

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

Rafael Kawano Silva

**Medição indireta de torque de motor elétrico usando
técnicas de extensometria**

São Carlos

2018

Rafael Kawano Silva

Medição indireta de torque de motor elétrico usando técnicas de extensometria

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em Sistemas de Energia e Automação, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Edson Gesualdo

São Carlos
2018

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).

S586m	Silva, Rafael Kawano Medição indireta de torque de motor elétrico usando técnicas de extensometria. / Rafael Kawano Silva; orientador Edson Gesualdo. São Carlos, 2018. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2018. 1. Extensômetro. 2. Medição de torque. 3. Sensores. I. Título.
-------	--

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Rafael Kawano Silva

Título: "Medição indireta de torque de motor elétrico usando técnicas de extensometria"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 25/06/2018,

com NOTA 10 (dez, zero), pela Comissão Julgadora:

Prof. Assistente Edson Gesualdo - Orientador - SEL/EESC/USP

Mestre Elian João Agnoletto - Doutorando - SEL/EESC/USP

Mestre Heitor Vinicius Mercaldi - Doutorando - SEL/EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, aos meus pais Maria Clara e Gerson pelo constante carinho e incentivo.

Ao Professor Edson Gesualdo pela orientação.

Ao professor do Senai de Bauru, Caio Bastos Pereira Riguetti, pela grande ajuda com o as simulações mecânicas.

A todos, obrigado.

*“O estudo, a busca da verdade e da beleza são domínios
em que nos é consentido sermos crianças por toda a vida.”*

Albert Einstein

RESUMO

SILVA, R. **Medição indireta de torque de motor elétrico usando técnicas de extensometria**. 2018. 68p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

Em diversas aplicações industriais ou automotivas faz-se uso de motores elétricos ou a combustão para acionar cargas através de eixos ou correias. Muitas vezes é desejável medir o torque desenvolvido pelo motor mas não é possível fazer medições diretas no eixo ou mesmo utilizar sensores de corrente para fazer medição indireta. Dessa forma há a possibilidade de inferir essa medida através de deformações que os esforços geram nas estruturas que fazem a fixação do motor e da carga no equipamento. Tais deformações podem ser captadas com o uso de extensômetros instalados em pontos onde a estrutura é mais solicitada durante a operação normal do equipamento. Nesse trabalho é proposto um método de medição de torque de um motor elétrico utilizando técnicas de extensometria. Com esse sistema de medição foi construído um gráfico de aferição, no qual o torque desenvolvido pelo motor é função da tensão de saída do sistema de medição de torque.

Palavras-Chave: Extensometria, medição de torque, sensores.

ABSTRACT

SILVA, R. **Indirect measurement of electrical motor torque using extensometry techniques**. 2018. 68p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

In several industrial and automotive applications, electric motors are used to drive loads through belts. It is often desirable to make the the motor's torque measurement but it is not possible to make direct measurements or to use a current sensors to make an indirect measurement. In this way there is a possibility of inferring torque by measuring the deformation that the structure suffers by the resulting straining between the engine and the load of the equipment. Such deformations can be capt with the use of extensometers installed in places where the structure is more stressed during the normal operation of the equipment. In this work is proposed a method of measuring of the torque of an electric motor using strain gauging techniques. With this measuring system, a graph of the torque developed by the motor as a function of output voltage was constructed.

Key words: Extensometry, torque measurement, sensors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Foto de um extensômetro metálico.	21
Figura 2 – Ponte de Wheatstone e posição de montagem dos extensômetros. . . .	24
Figura 3 – Ponte com sistema de balanceamento (controle de <i>offset</i> .)	24
Figura 4 – Sistema de compensação do efeito térmico usando quatro extensômetros.	25
Figura 5 – Diagrama interno de um amplificador de instrumentação.	26
Figura 6 – Curva ideal e real (tracejada) de um filtro passa baixa.	27
Figura 7 – Diferentes respostas de um filtro-passa baixas em função de sua ordem (n).	28
Figura 8 – Motor CC de ímã permanente em (a) e motor CC série (b).	29
Figura 9 – Circuito equivalente de um motor CC série.	30
Figura 10 – Montagem da planta.	34
Figura 11 – Detalhe da montagem do dinamômetro integrado ao suporte do gerador da planta.	34
Figura 12 – Controlador tipo <i>Dimmer</i>	35
Figura 13 – Desenho em 3 dimensões feito no <i>software SolidWorks</i>	36
Figura 14 – Lixar e limpar o local onde deve ser colado o extensômetro metálico. .	36
Figura 15 – Marcar com um lápis a posição que se deseja colar o extensômetro. . .	37
Figura 16 – Em um pedaço de acrílico limpo, posicionar o extensômetro com a parte fosca virada para baixo e passar fita adesiva encima.	37
Figura 17 – Posicionar o extensômetro na região pré-preparada.	37
Figura 18 – Retirar a fita adesiva até que seja possível ver a parte fosca do sensor. .	38
Figura 19 – Aplicar cola tipo cianoacrilato.	38
Figura 20 – Vire a fita adesiva e pressione tempo suficiente para a cola secar. . . .	38
Figura 21 – Retirar a fita adesiva.	39
Figura 22 – Soldar os terminais.	39
Figura 23 – Cobrir com silicone para proteger.	39
Figura 24 – Extensômetros colados na base metálica	40
Figura 25 – Diagrama de blocos do sistema de medição de torque.	40
Figura 26 – Montagem dos extensômetros na base metálica.	41
Figura 27 – Diagrama de ligação em meia ponte.	41
Figura 28 – Diagrama do amplificador de instrumentação.	42
Figura 29 – Filtro Butterworth de quarta ordem.	43
Figura 30 – Diagrama do circuito casador de impedância.	43
Figura 31 – Fonte de alimentação.	44
Figura 32 – Comparação das medidas entre balança de referência e leitor da célula de carga do dinamômetro	45

Figura 33 – Primeira montagem dos extensômetros na base metálica.	46
Figura 34 – Montagem definitiva dos extensômetros na base metálica.	47
Figura 35 – Sistema completo.	48
Figura 36 – Sistema completo e em fase de coleta de dados.	48
Figura 37 – Saída do controlador tipo <i>Dimmer</i> para dois valores diferentes de ângulos de condução.	49
Figura 38 – Posicionamento do esforço resultante da tração da correia sobre os suportes de motor.	50
Figura 39 – Posicionamento do torque sobre os suportes do motor.	50
Figura 40 – Resultado da simulação mostrando a deformação da base metálica e os melhores pontos para a fixação dos extensômetros.	51
Figura 41 – Simulação de funcionamento do amplificador para ganho de 10X. . . .	52
Figura 42 – Simulação do filtro Butterworth de quarta ordem.	52
Figura 43 – Simulação do sistema casador de impedância.	53
Figura 44 – Simulação da fonte de alimentação.	54
Figura 45 – Curva de torque do motor x tensão de saída do sistema de medição de torque.	56
Figura 46 – Parâmetros a e b para filtros Butterworth de até quarta ordem. . . .	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de <i>Gauge-Factor</i> em função do material.	23
Tabela 2 – Comparação entre os pesos medidos na balança de referência, leitor da célula de carga (balança montada) e leitor de célula de carga (instalado na base metálica).	54
Tabela 3 – Tabela com valores de peso, torque e tensão de saída.	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	O EMPREGO DE EXTENSOMETRIA PARA MEDIÇÃO DE TORQUE	21
2.1	O Extensômetro metálico	21
2.1.1	Colocação de extensômetros em estrutura do tipo viga engastada e circuito em ponte de Wheatstone	23
2.1.2	Compensação da resistência dos fios	24
2.2	Amplificador de instrumentação	25
2.3	Filtros ativos (passa-baixas)	26
2.3.1	Filtros de Butterworth	28
2.4	Os motores de corrente contínua	29
2.4.1	Motor CC série	29
2.4.2	Motor CC de ímã permanente	30
3	METODOLOGIA	33
3.1	Montagem da planta	33
3.2	Alimentação do motor e carga do gerador	35
3.3	Simulação de esforços para melhor localização dos extensômetros	35
3.4	Colagem dos extensômetros metálicos	36
3.5	Arquitetura do sistema de medição de torque	40
3.5.1	Circuito em ponte de Wheatstone	40
3.5.2	Amplificador de instrumentação	41
3.5.3	Filtro Passa-Baixas	42
3.5.4	Circuito casador de impedância.	43
3.5.5	Fonte de alimentação.	43
3.6	Aferição do leitor da célula de carga do dinamômetro	44
3.7	Montagem do circuito e testes preliminares	46
4	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES E AFERIÇÃO DO LEITOR DA CÉLULA DE CARGA DO DINAMÔMETRO	49
4.1	Simulação do Dimmer	49
4.2	Simulação das deformações da estrutura	49
4.3	Simulação do amplificador de instrumentação	51
4.4	Simulação do filtro passa baixas	52
4.5	Simulação do sistema casador de impedância	53

4.6	Simulação da fonte de alimentação	53
4.7	Aferição do leitor da célula de carga do dinamômetro	54
4.8	Montagem do gráfico de aferição	55
4.9	Discussão dos resultados	56
4.9.1	Sugestões para trabalhos futuros.	57
5	CONCLUSÃO	59
	REFERÊNCIAS	61
	APÊNDICES	63
	APÊNDICE A – APENDICE	65
A.1	Apêndice A - Dimensionamento do Filtro passa baixas	65
A.2	Apêndice B - Código do Matlab utilizado na construção do gráfico de aferição	67

1 INTRODUÇÃO

A medição do torque produzido por um motor é muitas vezes uma operação essencial para a implementação de sistemas de automação ou mesmo para o funcionamento de sistemas de proteção.

Um dos empregos mais comuns de técnicas de medição de torque de motores se dá nos carros equipados com transmissão automática. Nesses veículos a lógica da automatização das trocas de marchas se baseia principalmente no torque desenvolvido pelo motor e também sua rotação. (BULLMER et al., 18 apr. 1995)

Nesses casos tal medição de torque é, na maioria das vezes, feito de maneira indireta. Através da medição do volume de ar e combustível admitidos, além da rotação de trabalho, é possível inferir qual o torque aproximado que o motor está desenvolvendo. (GUZZELLA; ONDER, 2010)

Contudo, há casos onde a escassez de sensores instalados junto ao motor inviabilizam as técnicas tradicionais de medição de torque. Tal situação é bastante vivenciada por equipes de competição que constroem carros sob normas bastante restritivas quanto à escolha e utilização de cada componente (SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 2018). Para esse emprego se justificaria o uso de técnicas de extensometria para fazer a medição indireta do torque do motor para controle e automação do sistema de transmissão.

Para uso industrial, a medição do torque de motores elétricos, na maioria das vezes, é feita de maneira indireta através da medição da corrente e controle de frequência de alimentação. (CHAPMAN, 2013) Embora o uso de sensores de corrente seja bastante prático, a técnica de medição indireta de torque baseada na deformação da estrutura de fixação do motor se mostra uma boa alternativa em casos onde a modificação do circuito elétrico é indesejado.

Nesse trabalho, foi proposta uma técnica de medição do torque de um pequeno motor elétrico montado sobre uma base metálica e conectado por correia a outro motor elétrico que funciona como carga.

