do que será executado durante todo o projeto. Será também mostrado como se relaciona a relação entre deformação e variação de tensão sofrida em um extensômetro.

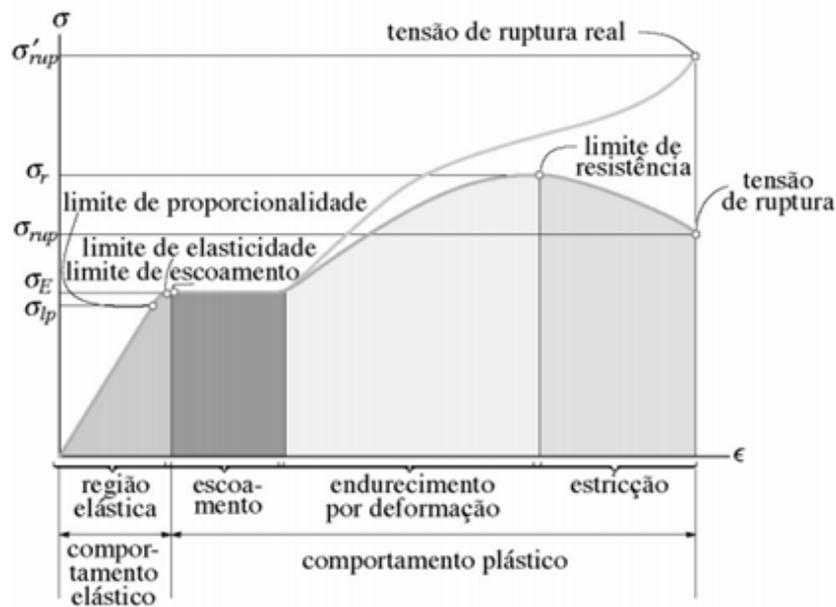
2.1 TENSÃO E DEFORMAÇÃO MECÂNICA

Sempre que uma força é aplicada a um corpo, esta tende a mudar a forma e o tamanho dele. Essas mudanças são denominadas deformações e podem ser altamente visíveis ou praticamente imperceptíveis se não forem utilizados equipamentos que façam medições precisas (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2013).

Segundo R.C.Hibbeler (2010), 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 variação de comprimento total desse corpo, denotada por δ , é dada pela diferença entre o comprimento original L_0 do corpo e o comprimento final L_f após a aplicação da força axial no corpo. O alongamento $\delta = L - L_0$ entre as marcas no corpo de prova também pode ser medido por meio de um calibre ou por um dispositivo mecânico ou óptico denominado extensômetro (GHAVAMI, 2015).

Segundo Balbinot e Brusamarello (2013) e R.C.Hibbeler (2010), 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. A Figura 2.1 mostra a curva de tensão mecânica σ por deformação relativa ε de um corpo genérico.

Figura 2.1 – Diagrama tensão-deformação convencional e real (aço)(sem escala)



Fonte: (R.C.HIBBELER, 2010)

Da mesma maneira, a deformação nominal, ou deformação de engenharia, é determinada diretamente pela leitura da deformação no extensômetro, ou dividindo a variação δ , no comprimento de referência do corpo de prova, pelo comprimento de referência original do corpo de prova, L_0 . Aqui consideramos que a deformação é constante em toda a região entre os pontos de calibragem. Assim

$$\epsilon = \frac{\delta}{L_0} \quad (2.1)$$

O diagrama tensão-deformação para a maioria dos materiais de engenharia exibe uma relação linear entre tensão e deformação dentro da região elástica. Por consequência, um aumento na tensão provoca um aumento proporcional na deformação. Esse fato foi descoberto por Robert Hook, em 1676, para molas, e é conhecido como Lei de Hook e pode ser expresso matematicamente como:

$$\sigma = E\epsilon \quad (2.2)$$

Na equação (2.3), E representa a constante de proporcionalidade denominada módulo de elasticidade ou módulo de Yuong (R.C.HIBBELER, 2010).

2.2 TRANSDUTORES DE FORÇA

O extensômetro elétrico trata-se de um sensor elétrico cujo princípio de funcionamento é baseado na variação da resistência quando submetido a uma deformação. Essa variação de resistência pode ser medida com precisão e correlacionada com o valor da tensão aplicada e conseqüentemente com a deformação decorrente a essa mesma tensão sofrida pela peça. Também chamados de *strain gages* (ver Anexo A, Glossário) utiliza como elemento sensível um fio resistivo que transforma uma variação de comprimento em variação de resistência elétrica. Isso leva a uma análise quantitativa da distribuição de deformação sob condições reais de operações.

As medidas de deformação assumem que a extensão decorrente no objeto é transferida sem perdas para o extensômetro, então deve existir uma ótima aderência entre eles. As medições se dão nas partes externas da peça, pois o extensômetro normalmente é aplicado na superfície.

O princípio de trabalho do extensômetro de metal está baseado na relação deformação/resistência do condutor elétrico. Todo condutor elétrico muda sua resistência elétrica quando submetidos a tensões mecânicas, sejam compressivas ou trativas (R.C.HIBBELER, 2010).