Foi feita, via simulação, uma estimativa da melhor localização para fazer a instalação dos extensômetros. Foi construído também um sistema eletrônico destinado a amplificar e tratar o sinal dos sensores, além disso foi feita a aferição do sistema de medição com o auxílio de um pequeno dinamômetro instalado no suporte de um dos motores.

É apresentado neste trabalho a base teórica de funcionamento dos principais componentes utilizados na montagem e também a metodologia utilizada neste trabalho. Na sequência, será mostrada a curvas de torque do motor em função da tensão de saída

do sistema de medição de torque.

2 O EMPREGO DE EXTENSOMETRIA PARA MEDIÇÃO DE TORQUE

Extensometria é uma técnica experimental de medição da deformação de corpos sujeito a esforços ([NATIONAL INSTRUMENTS, 1998](#)). Para fazer essa medição, podem ser empregados diversos tipos de transdutores, como por exemplo os LVDTs, extensômetros ou sensores piezoelétricos. Neste trabalho será utilizado como sensor o extensômetro metálico.

Este sensor resistivo é capaz de variar sua resistência elétrica proporcionalmente à deformação que sofre. Com esta variação de resistência, é possível produzir variações de tensões que, quando corretamente amplificadas e filtradas, oferecem boa precisão na descrição das deformações na forma de variação de tensão.

Desse modo, em uma montagem mecânica, a variação de torque desenvolvido pelo motor (ou demandado pela carga) imprime uma deformação nessa estrutura. Assim sendo, com um correto posicionamento do extensômetro metálico, é possível a obtenção de um sinal elétrico proporcional ao torque desenvolvido pelo motor.

É importante ressaltar que o extensômetro resistivo, por se tratar de um elemento passivo, não é capaz de produzir sinal elétrico de tensão e corrente. É preciso que seja utilizado junto a ele um sistema eletrônico dotado, entre outros, de fonte de alimentação, amplificador de instrumentação e filtro passa baixas para garantir intensidade e também estabilidade a esse sinal.

2.1 O Extensômetro metálico

Este sensor constitui-se em um fio metálico disposto em forma de "zigue-e-zague" sob um filme plástico e isolante. Na FIGURA 1 é mostrado o aspecto geral de um extensômetro metálico. ([HOFFMANN, 1989](#)).

Figura 1: Foto de um extensômetro metálico.



Fonte: ([HOFFMANN, 1989](#))

Considerando que o fio condutor do transdutor tenha seção de área (A), comprimento (l), o valor da resistência (R) será ([DOEBELIN; MANIK, 1990](#)).

$$R = \rho l / A$$

ρ é a resistência elétrica específica do material que constitui o fio.

Quando o extensômetro é tracionado ou comprimido, haverá variação no comprimento (L) do condutor e assim na resistência elétrica do componente. Podemos então escrever:

$$\frac{\partial R}{\partial \rho} = \frac{l}{A} \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial R}{\partial l} = \frac{\rho}{A} \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial R}{\partial A} = -l \frac{\rho}{A^2} \quad (2.3)$$

$$\Delta R = \frac{\partial R}{\partial l} \Delta l + \frac{\partial R}{\partial A} \Delta A + \frac{\partial R}{\partial \rho} \Delta \rho = \frac{\rho}{A} \Delta l - \frac{\rho l}{A^2} \Delta A + \frac{l}{A} \Delta \rho \quad (2.4)$$

$$\Delta R = \frac{l}{A} \frac{\rho}{A} \Delta l - \frac{\rho l}{A} \frac{\Delta A}{A} + \frac{\rho}{A} \Delta l = R_0 \frac{\Delta l}{l} - R_0 \frac{\Delta A}{A} + R_0 \frac{\Delta \rho}{\rho} = R_0 \left(\frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) \quad (2.5)$$

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (2.6)$$

R_0 é a resistência inicial do fio metálico.

Sendo e_l e e_t as deformações longitudinal e transversal, respectivamente:

$$\frac{\Delta l}{l} = e_l \quad (2.7)$$

Considerando o condutor metálico que compõe o extensômetro como um perfil retangular com base (b) e altura (h):

$$A = b \times h \Rightarrow \frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta h}{h} = 2e_t \quad (2.8)$$

$$\frac{\Delta R}{R_0} = e_l - 2e_t + \frac{\Delta \rho}{\rho} = e_l - 2(-\mu e_l) + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (2.9)$$

$$\frac{\Delta R}{R_0} = e_l(1 + 2\mu) + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (2.10)$$

Onde $\mu = -\frac{e_t}{e_l}$ é a razão de Poisson (cujo valor varia entre 0,25 a 0,4 para a maioria dos metais), e $e \approx 0,3$ para a maioria dos metais.

O fator de calibração, sensibilidade ou *Gauge-Factor* desse tipo de sensor é definida como:

$$G = \frac{\frac{\Delta R}{R_0}}{e_l} \Rightarrow G = \frac{e_l(1 + 2\mu)}{e_l} + \frac{1}{e_l} \frac{\Delta \rho}{\rho} = 1 + 2\mu + \frac{1}{e_l} \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (2.11)$$

O último termo dessa expressão, variação relativa de ρ com a deformação, representa o efeito piezoresistivo que é pequeno para a maioria dos metais.

Desprezando-se a variação da resistividade em decorrência de uma deformação do resistor, temos:

$$R_0 + \Delta R = R = \rho \frac{l_0 + \Delta l}{A_0 - \Delta A} = \rho \frac{l_0}{A_0} \frac{1 + \frac{\Delta l}{l_0}}{1 - \frac{\Delta A}{A_0}} = R_0 \frac{1 + \frac{\Delta l}{l_0}}{1 - \frac{\Delta A}{A_0}} \quad (2.12)$$

Onde l_0 é o comprimento inicial do fio condutor e A_0 é a área inicial do fio condutor.

Esse resultado mostra que a variação de resistência elétrica (ΔR) implica na variação de comprimento (Δl) causado por esforços na estrutura na qual o extensômetro é fixado.

Os extensômetros metálicos podem ser fabricados com diversos materiais e isso muda a sua sensibilidade (HOFFMANN, 1989). Na Tabela 1 é apresentado alguns valores para o *Gauge-factor* em função do material utilizado na fabricação.

Tabela 1: Valores de *Gauge-Factor* em função do material.

Material do condutor	Composição do metal (%)	Fator de Calibração (Gauge Factor)
Constantan	57 Cu, 43 Ni	2,05
Karma	73 Ni, 20 Cr, res Fe+Al	2,1
Niquel-Cromo V	80 Ni, 20 Cr	2,2
Platina-Tungstênio	92 Pt, 8 W	4

Traduzido de Hoffmann (1989, p. 54).

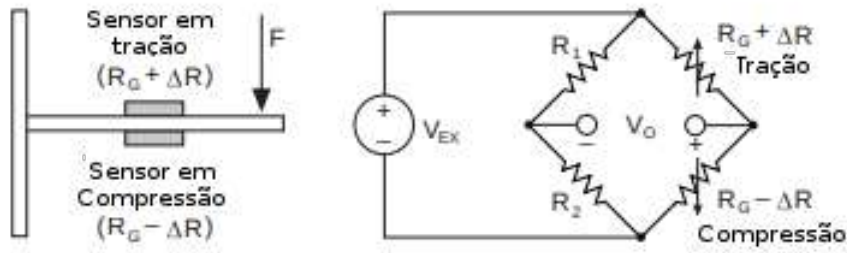
2.1.1 Colocação de extensômetros em estrutura do tipo viga engastada e circuito em ponte de Wheatstone

Para que seja possível medir a variação de resistência que o extensômetro sofre com as deformações e também compensar a sensibilidade à temperatura, costuma se utilizar uma ponte de Wheatstone onde os extensômetros metálicos são usados em braços adjacentes da ponte e posicionados em lados opostos no corpo de prova. (NATIONAL INSTRUMENTS, 1998)

No caso de corpo de prova ser uma chapa de aço, quando esta é deformada em uma direção, um dos lados é comprimido e o outro é tracionado. Deste modo, o extensômetro posicionado do lado a ser comprimido sofrerá diminuição em sua resistência enquanto o outro, fixado do lado a ser tracionado, terá sua resistência aumentada.

Esta montagem permite, não apenas, dobrar a sensibilidade do sistema de medição, mas também compensar efeitos indesejados devido a variação de temperatura. Na Figura 2 é ilustrada este esquema de montagem e também o diagrama da ponte de Wheatstone.

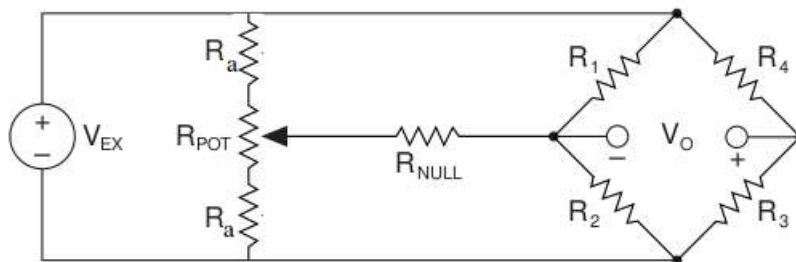
Figura 2: Ponte de Wheatstone e posição de montagem dos extensômetros.



Fonte: Traduzido de [NATIONAL INSTRUMENTS \(1998\)](#).

Variações de tolerância dos extensômetros metálicos não garantem que a ponte ilustrada na Figura 2 esteja em equilíbrio na ausência de cargas mecânicas ([DOEBELIN; MANIK, 1990](#)). Para fazer o balanceamento, é comum o uso de um potenciômetro como mostrado na FIGURA 3.

Figura 3: Ponte com sistema de balanceamento (controle de *offset*.)



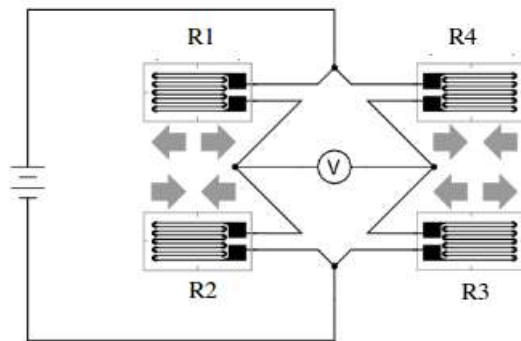
Fonte: ([NATIONAL INSTRUMENTS, 1998](#)).

O circuito em ponte de Wheatstone produz uma variação de tensão proporcional às deformações que o corpo de prova sofre, porém, a amplitude deste sinal é bastante reduzida (da ordem de μV). Para que seja possível medir este sinal com aparelhos de medição convencionais, é necessário fazer uso de um sistema de amplificação.

2.1.2 Compensação da resistência dos fios

A conexão entre os extensômetros da ponte de Wheatstone é feita por fios. Porém o uso de fios para fazer as ligações insere, no circuito, resistências que variam com a temperatura, e que provocam erros de medição. ([NATIONAL INSTRUMENTS, 1998](#)) Um bom sistema de compensação deste efeito térmico é conseguido quando faz-se uso de quatro extensômetros metálicos ligados na configuração de ponte completa. Esta ligação é mostrada na Figura 4.

Figura 4: Sistema de compensação do efeito térmico usando quatro extensômetros.



Fonte: Adaptado de ([AGILENT TECHNOLOGIES, 2012](#))

Neste tipo de ligação as resistências dos fios ficam em braços adjacentes da ponte, havendo então o cancelamento do efeito térmico.

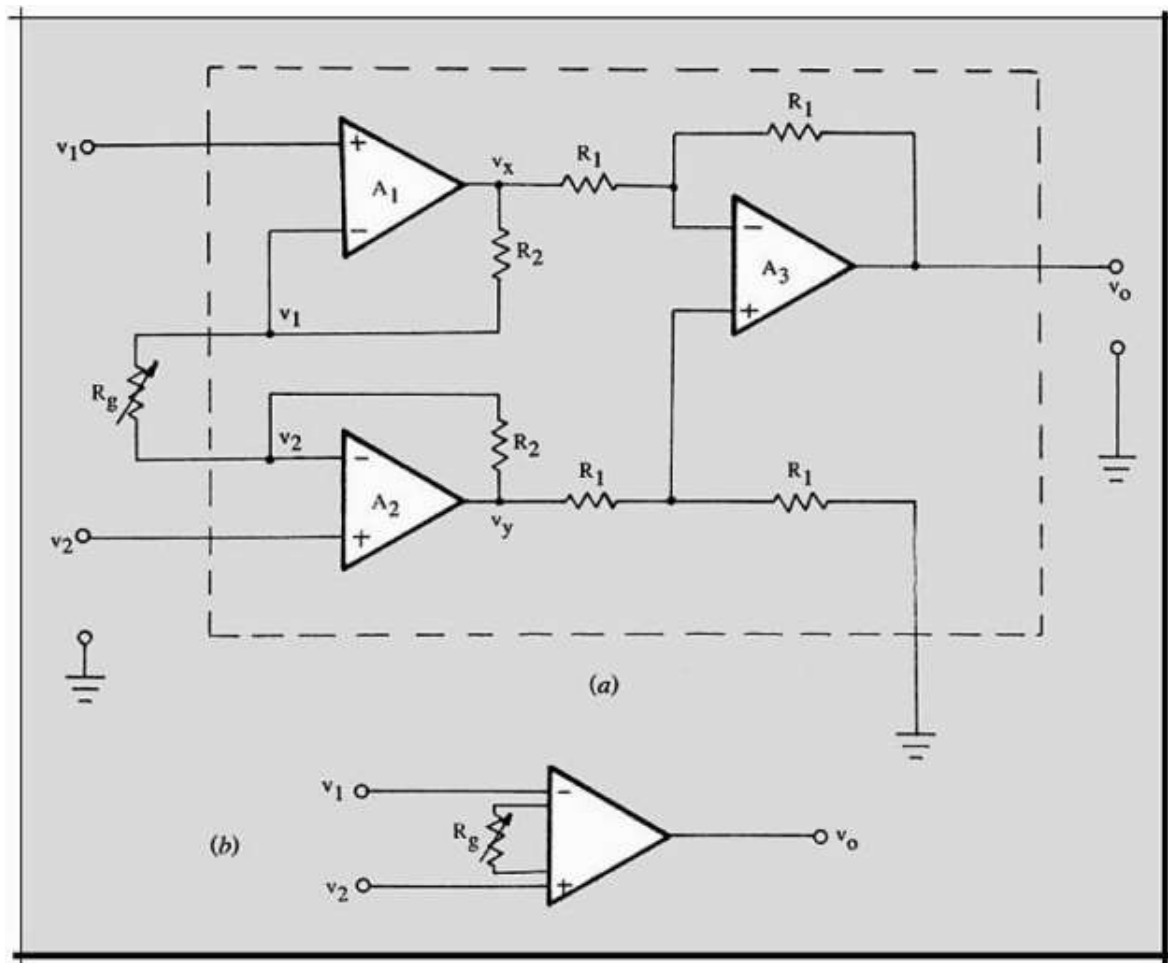
2.2 Amplificador de instrumentação

Segundo [Pertence \(2003\)](#), o amplificador de instrumentação consiste em um tipo especial de amplificador operacional que permite obter algumas características especiais não oferecidas pelos amplificadores operacionais comuns. Algumas são:

- Resistência de entrada bastante alta.
- Resistência de saída menor do que a dos amplificadores operacionais comuns.
- Ganho de malha aberta muito superior ao dos amplificadores operacionais comuns.
- Tensão de *offset* de entrada muito baixo.

Esse tipo de amplificador é construído a partir da associação de três ou mais amplificadores operacionais convencionais dentro de um único encapsulamento. Na Figura 5 (a) é mostrado o diagrama interno de um amplificador de instrumentação, enquanto em (b) é mostrado o diagrama equivalente.

Figura 5: Diagrama interno de um amplificador de instrumentação.



Fonte: [Pertence \(2003, p. 68\)](#).

Utilizando um amplificador de instrumentação, é possível amplificar o pequeno sinal produzido pelos extensômetros em níveis mensuráveis com aparelhos de medição convencionais, como multímetros.

As variações de esforços sofrido pela estrutura mecânica será proporcional ao torque que o motor desenvolve durante o funcionamento. Porém, haverá também vibrações mecânicas produzidas por fenômenos que não podem ser associados ao torque, como excentricidades das polias, imperfeições na correia e desbalanceamento dos motores. Essas vibrações produzem um ruído indesejado e de frequências muito mais altas do que as variações de torque. Para atenuar este ruído, deve ser usado um filtro do tipo passa-baixas.

2.3 Filtros ativos (passa-baixas)

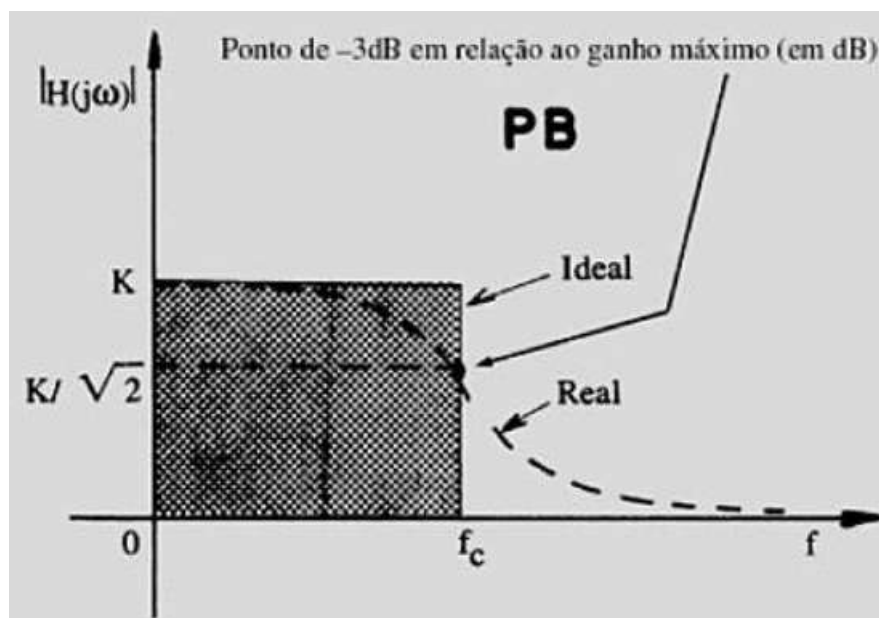
Segundo [Pertence \(2003\)](#), um filtro elétrico é um quadripolo capaz de atenuar determinadas frequências do espectro do sinal de entrada e permitir a passagem das demais.

Apesar de os filtros ativos (que empregam não apenas componentes passivos em sua construção) terem como desvantagens depender de fontes de alimentação e terem sua resposta em frequência limitada pelas características dos amplificadores operacionais utilizados em sua construção, este tipo de filtro possui grandes vantagens em relação aos filtros passivos. Algumas delas são:

- Eliminação dos indutores, os quais são componentes volumosos, pesados e caros para trabalhar em baixas frequências.
- Facilidade de construção de filtros mais complexos através da associação em cascata de estágios simples, porém sem grande efeito de carregamento.
- Possibilidade de haver amplificação de sinal.
- Facilidade de projeto.

Um filtro passa-baixas é um filtro que atenua frequências acima de f_c (denominado frequência de corte) e deixa passar as frequências mais baixas. Na Figura 6 é mostrada a curva de resposta ideal e real (tracejada) desse tipos de filtros.

Figura 6: Curva ideal e real (tracejada) de um filtro passa baixa.



Fonte: Extraído de [Pertence \(2003, p. 64\)](#).

Onde K representa o ganho do filtro. O ponto $K/\sqrt{2}$ é o ponto onde há a atenuação de 3dB, também conhecido por frequência de corte.

Como mostrado na Figura 6 há uma diferença entre a resposta real e a ideal. Embora não seja possível igualá-las, algumas características construtivas do filtro conseguem

promover uma maior aproximação entre elas: a ordem do filtro e a função matemática que o modela.

Nesse trabalho será utilizado um filtro de Butterworth de quarta ordem para fazer o tratamento do sinal produzido pelo extensômetro.

2.3.1 Filtros de Butterworth

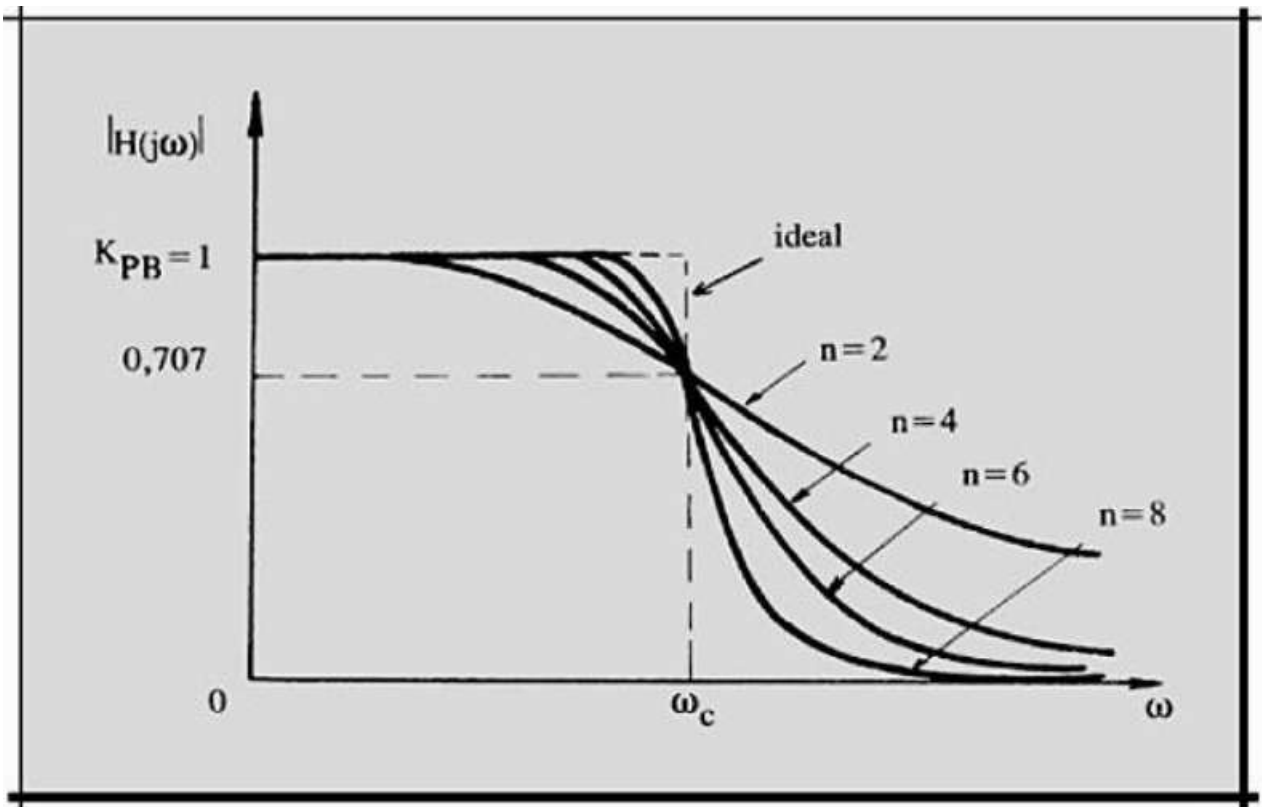
Os Filtros Butterworth, diz [Pertence \(2003\)](#), possuem a seguinte função resposta:

$$H(j\omega) = \frac{K_{PB}}{\sqrt{1 + (\omega/\omega_c)^{2n}}} \quad n = 1, 2, 3... \quad (2.13)$$

K_{PB} é o ganho do filtro passa baixas quando a frequência ω é nula; ω_c é a frequência de corte ($\omega_c = 2\pi f_c$) e n é a ordem do filtro.