São duas as causas dessa variação: uma devido à deformação do condutor, e outra pela variação na resistividade do material condutor. Constatou-se que havia variação na resistividade de fios metálicos quando os mesmos apresentavam deformação, a variação relativa da resistência $\Delta R/R_0$ relaciona-se linearmente com a variação relativa do comprimento $\Delta L/L_0$. O valor de k é constante de deformação na região elástica do material.

$$\frac{\frac{R}{R_0}}{\frac{L}{L_0}} = k = \frac{R}{R_0} \cdot \frac{L_0}{L} = \frac{R}{R_0} \cdot \frac{1}{\epsilon} \quad (2.3)$$

Na Figura 2.2 tem-se imagem de vários tipos de extensômetros:

Figura 2.2 – Desenho representativo dos tipos de extensômetros

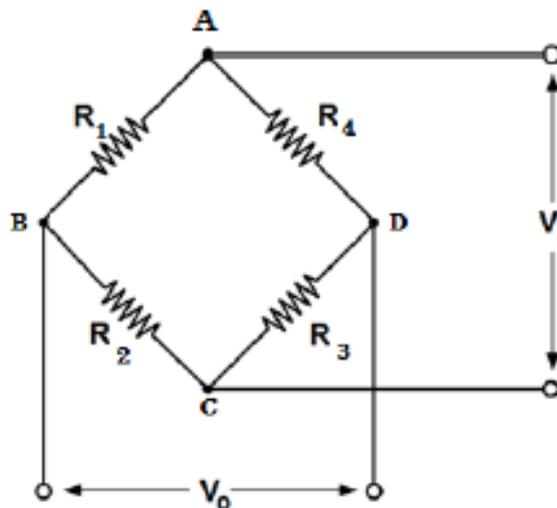


Fonte: Adaptado livremente de Excel Sensores, 2019

2.3 PONTE DE WHEATSTONE

A variação de resistência que acontece em um extensômetro é muito pequena, na ordem de milésimos de ohms. Por exemplo, em um extensômetro com *fator gage* de 2 e resistência nominal de 200 Ohms, sofrendo uma deformação de $100\mu\text{m/m}$ sofreria uma variação de 0,04 Ohms. Por isso é necessário uma maneira de se mensurar esta variação de modo confiável. Segundo (MORRIS, 2012) um dos métodos utilizados é um circuito em ponte de *Wheatstone*, mostrado abaixo na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Representação ponte de Wheatstone



Fonte: Adaptado de (R.C.HIBBELER, 2010)

A ponte de *Wheatstone* é um circuito que se presta para medir variações relativas de resistência elétrica. O balanço da ponte depende da disposição das resistências “iguais” de cada um dos braços da ponte, ou seja, (R_1 e R_2) e (R_3 e R_4).

Pode-se dispor do método em Ponte de *Wheatstone*, podendo estarem rearranjada das formas 1/4 de ponte, evidentemente que o sinal será bem menor, necessitando de mais amplificação, e podendo ter mais influências de temperatura e ruídos, mas nada impede seu funcionamento.

Tem-se a possibilidade de usar diferentes topografias chamada, sendo elas 1/4 quando se utilizam três resistores e apenas um extensômetro, tem-se o chamado meia ponte onde são utilizados dois extensômetros e também a possibilidade de utilização do ponte completa, contendo quatro extensômetros na ponte (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

Usando 1/4 de ponte os demais componentes da ponte tem valores pré definidos, pois são resistores de precisão com valores fixos. Nessa configuração, apenas com um dos braços

da ponte de *Wheatstone* sofrerá variação, o outro continuará em equilíbrio, sem variação de resistência.

Analisando o circuito da Figura 2.3, e assumindo que o dispositivo medidor de tensão elétrica V_0 é de alta impedância de entrada, tem-se que V_{abc} é igual ao V_{adc} . Pela Lei de Ohm, deduz-se:

$$V_{abc} = I_{abc}R_1 = V_i \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (2.4)$$

$$V_{adc} = I_{adc}R_4 = V_i \frac{R_4}{R_4 + R_3} \quad (2.5)$$

Então a tensão de saída “ V_0 ” será:

$$V_0 = V_i \frac{R_1R_3 - R_2R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (2.6)$$

Com a ponte balanceada, ou seja, $V_0 = 0$, tem-se:

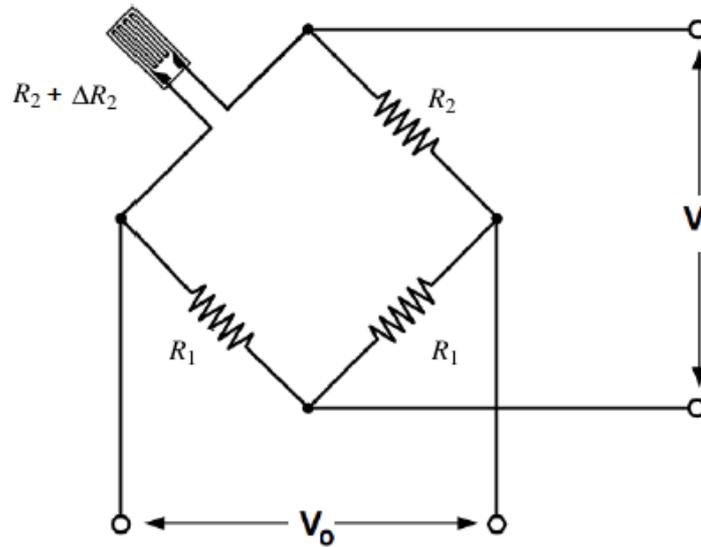
$$V_0 = V_i \frac{R_1R_3 - R_2R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} = 0 \quad (2.7)$$

Se todas as resistências forem iguais, teremos:

$$R_1R_3 = R_2R_4 \quad (2.8)$$

O balanço da ponte depende da disposição das resistências “iguais” de cada um dos braços da ponte, ou seja, (R_1 e R_2) e (R_3 e R_4). No caso da topologia proposta será feito o arranjo chamado de 1/4 de ponte, onde coloca-se apenas um extensômetro e três resistores, como é possível ver na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Modelo 1/4 de ponte



Fonte: Adaptado de (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2013)

Considerando a configuração que foi utilizada no projeto tem-se resistor R_1 e R_2 resistores de precisão e o $R_2 + \Delta R_2$ é a representação de extensômetro de valor R_2 mais uma variação de resistência que o mesmo sofrerá.

$$V_0 = V_i \left(\frac{R_2 + \Delta R}{R_1 + R_2 + \Delta R} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (2.9)$$