A ordem do filtro segundo [Pertence \(2003\)](#), é por definição, o número de pólos da função transferência do mesmo. Quanto maior a ordem do filtro, mais a sua resposta se aproximará da curva ideal. Na Figura 7, diversas respostas de um filtro passa-baixas em função de sua ordem (n).

Figura 7: Diferentes respostas de um filtro-passa baixas em função de sua ordem (n).



Fonte: [Pertence \(2003, p. 170\)](#).

2.4 Os motores de corrente contínua

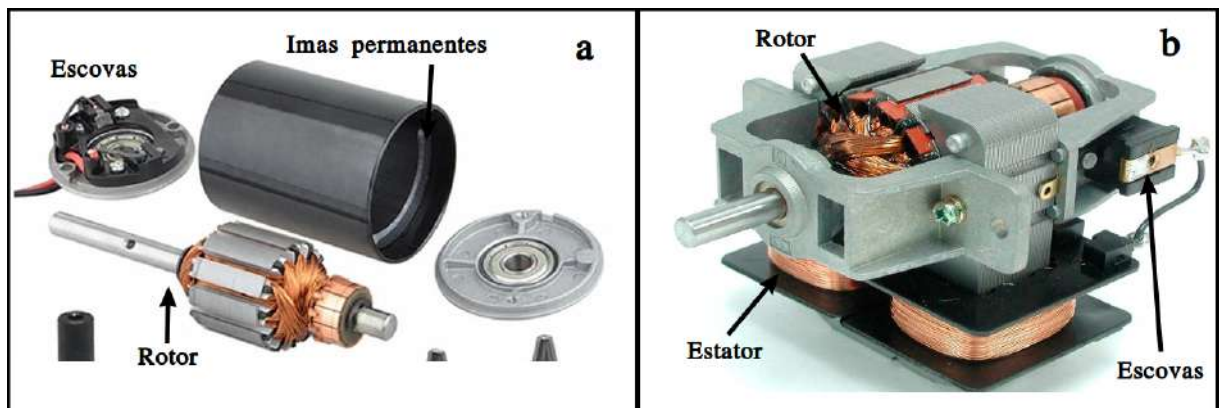
Os motores de corrente contínua foram os primeiros tipos de máquinas elétricas rotativas concebidas (CHAPMAN, 2013), e mesmo depois da popularização dos sistemas elétricos de corrente alternada, este tipo de máquina elétrica continuou a ser bastante utilizada em casos mais específicos, onde a alimentação do sistema já é feita em corrente contínua, ou em aplicações onde é desejável ampla faixa de variação de rotação.

Dentre os tipos de motores CC mais utilizados, pode-se citar esses dois tipos:

- Motores CC série.
- Motores CC de ímã permanentes.

Na Figura 8(a) é mostrado, um motor CC de ímã permanente e na Figura 8(b) um motor um motor CC série.

Figura 8: Motor CC de ímã permanente em (a) e motor CC série (b).



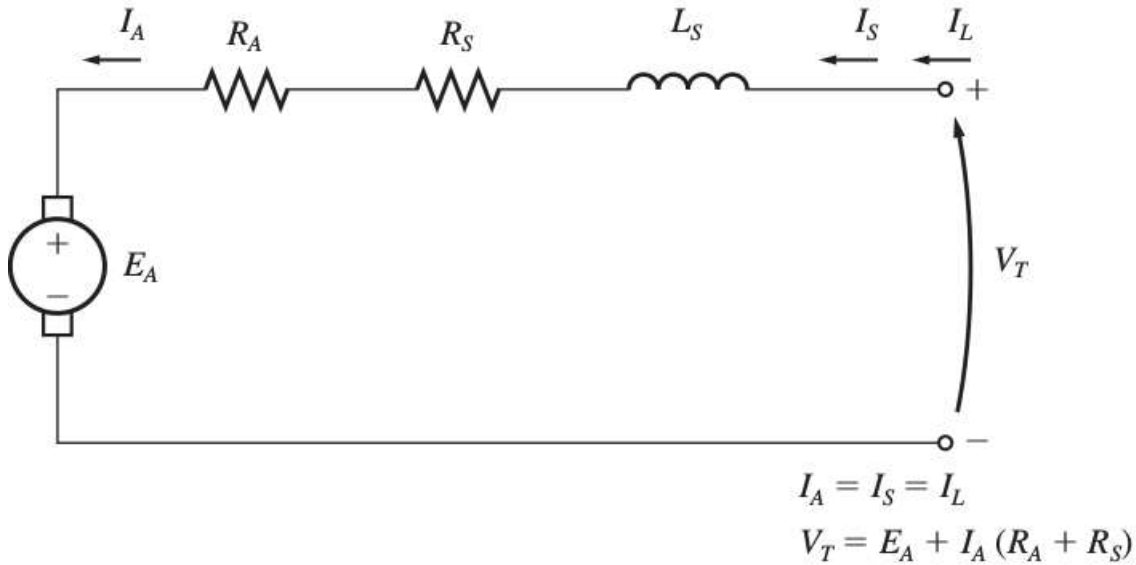
Fonte: Adaptado de MECANICA... (2018)

2.4.1 Motor CC série

Um motor CC em série, CC é a abreviação de corrente contínua, é um motor no qual o enrolamento de campo é ligado em série com a armadura (CHAPMAN, 2013). Como a corrente de campo é a mesma que percorre a armadura, este tipo de motor pode ser alimentados com corrente alternada, e por oferecer maior conjugado por ampere do que os demais tipos de motores CC, são bastante utilizados em máquinas manuais onde se deseja menor volume e alto torque de partida.

O circuito equivalente deste motor pode ser visto na Figura 9.

Figura 9: Circuito equivalente de um motor CC série.



Fonte: [Chapman \(2013, p. 495\)](#).

A equação da lei de Kirchhoff para as tensões desse motor fica:

$$V_T = E_A + I_A(R_A + R_S) \quad (2.14)$$

V_T é a tensão nos terminais da máquina, E_A é a tensão induzida na armadura, I_A é a corrente na armadura, R_A é a resistência da armadura e R_S é a resistência do enrolamento de campo.

O conjugado induzido nesta máquina é:

$$\tau_{ind} = K\phi I_A \quad (2.15)$$

sendo o fluxo proporcional à corrente na armadura, ou seja:

$$\phi = cI_A \quad (2.16)$$

c é constante.

Conclui-se então que:

$$\tau_{ind} = K\phi I_A = KcI_A^2 \quad (2.17)$$

Isto significa que o torque produzido por esse motor é proporcional ao quadrado da corrente na armadura. Esta, por sua vez, é proporcional a tensão aplicada aos terminais do motor.

2.4.2 Motor CC de ímã permanente

Neste tipo de motor CC, os polos são feitos de ímãs permanentes. Esses motores oferecem diversos benefícios em comparação com os modelos que usam enrolamentos no

estator, pois além de não terem as perdas características do uso de bobinas, também são mais simples e menores (CHAPMAN, 2013).

As características de saída desse tipo de motor podem ser obtidas através da Lei de Kirchhoff:

$$V_T = E_A + I_A R_a \quad (2.18)$$

$E_A = K\phi\omega_m$, sendo K uma constante, ϕ o fluxo magnético gerado pelos ímãs e ω_m a velocidade angular da armadura

Assim:

$$V_T = K\phi\omega_m + I_A R_a \quad (2.19)$$

Como $\tau_{ind} = K\phi I_a$ a corrente na armadura I_A pode ser expressa como:

$$I_a = \frac{\tau_{ind}}{K\phi} \quad (2.20)$$

Combinando as equações (2.19) e (2.20).

$$V_T = K\phi\omega_m + \frac{\tau_{ind}}{K\phi} R_A \quad (2.21)$$

A equação (2.21) mostra que a tensão terminal de um motor CC é proporcional à rotação e ao torque que este está submetido.

3 METODOLOGIA

Para simular uma aplicação industrial foi montado uma pequena planta com dois motores elétricos acoplados mecanicamente por correia. Esta planta é dotada de um sistema de dinamômetro que possibilita fazer leituras do torque imposto pela carga ao motor.

Com o uso do *software SolidWorks*, foi feito uma simulação de esforços para determinar os pontos de maior deformação da base metálica da planta quando esforços são aplicados nos suportes dos motores. Através dos resultados desta simulação foi possível determinar os melhores pontos para a fixação dos extensômetros, tais pontos são mostrados na Figura 40.

Para amplificar e condicionar o sinal produzido pelo transdutor, foi projetado, simulado e construído um circuito eletrônico cuja arquitetura possibilita não apenas amplificar o sinal, mas também filtrar ruídos gerados por imperfeições mecânicas na construção das polias dos motores e na correia de borracha.

Os diagramas elétricos apresentados neste trabalho foram produzidos com o *software Eagle 7.6.0* e as simulações dos circuitos foram feitas com o *software Multisim*. A construção do sistema eletrônico foi feita com o uso de componentes comerciais e em placa de circuito impresso.

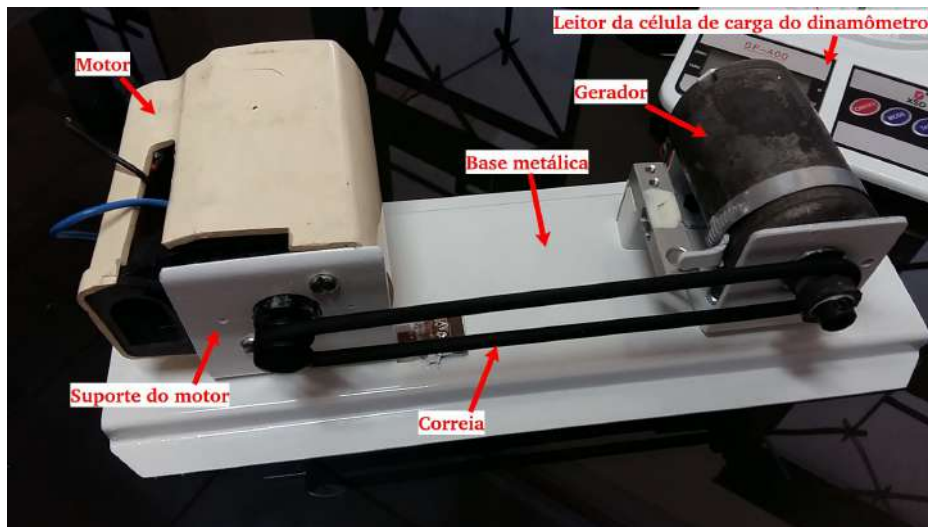
Para a validação do sistema foi feita uma curva de aferição de tensão de saída do sistema de medição de torque em função do torque medido pelo dinamômetro integrado à planta. Como instrumento de leitura da tensão de saída do sistema de medição de torque foi usado um multímetro da marca INSTRUTHERM modelo MD-380.