Utilizando o lado direito da Equação 2.4 tem-se:

$$\varepsilon K = \frac{dR}{R} \quad (2.10)$$

$$\Delta R = \varepsilon K R_2 \quad (2.11)$$

Substituindo na Equação 2.10:

$$\frac{V_0}{V_{in}} = \frac{R_1 \varepsilon K R_2}{(R_1 + R_2 + \varepsilon K R_2)} \quad (2.12)$$

$$V_0 R_1^2 + V_0 R_1 R_2 + V_0 R_1 R_2 + V_0 R_2^2 = \varepsilon R_1 R_2 K V_{in} - \varepsilon (V_0 K R_2^2 + V_0 K R_1 R_2) \quad (2.13)$$

Isolando o ε :

$$\varepsilon = V_0 \frac{R_1^2 + 2R_1 R_2 + R_2^2}{K(R_1 R_2 V_{in} - V_0 R_2^2 - R_1 R_2)} \quad (2.14)$$

$$\varepsilon = V_0 \frac{(R_1 + R_2)^2}{K R_2 (R_1 V_{in} - V_0 R_2 - V_0 R_1)} \quad (2.15)$$

Mostrado então o equacionamento de uma ponte de *Wheatstone*, e utilizando a topologia de um extensômetro na ponte, e obtendo a equação que mostrará o objetivo final, a deformação sofrida na peça.

Após a demonstração das equações do arranjo é possível obter a relação de deformação através das variáveis do sistema. Isso será necessário para obter as forças atuantes no sistema, conseguindo assim medir a deformação sofrida pela peça.

3 SISTEMA DE MEDIÇÃO PROPOSTO

Como um primeiro estudo sendo feito será utilizado apenas um extensômetro por ponte e resistores de precisão nos outros dois pontos, no quarto e último ponto será utilizado um *trimpot* a fim de conseguir um ajuste fino do balanceamento da ponte. Foi estipulado que o circuito deverá atender às seguintes especificações:

- Permitir ajuste fino no balanceamento da ponte de Wheatstone;
- Permitir que o ganho do sinal possa ser ajustado de maneira simples;

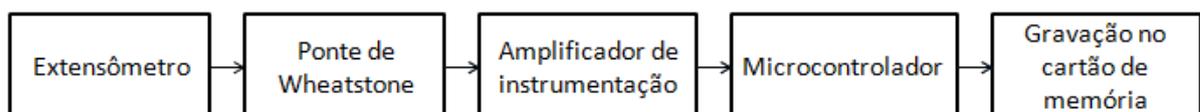
Portanto, para esse trabalho, para a medição da deformação de forma indireta, desenvolveu-se:

- Hardware e Software para manipulação dos dados do sensor;
- Testes em bancada;
- Testes no veículo em movimento.

Para análise dos esforços mecânicos, foi utilizada somente uma ponte de *Wheatstone* com um extensômetro e dois resistores de precisão e um *trimpot* a fim de calibrar a ponte e obter um valor de tensão entre os pontos A e B mais próximo a zero. O extensômetro foi posicionado perpendicularmente em relação a principal deformação, dessa forma é capaz de medir as principais deformações devido ao Efeito Poisson, e também tornar a ponte menos sensível a variações térmicas (R.C.HIBBELER, 2010).

A tensão elétrica de saída da ponte de *Wheatstone* é a diferença de tensão elétrica entre os nós centrais, B e D, da ponte que irão para o Amplificador operacional.

Figura 3.1 – Diagrama de blocos do funcionamento do sistema de medição



Fonte: Próprio autor, 2019

3.1 AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTAÇÃO

O amplificador de instrumentação é um circuito eletrônico que possui um grande ganho em malha aberta, possuindo dois terminais de entrada diferenciais e uma saída. Estudando as configurações dos amplificadores operacionais, pode-se introduzir uma malha de controle do ganho do amplificador.

Para esse trabalho, empregado o amplificador de instrumentação recebendo os dois lados da ponte de *Wheatstone* e adicionando um ganho que será estudado para melhor desempenho. Através do *datasheet* é possível encontrar a tabela de relação de resistor e ganho, o sinal de saída do amplificador de instrumentação, é amplificado com ganho $V_O = (V_{IN+} - V_{IN-})G$ onde $G = 4 + 60k\Omega/RG$.

O amplificador INA125p se destaca como amplificador operacional por ter ganhos de 4 a 10.000, tem baixa tensão de *offset* ($250\mu V$), para alimentação da ponte de *Wheatstone* tem tensão de referência de precisão (bandgap) e alta rejeição de modo comum (100dB at $G = 100$). Por poder operar tanto em *dual supply* e *single supply* foi de grande diferencial, pois no protótipo baja o sistema é alimentado por uma bateria de 7,4V com isso o sistema pode ser alimentado enquanto está em movimento. A alimentação da ponte foi escolhida de 5V pois a bateria usada no veículo é de 7,4V e a tensão de alimentação da ponte deve ser 1,25V abaixo da tensão de referência.

3.2 MICROCONTROLADOR E ALGORITMO

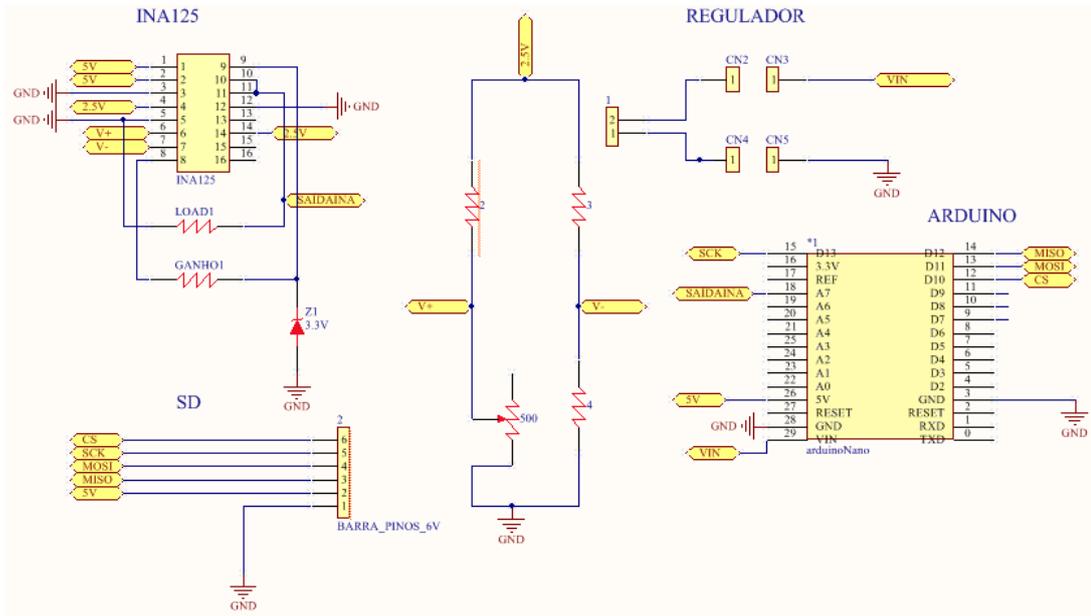
O microcontrolador utilizado foi o ATmega328P, Arduino Nano. Possui linguagem de programação em C, a escolha de utilização desse microcontrolador foi dada pelo conhecimento prévio do micro controlador, facilidade de obtenção no mercado nacional, baixo custo e vasta quantidade de bibliotecas na rede mundial de computadores.

A programação desenvolvida foi escrita no próprio ambiente de desenvolvimento da empresa que desenvolve o Arduino.

3.3 CIRCUITO ELETRÔNICO EMBARCADO PROPOSTO

Todo o circuito foi desenvolvido em Altium checando o *datasheet* do amplificador INA124p e do Arduino. Ao final do projeto chegou-se ao esquemático representado na Figura 3.2.

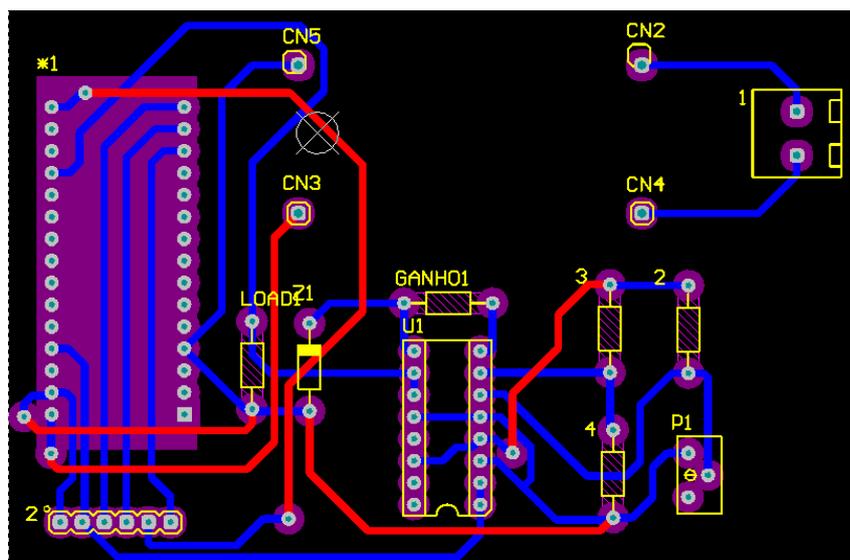
Figura 3.2 – Esquemático do sistema de medição



Fonte: Próprio autor, 2019

Na Figura 3.2 apresenta: 2, 3, 4 e 500 como os resistores da ponte de Wheatstone, alimentada pelo INA125p através de sua saída fixada de 2,5V. Tem-se também a barra de pinos onde será fixado o cartão de memória para o armazenamento dos dados e o regulador de tensão que alimentará o amplificador de instrumentação e o Arduino. A Figura 3.3 mostra a PCB projetada.

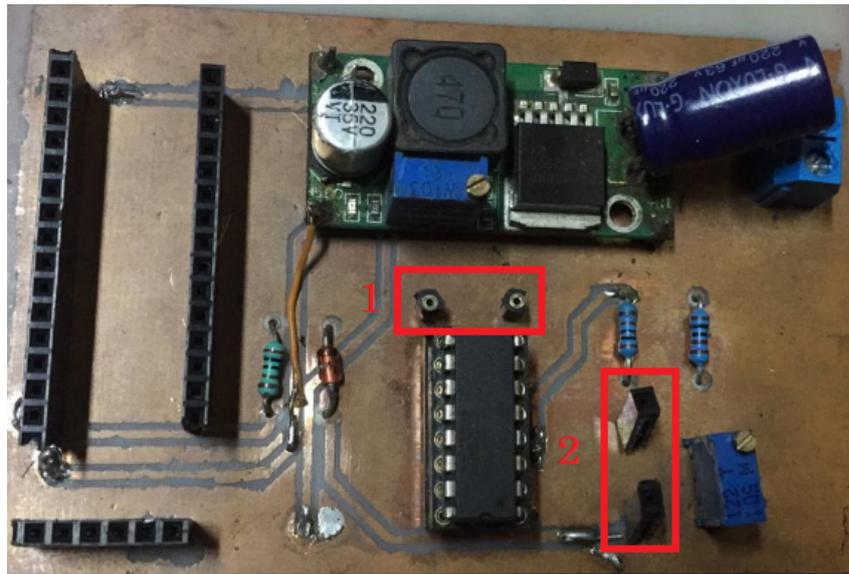
Figura 3.3 – PCB da placa da extensometria



Fonte: Próprio autor, 2019

A Figura 3.4 mostra a placa em circuito impresso projetada para a realização dos testes em bancada e no veículo:

Figura 3.4 – Vista superior da placa do sistema de medição



Fonte: Próprio autor, 2019

A região 1 se trata dos pinos que serão colocados os diferentes resistores de ganhos, facilitando assim os testes com ganhos variados. A região 2 são os pinos onde será colocado o extensômetro.