A seguir é feito o detalhamento de cada etapa da construção e implementação do sistema.

3.1 Montagem da planta

A planta que simula uma aplicação industrial foi equipada com dois motores CC que são acoplados mecanicamente por correia, de modo que um deles funcione como motor e o outro como gerador. Na Figura 10 é mostrado o aspecto final da montagem descrita:

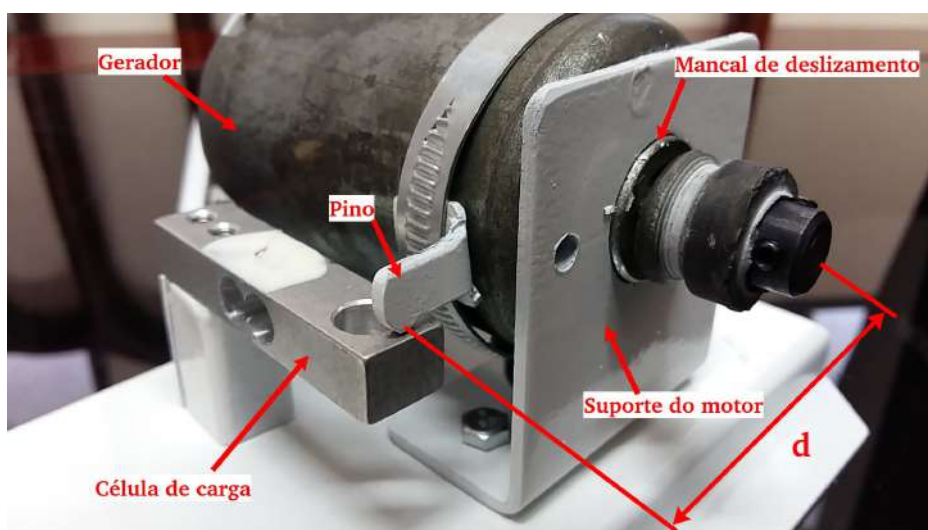
Figura 10: Montagem da planta.



Fonte: Produzido pelo autor.

Esta montagem possui um pequeno dinamômetro integrado ao sistema de suporte do gerador. Os suportes deslizantes permitem que o gerador gire ao redor do próprio eixo e através de um pino posicionado em sua lateral, pressiona a célula de carga utilizada em balanças de cozinha da marca ELECTRONIC modelo SF-400. O sistema de leitura da célula de carga é calibrado para medir massas de até 10kg com precisão de 1g. Na Figura 11 é mostrada em detalhes a montagem do dinamômetro integrado à planta.

Figura 11: Detalhe da montagem do dinamômetro integrado ao suporte do gerador da planta.



Fonte: Produzido pelo autor.

A base da planta foi construída com chapa fina(1,2mm) para que se acentue as deformações causadas pelos esforços produzidos pela tração da correia. Os suporte dos

motores foram construídos com chapa mais grossa (2mm) para que se deformem menos do que a base. Tanto na construção da base quanto suportes foi usados um perfil de chapa em aço carbono comercial bastante utilizado na confecção de portões basculantes.

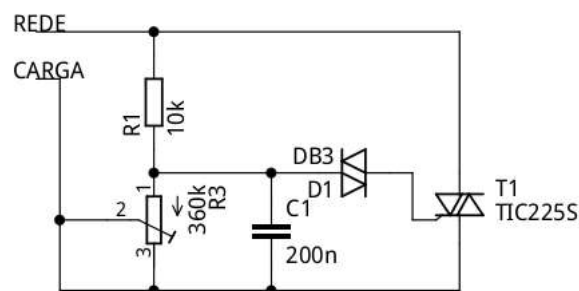
De modo a obter fácil controle de torque e rotação, o motor utilizado para acionar a planta é do tipo CC série da marca Singer, de 85W e 127V. O controle de tensão é feito com um controlador de estado sólido do tipo *Dimmer*.

Como gerador foi usado um motor CC de ímã permanente de 24V. Esse tipo de motor oferece grande facilidade para trabalhar como gerador e a tensão e corrente de saída são diretamente proporcionais à rotação de trabalho.

3.2 Alimentação do motor e carga do gerador

Para fazer o controle da rotação e torque do motor da planta foi empregado um controlador tipo *Dimmer* por se tratar de um controlador de fácil montagem. Na Figura 12 é mostrado o diagrama elétrico do controlador utilizado.

Figura 12: Controlador tipo *Dimmer*.



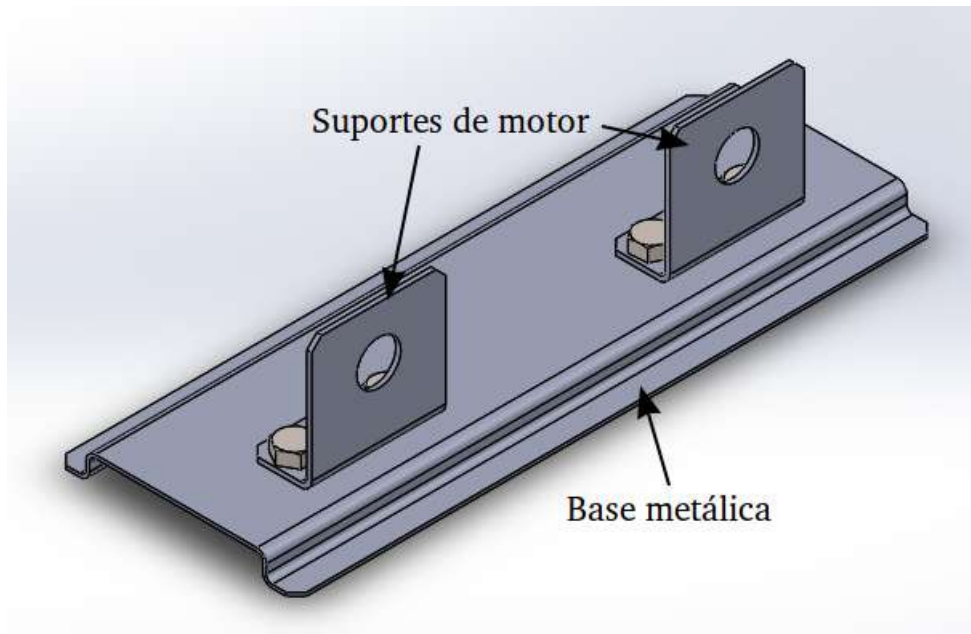
Produzido: Produzido pelo autor.

Este sistema de controle de tensão possibilita variar o valor RMS da tensão de alimentação da carga através do controle do ângulo de condução de cada meio ciclo. Para isso usa-se um sistema RC onde um potenciômetro varia a defasagem da onda de saída deste filtro em relação à sua entrada. O sinal de saída do circuito RC é usado como disparo para o TRIAC. Para simular a carga na saída do gerador foi utilizado um resistor de $1\Omega \times 5W$. Este valor foi escolhido experimentalmente de modo que ao ser conectado aos terminais do gerador, este oferecesse grande esforço mecânico por parte do motor.

3.3 Simulação de esforços para melhor localização dos extensômetros

Utilizando o software *Solid Works* foram desenhados apenas os componentes da estrutura que estão sujeitos aos esforços durante o funcionamento da planta. Desse modo, foram desenhados os dois suportes de motor e a base metálica. Na Figura 13 é mostrado o desenho em 3 dimensões usados para fazer a simulação.

Figura 13: Desenho em 3 dimensões feito no *software SolidWorks*.



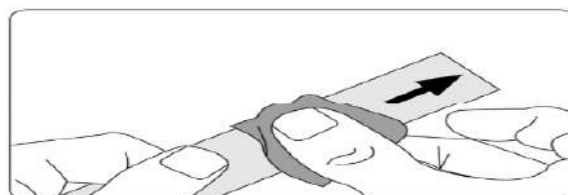
Fonte: Produzido pelo autor

Sobre este desenho foram posicionadas as forças geradas pelo esforço das polias sobre a correia. O resultado da simulação evidencia os pontos da estrutura que estão sujeitos às maiores deformações e com base nesse resultado determinou-se o melhor lugar para colar os extensômetros. Na Figura 40 é mostrado o resultado da simulação e a indicação dos pontos de melhor localização para os extensômetros.

3.4 Colagem dos extensômetros metálicos

Para fazer a colagem dos Extensômetros metálicos é seguido o seguinte procedimento ilustrado nas FIGURAS 14 à 23.

Figura 14: Lixar e limpar o local onde deve ser colado o extensômetro metálico.



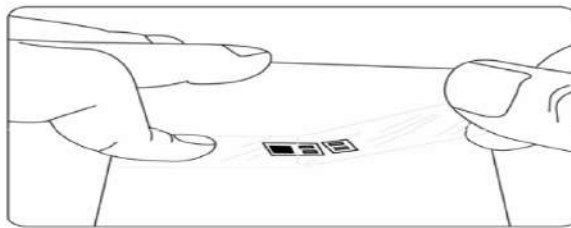
Fonte:(BRUSSAMARELLO, 2015)

Figura 15: Marcar com um lápis a posição que se deseja colar o extensômetro.



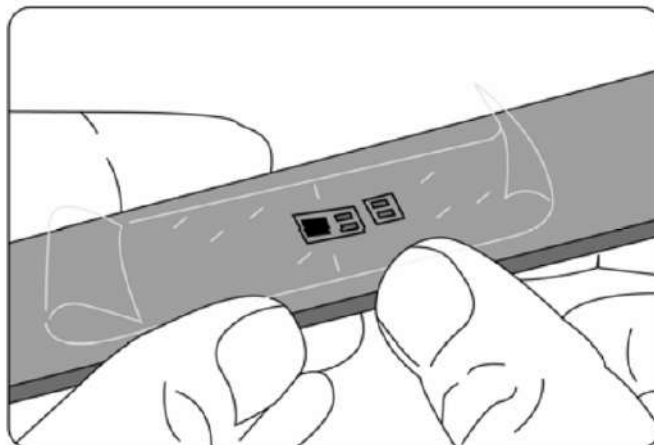
Fonte:(BRUSSAMARELLO, 2015)

Figura 16: Em um pedaço de acrílico limpo, posicionar o extensômetro com a parte fosca virada para baixo e passar fita adesiva encima.



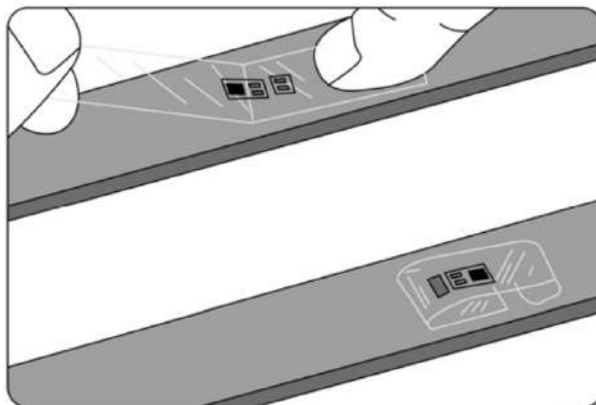
Fonte:(BRUSSAMARELLO, 2015)

Figura 17: Posicionar o extensômetro na região pré-preparada.