Quando a região que o extensômetro está colado sofrer deformação, causará assim uma alteração na tensão da ponte a qual será obtida através dos pinos 6 e 7 do INA125p, que após atuar com o ganho (que poderá ser escolhido pelo usuário através de da fórmula encontrada no datasheet $G = 4 + 60k\Omega/RG$) enviará os dados para o Arduino e gravará no cartão de memória.

Para tratamento dos dados foi feita uma planilha no Excel para facilitar o desenvolvimento e visualização de gráficos e dados.

4 RESULTADOS DE BANCADA

Os testes de bancada foram realizados primeiramente para verificar se os circuitos eletrônicos, transdutores e algoritmos estavam funcionando como esperado, aplicando pesos conhecidos e comparando os resultados obtidos no Arduino e comparando com os resultados teóricos.

Para os testes de bancada, com o intuito de conseguir ter acesso aos dados em tempo real, foi conectada a placa diretamente ao computador, conseguindo acessar os dados através do serial do Arduino. Balança digital de precisão de 1g e carga máxima de 5Kg da marca *Jiamyu* modelo NS-0692 utilizada para medir os pesos usados para causar a deformação na chapa metálica.

A figura 4.1 mostra o extensômetro colado em uma chapa de aço 1020 para ser feito o teste de validação em bancada. Para fixação da chapa metálica foi utilizado um sargento fazendo com que a régua ficasse engastada sem nenhum movimento possível.

Figura 4.1 – Chapa de aço 1020 com extensômetro colado

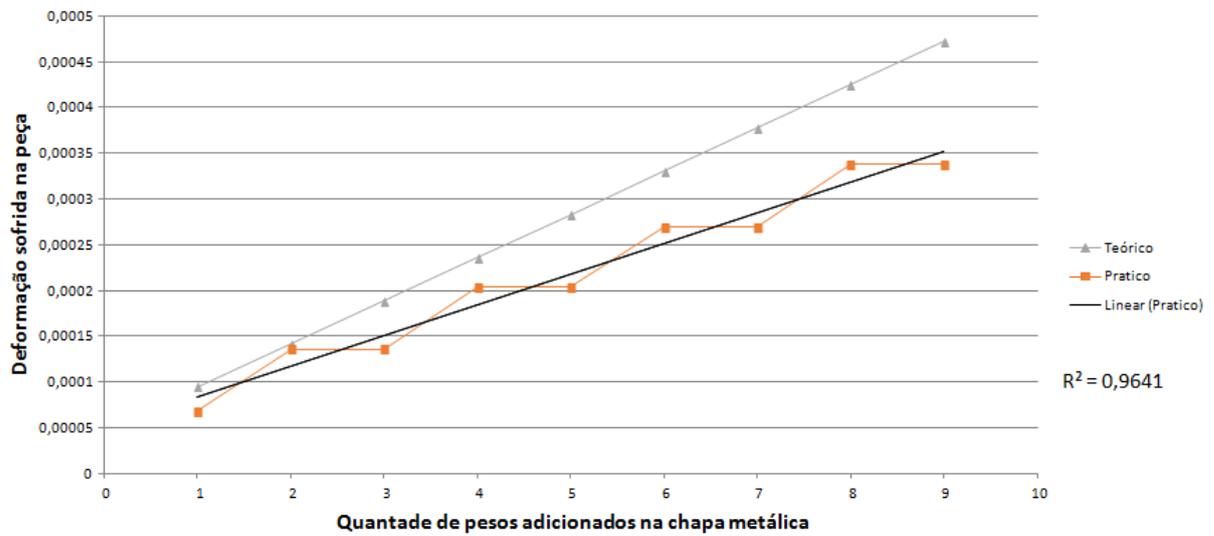


Fonte: Próprio autor, 2019

Na figura 4.1 encontra-se a chapa metálica, onde no teste foram colocados chapas de 50g, tendo alteração a cada 100g, ou seja duas chapas. A cada acréscimo de pesos foram anotados os valores obtidos para serem comparados com a equação teórica.

Na Figura 4.2 tem-se o gráfico retirado através do teste em bancada.

Figura 4.2 – Gráfico de deformação teórica e prática



Fonte: Próprio autor, 2019

Através do gráfico é possível enxergar o padrão que o gráfico deveria seguir, um gráfico linear. A sensibilidade obtida foi de 100g, ou seja, ocorre deformação com 50g mas o sistema estava conseguindo quantificar a deformação sofrida a partir de 100g.

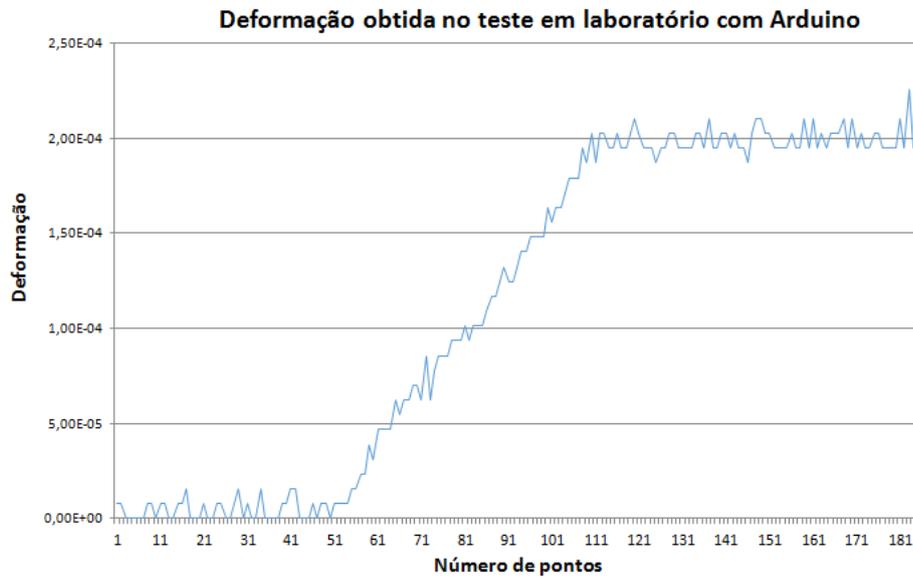
Através do coeficiente de aproximação foi possível obter um R^2 igual a 0,9641 significando que a curva da pratica consegue explicar a curva teórica em 96,41% como é possível ver na Tabela 4.1:

Tabela 4.1 – Comparativo da deformação obtida através da teoria e prática.