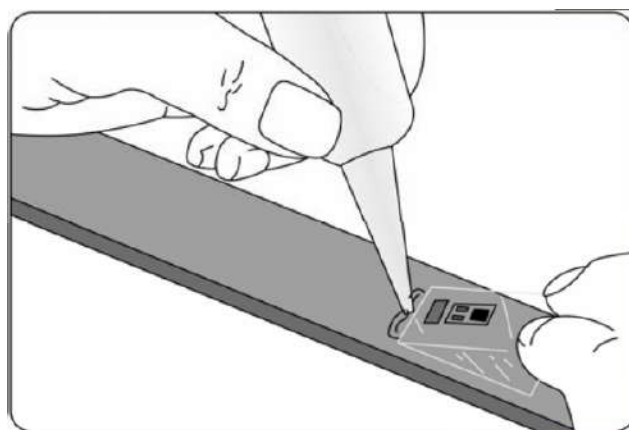
Fonte:(BRUSSAMARELLO, 2015)

Figura 18: Retirar a fita adesiva até que seja possível ver a parte fosca do sensor.



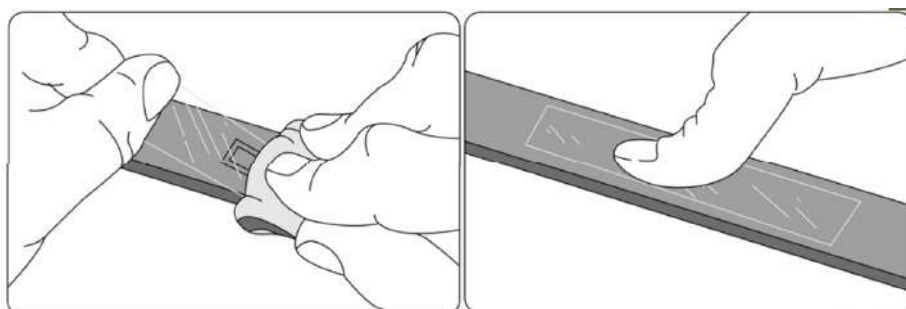
Fonte:(BRUSSAMARELLO, 2015)

Figura 19: Aplicar cola tipo cianoacrilato.



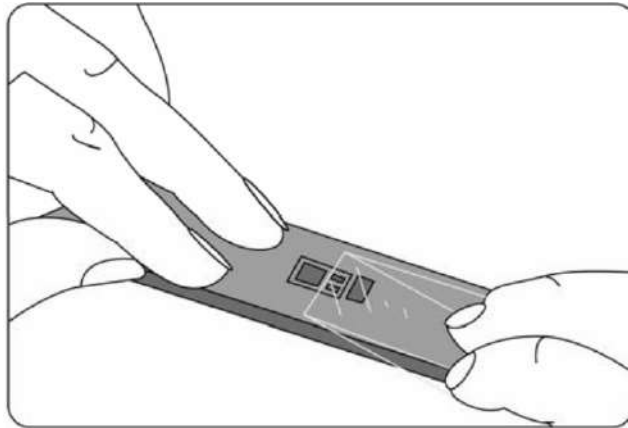
Fonte:(BRUSSAMARELLO, 2015)

Figura 20: Vire a fita adesiva e pressione tempo suficiente para a cola secar.



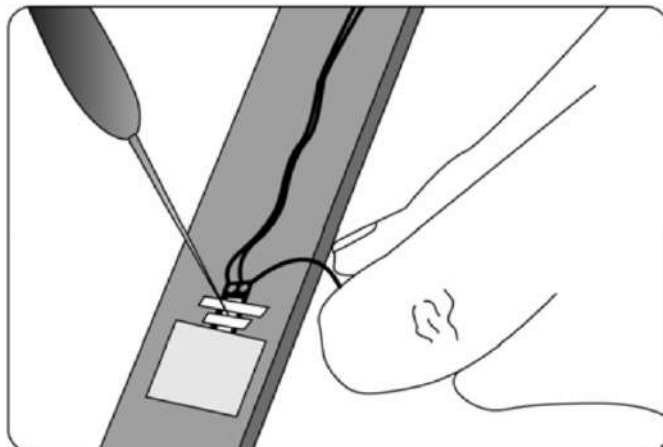
Fonte:(BRUSSAMARELLO, 2015)

Figura 21: Retirar a fita adesiva.



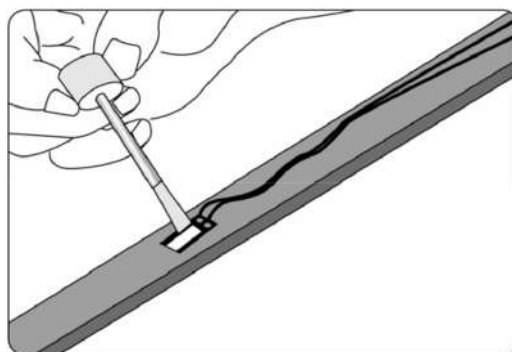
Fonte:(BRUSSAMARELLO, 2015)

Figura 22: Soldar os terminais.



Fonte:(BRUSSAMARELLO, 2015)

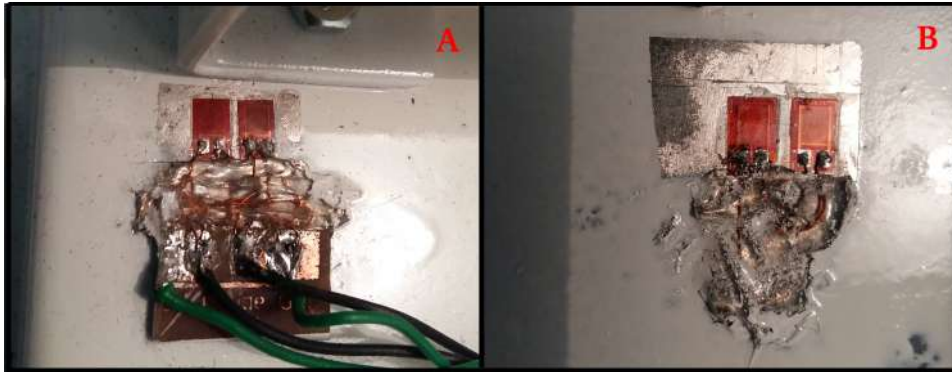
Figura 23: Cobrir com silicone para proteger.



Fonte:(BRUSSAMARELLO, 2015)

Na Figura 24 são mostrados os extensômetros já colados na base metálica, em (a) na face superior e em (b) na face inferior.

Figura 24: Extensômetros colados na base metálica



Fonte: Produzido pelo autor.

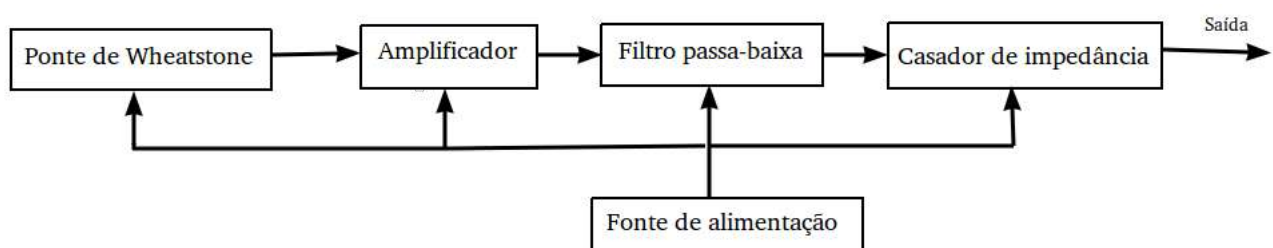
3.5 Arquitetura do sistema de medição de torque

A arquitetura do sistema de medição de torque foi idealizada para fazer compensação de temperatura, ter alto ganho e filtrar ruídos de frequência inferior a 2Hz. Para cumprir com esses requisitos, o sistema de medição é composto por 4 circuitos:

- Circuito em ponte de Wheatstone.
- Amplificador de instrumentação.
- Filtro ativo passa baixas.
- Sistema isolador de saída.
- Fonte de alimentação.

A organização dos circuitos é ilustrada pelo diagrama de blocos da Figura 25.

Figura 25: Diagrama de blocos do sistema de medição de torque.



Fonte: Produzido pelo autor.

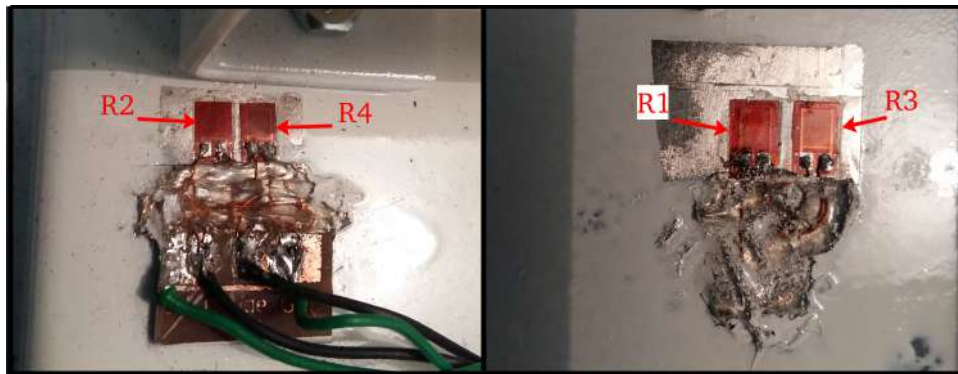
3.5.1 Circuito em ponte de Wheatstone

Para produzir variações de tensão através da variação de resistência dos extensômetros metálicos (cuja impedância é de 350Ω), foi montado uma ponte de Wheatstone

onde quatro sensores, colados dois a dois de cada lado da base metálica, são ligados na configuração de ponte completa.

Na Figura 26 é mostrado a colagem dos extensômetros de cada lado da base metálica indicando, com referência no diagrama da Figura 27, qual dos sensores na montagem, corresponde ao diagrama elétrico.

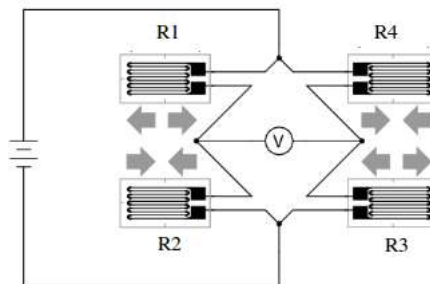
Figura 26: Montagem dos extensômetros na base metálica.



Fonte: Produzido pelo autor.

Na figura, em (A) mostra a montagem da superfície superior da base, em (B), a superfície inferior.

Figura 27: Diagrama de ligação em meia ponte.

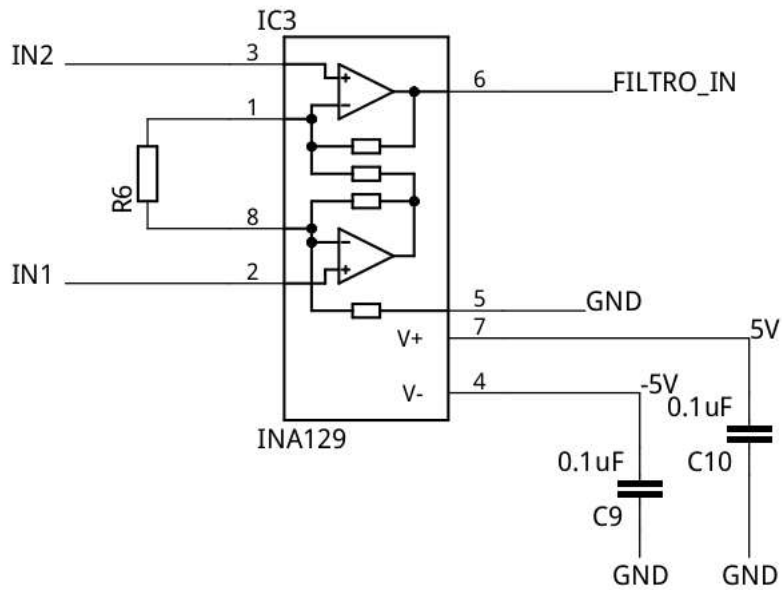


Fonte: Adaptado de (AGILENT TECHNOLOGIES, 2012)

3.5.2 Amplificador de instrumentação

Este subsistema tem como componente principal um amplificador de instrumentação INA129. O ganho deste amplificador é ajustado pelo resistor $R6$ escolhido no valor de 2.5Ω . Este valor proporciona um ganho aproximado de $20000\times$, valor este determinado experimentalmente como sendo o mais adequado ao funcionamento do sistema. O diagrama do estágio amplificador é mostrado na Figura 28.

Figura 28: Diagrama do amplificador de instrumentação.



Fonte: Produzido pelo autor.

Trata-se de um amplificador que necessita de alimentação por fonte simétrica e os capacitores $C9$ e $C10$ são recomendados como filtros para garantir baixo ruído na saída do amplificador (TEXAS INSTRUMENTS, 2018).

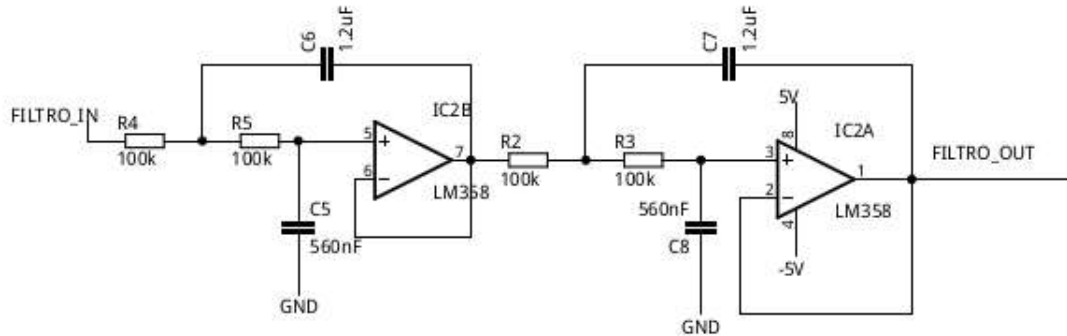
3.5.3 Filtro Passa-Baixas

O sinal produzido pelos extensômetros metálicos será proporcional ao torque desenvolvido pelo motor, porém junto com este sinal, estarão ruídos produzido por imperfeições mecânicas na montagem da planta.

Devido à possibilidade de trabalhar em rotações muito baixas com o motor, da ordem de 2 RPS (rotações por segundo), e também, ser desejável forte atenuação dos ruídos, optou-se por montar um filtro ativo do tipo passa-baixas de quarta ordem ligado à saída do amplificador de instrumentação.

Este filtro consiste em dois estágios de segunda ordem ligados em cascata e com frequência de corte em 2Hz. O diagrama desse filtro é mostrado na Figura 29 e os cálculos para dimensionamento dos componentes apresentado no apêndice B.

Figura 29: Filtro Butterworth de quarta ordem.



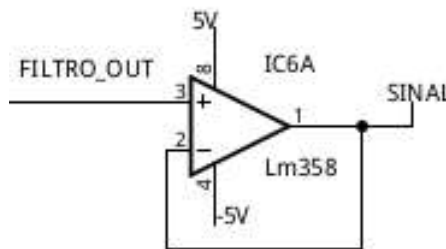
Fonte: Produzido pelo autor.

3.5.4 Circuito casador de impedância.

A saída do filtro poderia ser ligada diretamente ao sistema de medição, porém efeitos de carregamento poderiam alterar suas características de funcionamento. Para evitar este inconveniente, a saída do filtro alimenta um circuito casador de impedância.

este circuito consiste em um amplificador operacional configurado como seguidor de tensão. Desse modo, a impedância de entrada sendo bastante alta e a impedância de saída sendo baixa, promove-se o casamento de impedância entre a saída do filtro e a carga (voltímetro) que será utilizado para fazer as medições do sinal de saída. Na Figura 30 é mostrado o diagrama do estágio isolador.

Figura 30: Diagrama do circuito casador de impedância.



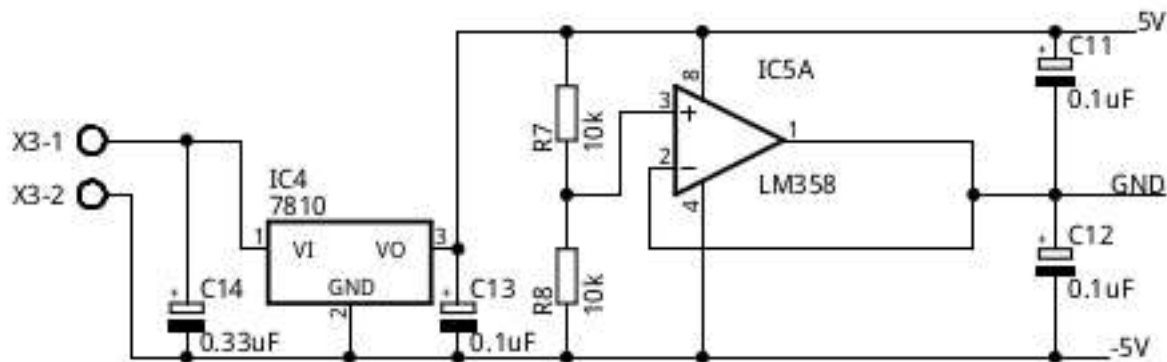
Fonte: Produzido pelo autor.

3.5.5 Fonte de alimentação.

O uso de amplificadores operacionais, na maioria das vezes, exige que a fonte de alimentação seja do tipo simétrica. Porém, a maioria dos sistemas elétricos de máquinas dispõe apenas de uma fonte de alimentação simples, tornando o uso de fontes simétrica bastante imprático à implementação do sistema de medição de torque.

Por esse motivo a fonte de alimentação do sistema de medição foi projetada para fornecer tensão simétrica de alimentação a partir de uma fonte simples. O diagrama completo do amplificador é mostrado na Figura 31.

Figura 31: Fonte de alimentação.



Fonte: Produzido pelo autor.

Para fazer a alimentação desse subsistema, foi empregada a saída em 12V de uma fonte de bancada da marca Minipa modelo MPC3003D.

3.6 Aferição do leitor da célula de carga do dinamômetro

O dinamômetro é um sistema eletro-mecânico destinado a fazer medições de torque e potência de motores elétricos ou de combustão interna. Neste trabalho é desenvolvido um pequeno dinamômetro com a finalidade de fazer apenas a medição de torque.

O dinamômetro, que é montado junto ao suporte do gerador, usa uma célula de carga retirada de uma balança de cozinha e que faz a medição do esforço necessário para impedir que o gerador gire em torno do próprio eixo. É de grande importância verificar se, após feita a fixação dessa célula de carga na base metálica, o sistema de leitura da balança eletrônica está corretamente aferido em relação a grandeza dos esforços recebidos.

Para fazer a aferição foram utilizados alguns pesos padrão construídos com porcas e parafusos de aço previamente pesados em uma segunda balança eletrônica utilizada como referência de aferição. Usando esses pesos padrão, foi feita a comparação do valor indicado pela balança de referência, a balança (ainda montada) da qual foi retirado a célula de carga do dinamômetro e também conferido o valor indicado pelo leitor com a célula de carga montada na base metálica da planta.

A balança usada como referência é da marca JIELI modelo ACS-JL208 e na Figura 32 são ilustrados os processos: (A) Pesos-padrão são aferidos em balança de referência, em (B) os valores indicados por balança utilizada como leitor de célula de carga são conferidos com pesos-padrão ; em (C) o Leitor de célula de carga é aferido com os pesos-padrão quando esta é fixada na base metálica.

Figura 32: Comparação das medidas entre balança de referência e leitor da célula de carga do dinamômetro: em (A) Pesos-padrão são aferidos em balança de referência, em (B) valor dos pesos são conferidos em balança utilizada como leitor de célula de carga do dinamômetro; em (C) Leitor de célula de carga é aferido com os pesos-padrão



Fonte: Produzido pelo autor.

Os pesos-padrão foram escolhidos de modo a somarem um valores de pesos próximos ao que a célula de carga vai receber durante o funcionamento do dinamômetro no sistema de medição de torque.

É importante ressaltar que esta aferição não será feita diretamente sobre o sistema eletrônico que faz a leitura da célula de carga, mas será feita uma correção na escala de torque do gráfico de aferição de acordo com os desvios observados durante o processo descrito.

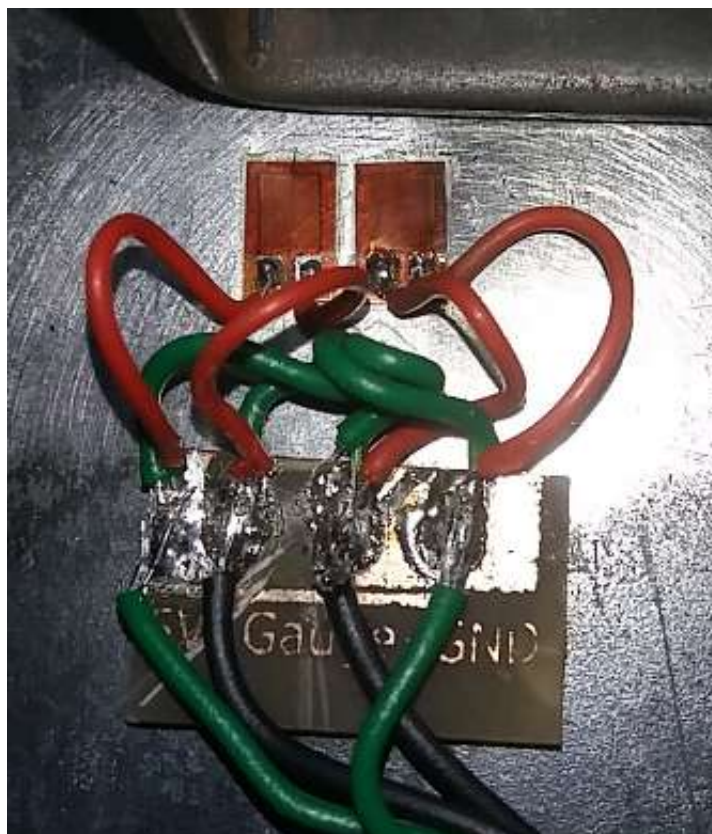
3.7 Montagem do circuito e testes preliminares

Usando o *software Eagle*, foi criado um *layout* para a placa de circuito impresso. Esta placa confeccionada em fenolite foi montada com componentes comuns e facilmente encontrados no comércio.