Dados Prático	Dados Teórico
$6,78 \times 10^{-5}$	$9,43 \times 10^{-5}$
$1,36 \times 10^{-4}$	$1,42 \times 10^{-4}$
$1,36 \times 10^{-4}$	$1,89 \times 10^{-4}$
$2,03 \times 10^{-4}$	$2,36 \times 10^{-4}$
$2,06 \times 10^{-4}$	$2,82 \times 10^{-4}$
$2,70 \times 10^{-4}$	$3,30 \times 10^{-4}$
$2,70 \times 10^{-4}$	$3,77 \times 10^{-4}$
$3,38 \times 10^{-4}$	$4,25 \times 10^{-4}$
$3,38 \times 10^{-4}$	$4,72 \times 10^{-4}$

Fonte: Próprio autor

Figura 4.4 – Teste no laboratório obtido através do circuito projetado



Fonte: Próprio autor, 2019

Quando comparado os resultados dos testes feitos no laboratório da prensa com o do Arduino, percebe-se que o software utilizado no laboratório tem uma taxa de atualização muito maior do que a utilizada na programação deste trabalho (500ms). Quando comparados os resultados foram obtidos valores divergiam na ordem de grandeza, deixando esse teste sem capacidade de validação.

5 TESTES NO VEÍCULO

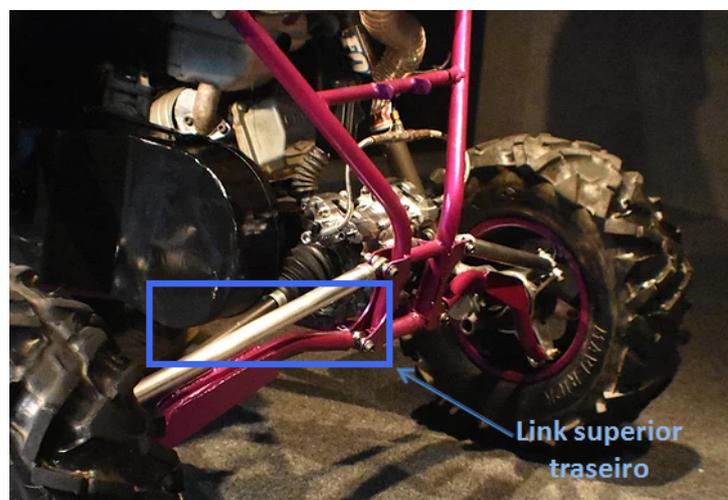
Utilizou-se de uma bateria de Li-Po Gens ACE de 7600mAh com duas células de 7,4V alimentando todo o sistema enquanto ocorria o teste.

Para correta colagem do extensômetro no link traseiro do protótipo, primeiramente foi limpa toda a sujeira existente com água e estopa. Em seguida para retirada de qualquer substância e gordura ainda existente foi aplicado estopa com álcool, deixando assim a superfície pronta para a colagem.

Com o carro totalmente em repouso, conseqüentemente com sua estrutura sofrendo apenas os esforços do próprio carro, o extensômetro foi colado no link superior traseiro com Cianoacrilato (CA), comercialmente conhecidas como Three Bond, M-200 e Scotch Bond 3M. Apresentam como principais característica cura em pouco tempo (30 segundos) e após o processo de cura tornam-se relativamente rígidas. Utilizou-se o mínimo de cola necessária e uso de pinças no manuseio, para que não fosse danificado nem que fosse necessário fazer qualquer tipo de pressão em cima dele. Para não ter nenhum tipo de implicação na resistência dos fios que conectam o extensômetro a placa de medição, foi deixada a placa o mais perto possível, anexando-a na traseira do carro.

O carro foi levado para a pista de testes, onde a pista é mais acidentada, conseqüentemente toda a estrutura do carro sofrerá maior estresse. Os dados foram gravados em cartão de memória para posteriormente serem levados para o Excel e serem calculados os deslocamentos.

Figura 5.1 – Localização dos links traseiros do veículo(peças metálicas)



Fonte:Próprio autor, 2018

5.1 COLAGEM DO EXTENSÔMETRO

Primeiramente foi limpo o link traseiro do veículo, tirando todos os tipos de impureza encontrados no local. Após a superfície estar completamente limpa foi aplicado álcool para a retirada de qualquer tipo de gordura que ainda restava no link.

Figura 5.2 – Links prontos para colagem



Fonte:Próprio autor, 2019

Para a colagem do extensômetro foram usados pinças de pontas finas para manuseio do mesmo, evitando que qualquer tipo de pressão fosse feita em cima ou em qualquer outra parte da grade do extensômetro. Foi colocado a menor quantidade de cola possível para fixa-lo, mas ainda assim fazendo com que ficasse inteiramente colado e sem que a cola fosse para cima do extensômetro como é mostrado na Figura 5.3.

Figura 5.3 – Extensômetro colado



Fonte:Próprio autor, 2019

Para manter a integridade do extensômetro foi colocado silicone em cima do mesmo, sem pressiona-lo, apenas como medida de proteção contra choques mecânicos, como é possível ver na Figura 5.4.

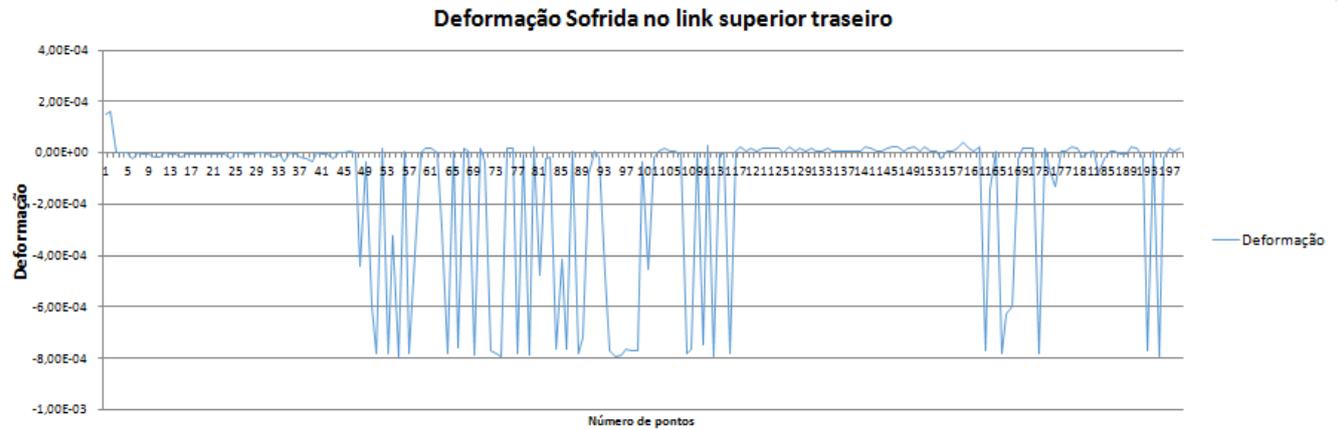
Figura 5.4 – Extensômetro colado e protegido contra choques mecânicos



Fonte:Próprio autor, 2019

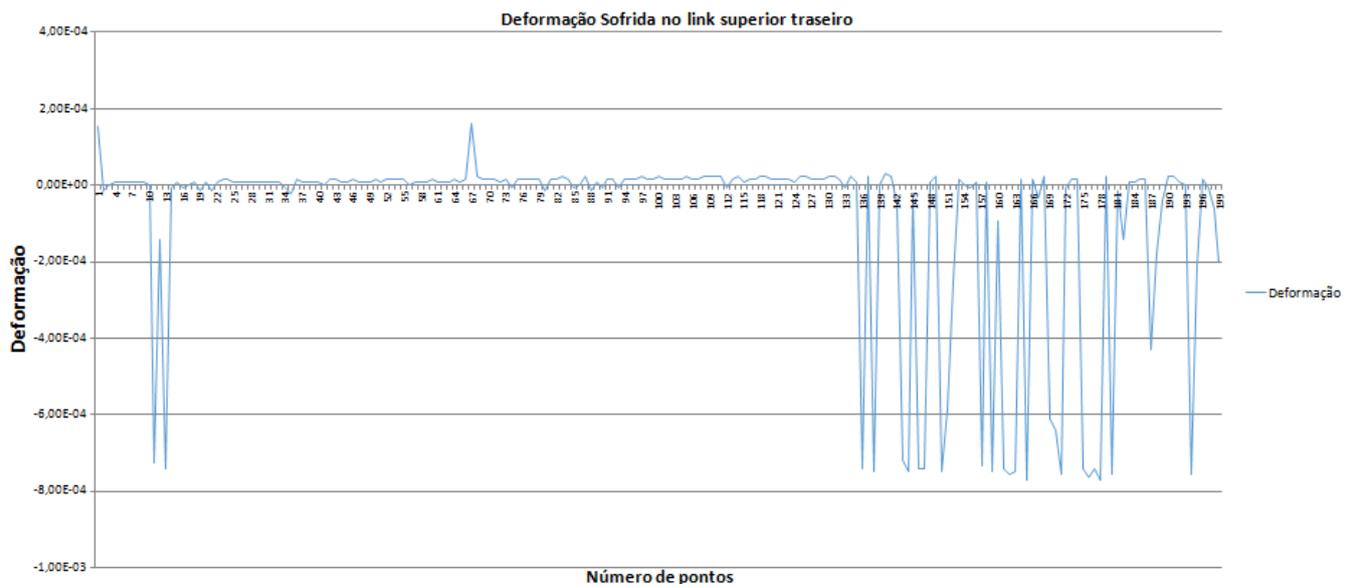
Durante os testes com o veículo em movimento, foi fixada a placa da extensometria juntamente com a bateria na traseira do carro, deixando o sistema mais perto do extensômetro, tendo menor necessidade de cabos compridos. A partir do momento ligado, os dados começaram a ser obtidos e gravados no cartão de memória para serem tratados posteriormente. O carro passou por obstáculos que exigissem maior esforço das peças, como por exemplo troncos e meio fios. As figuras 5.5 e 5.6 mostram os dados já tratados, ou seja, os valores de deformação sofridos pelo link:

Figura 5.5 – Deformação sofrida durante o primeiro teste



Fonte: Próprio autor, 2019

Figura 5.6 – Deformação sofrida durante o segundo teste



Fonte: Próprio autor, 2019

Os gráficos contendo 200 dados, mostram variação positiva e negativa, isso acontece pois o extensômetro pode estar sofrendo forças de tração (parte positiva do eixo y) ou compressão (parte negativa do eixo y), ou seja, esta aumentando ou diminuindo sua resistência, alterando dessa forma a tensão para cima ou para baixo. A maior deformação atingida foi cerca de $7,56E - 4$ para o primeiro gráfico e $7,95E - 4$ para o segundo gráfico.

6 DISCUSSÕES E CONCLUSÃO

Através da revisão bibliográfica observaram-se os principais meios e métodos de sensoriamento de uma forma geral. Como o objetivo desse trabalho é aplicar a extensometria em um veículo Baja e o qual também carece de informações na literatura sobre equipes ou estudantes que também o fazem, a proposta presente ficou incumbida de conseguir mensurar com precisão a deformação sofrida em peças críticas enquanto o protótipo encontrava-se em movimento.

Com o decorrer do trabalho, os resultados dos testes propostos em bancada apresentaram uma solução viável para mensurar a deformação exercida sobre a peça medida, contando que para tais testes, todo o sistema permanece em repouso, ou seja o teste em bancada, é possível ter o dado com certa precisão.

Durante o trabalho foram encontradas dificuldades em conseguir obter um sinal de grande confiabilidade, por conta do sinal de saída ser da ordem de milivolts. Como o extensômetro é objeto muito sensível foi de extrema importância o cuidado com o manuseio, necessitando do uso de pinças com pontas finas e cuidado ao fazer a colagem, cuidando para não ter muita nem pouca cola no momento da colagem. Também foi preciso muita atenção no momento da colagem, para garantir que toda a base do extensômetro esteja colado totalmente na superfície, tendo a certeza de que esta bem colado, conseguindo passar toda a deformação sofrida pela peça.

Como trabalhos futuros, pode-se empregar uma nova topologia para a ponte de *Wheatstone*, ou seja, usar dois ou mais extensômetros em uma mesma ponte de *Wheatstone*, isso pode trazer mais precisão para o trabalho. Para estudos em outras peças ou em outros locais do veículo, deve-se estudar a direção forças atuantes e utilizar outros modelos de extensômetro, como por exemplo as chamadas rosetas, as quais conseguem mensurar forças em vários sentidos.

Estudar um novo amplificador operacional que tenha melhores propriedades de ganho, uma possível solução poderia ser o uso INA111, por ter maior capacidade de ganho e ainda assim conseguir ter grande precisão e desempenho. E também estudar como melhorar o sinal que será recebido aplicando módulos e filtros.

Para medir forças atuando em várias partes do veículo, usando assim vários extensômetros, usar multiplexadores analógicos, como por exemplo o multiplexador CD4051, multiplexando assim várias pontes de *Wheatstone* sem a necessidade de ter que usar mais amplificadores operacionais e reguladores de tensão, diminuindo custo e espaço na placa PCB.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEXANDER, C.; SADIKU, M. N. O. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. 5. ed. [S.l.]: Elsevier, 2013.
- BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**. 2. ed. [S.l.]: Gen, 2013.
- DEZUO, T. J. M.; TROFINO, A.; SCHARLAU, C. C. Switching rule design for sector-bounded nonlinear switched systems. In: **Proceedings of 19th International Federation of Automatic Control (IFAC) World Congress**. Cape Town, South Africa: [s.n.], 2014. p. 4074–4079.
- GHAVAMI, P. **MECHANICS OF MATERIALS, AN INTRODUCTION TO ENGINEERING TECHNOLOGY**. 1. ed. [S.l.]: Springer, 2015.
- MORRIS, A. S. **MEASUREMENT AND INSTRUMENTATION: THEORY AND APPLICATION**. 1. ed. [S.l.]: Elsevier, 2012.
- R.C.HIBBELER. **Resistência dos Materiais**. Prentice hall brasil. Brasília, Brazil: Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 2010.
- TROFINO, A.; SCHARLAU, C. C.; DEZUO, T. J. M.; DE OLIVEIRA, M. C. Stabilizing switching rule design for affine switched systems. In: **50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference**. Orlando, USA: [s.n.], 2011. p. 1183–1188.

ANEXO A – Glossário

- **Escoamento:** Comportamento de um material devido a uma força ou esforço aplicado não voltando totalmente para sua forma original.
- **Endurecimento por deformação:** Fenômeno modificativo da estrutura cristalina dos metais e ligas pouco ferrosas.
- **Strain Gages:** É o mesmo que extensômetros, transdutor capaz de medir deformações mecânicas em corpos de prova.
- **Fator Gage:** É um parâmetro do extensômetro, definido pela mudança fracional da resistência elétrica pela deformação. O valor mais comum encontrado é 2.
- **Teste Estático:** Foram testes realizados em bancada.
- **Dual supply:** Alimentação em tensão positiva e negativa em relação ao terra.
- **Simple supply** Alimentação apenas em tensão positiva em relação ao terra.
- **Estricção** Comportamento apresentado por certos materiais de sofrerem grandes transformações plásticas antes de seu rompimento.
- **Trimpot:** Potenciômetro de precisão, ou seja, resistência variável de precisão.

ANEXO B – Algoritmo do micro controlador

Neste anexo, encontram-se que os códigos utilizados para realizar todas as simulações numéricas. Todos os códigos estão na linguagem C padrão.

B.1 ARQUIVO PRINCIPAL

Nesta seção, apresenta-se a rotina principal desenvolvida.

```
#include <SD.h>
#include <SPI.h>

const int analogPin = A0;    //Valor dado pelo extensômetro
int x, y, z;                //Variáveis para conversão do valor
float e1;
int CS_PIN = 10;           //Cartão SD
File meuArquivo;

void setup() {

Serial.begin(9600);

pinMode(CS_PIN, OUTPUT);

Serial.println("Inicializando cartao SD...");

if (!SD.begin(CS_PIN))
{
Serial.println("Falha na Inicializacao!");
return;
}
Serial.println("Inicializacao terminada");

}

void loop() {

x=analogRead(analogPin);
e1 = x * (5.0 / 1023.0);

if (meuArquivo = SD.open("DADOS.txt",FILE_WRITE)) {
Serial.println("Gravou");
Serial.println(e1, 5);

meuArquivo.println(e1,5);
```

```
meuArquivo.close();  
}
```

```
e1=0;  
x=0;  
z=0;
```

```
delay (500);
```

```
}
```