Na base metálica da planta, no ponto 2 indicado na Figura 40, foram colados dois a dois os quatro extensômetros em lados opostos da chapa, de acordo com o diagrama da Figura ??.

Na Figura 33 é mostrado uma primeira versão da a montagem dos extensômetros em um dos lados da chapa metálica.

Figura 33: Primeira montagem dos extensômetros na base metálica.



Fonte: Produzido pelo autor.

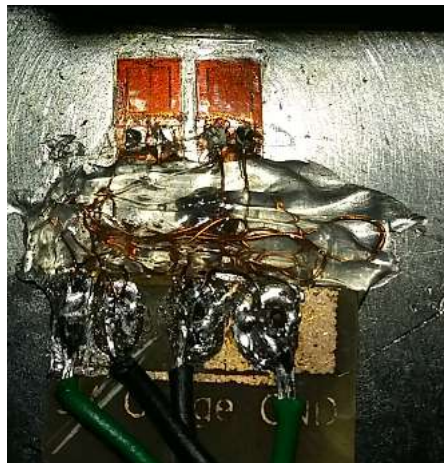
Com o sistema eletrônico montado, faz-se anotações dos valores de tensão na saída e também os valores dos pesos indicados pelo leitor da célula de carga do dinamômetro.

Ocorrem então grande flutuação no valor da tensão de saída. Efeitos térmicos nos fios de ligação dos extensômetros comprometem a precisão na coleta de dados.

Para resolver este problema foi necessário substituir os fios de ligação mostrados na Figura 33. Estes condutores imersos em ar não sofriam simultaneamente as mesmas variações térmicas, ocasionando as flutuações indesejadas na tensão de saída do sistema de medição de torque.

Desse modo foi refeita a montagem usando fios de cobre esmaltados e envoltos em silicone para garantir igualdade de variação térmica. Esta nova montagem em uma das faces da base metálica é mostrada na Figura 34.

Figura 34: Montagem definitiva dos extensômetros na base metálica.



Fonte: Produzido pelo autor.

Com essa última configuração dos extensômetros alcançou-se boa estabilidade do sinal de saída. Dessa forma, é montado um sistema de controle de *offset*. O diagrama deste sistema de compensação é mostrado na Figura 3, $R_a = 1k\Omega$, $R_{NULL} = 1k\Omega$ e $R_{POT} = 2k2\Omega$. Estes valores de resistores e potenciômetro foram determinados de modo a oferecer um ajuste suave, fazendo percorrer pelo circuito, correntes muito pequenas de modo a não comprometer a sensibilidade do sistema de medição de torque.

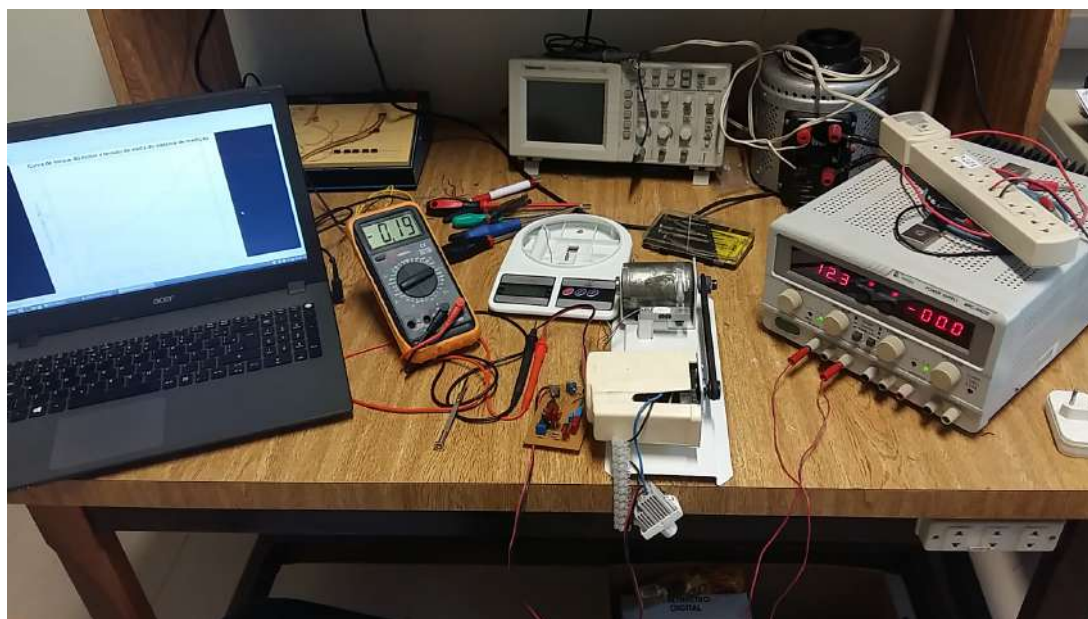
Na Figura 35 é mostrado o aspecto final do sistema de medição de torque do motor com todo o aparato eletrônico e mecânico montado, e na Figura 36 é mostrado o sistema já em processo de coleta dos dados.

Figura 35: Sistema completo.



Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 36: Sistema completo e em fase de coleta de dados.



Fonte: Produzido pelo autor.

4 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES E AFERIÇÃO DO LEITOR DA CÉLULA DE CARGA DO DINAMÔMETRO

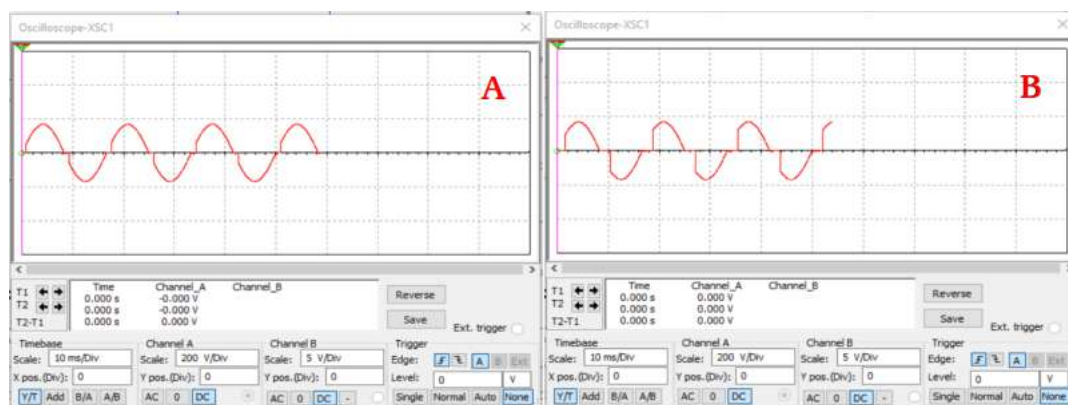
Neste capítulo é feita a apresentação dos resultados das simulações introduzidas no capítulo metodologia. Cada seção apresenta os principais resultados para os circuitos e componentes do sistema de medição de torque.

4.1 Simulação do Dimmer

Para verificar o funcionamento do conversor CA-CA do tipo *Dimmer*, foi desenhado o diagrama da Figura 12 no *Software Multisim*. Com o uso da ferramenta osciloscópio foi possível visualizar a forma da onda de tensão que alimenta a carga.

Na Figura 37 é mostrada a simulação do controlador para dois valores diferentes de ângulo de condução, 25°em (A) e 50°em (B).

Figura 37: Saída do controlador tipo *Dimmer* para dois valores diferentes de ângulos de condução.



Fonte: Produzido pelo autor

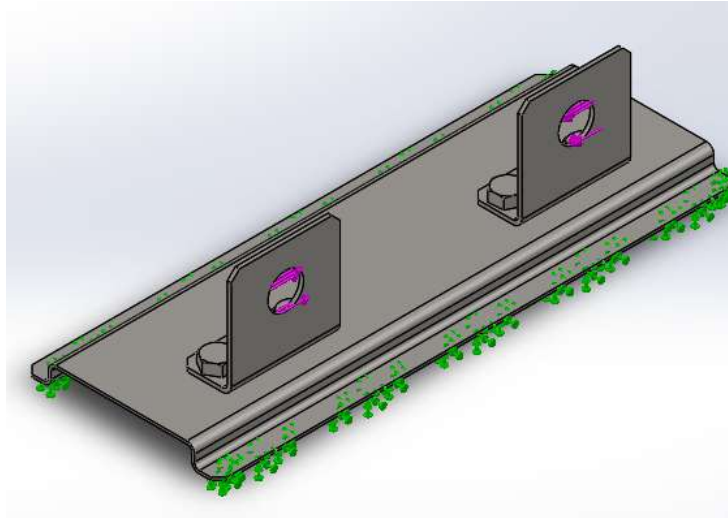
Este formato de onda é o esperado para este tipo de controlador de tensão, confirmando a correto funcionamento do circuito de controle de rotação do motor.

4.2 Simulação das deformações da estrutura

Sobre o desenho em 3 dimensões apresentados na Figura 13 foram posicionados os esforços segundo as seguintes considerações:

Quando o motor faz o acionamento do gerador forma-se um par ação-reação na correia. A correia é então tracionada, formando um esforço no sentido de aproximar os dois suportes de motor. O posicionamento deste esforço é mostrado na Figura 38

Figura 38: Posicionamento do esforço resultante da tração da correia sobre os suportes de motor.

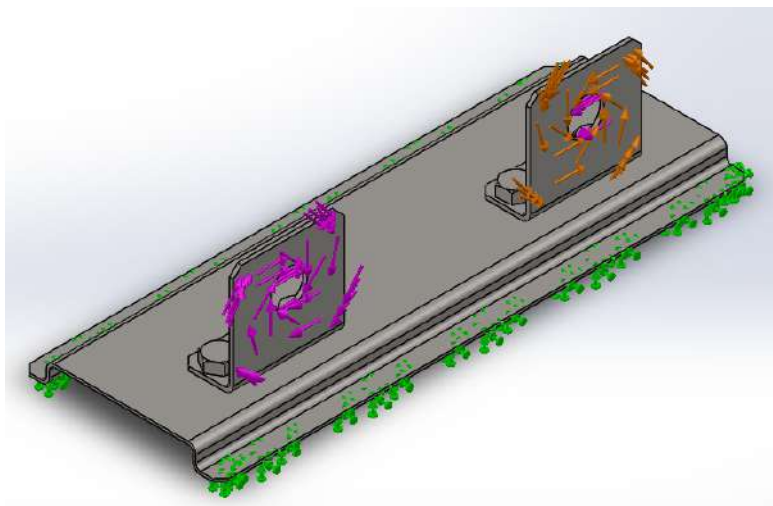


Fonte: Produzido pelo autor.

Na Figura as setas verdes na base da estrutura simbolizam reações de apoio usadas como referência para a simulação.

Juntamente com o esforço ilustrado pela Figura 38, ainda há ação e reação de torque. O motor imprime torque ao suporte no sentido contrário ao que imprime à sua polia. Desse modo é necessário que na simulação seja colocado em cada suporte de motor, além da força, também um torque como mostrado na Figura 39.

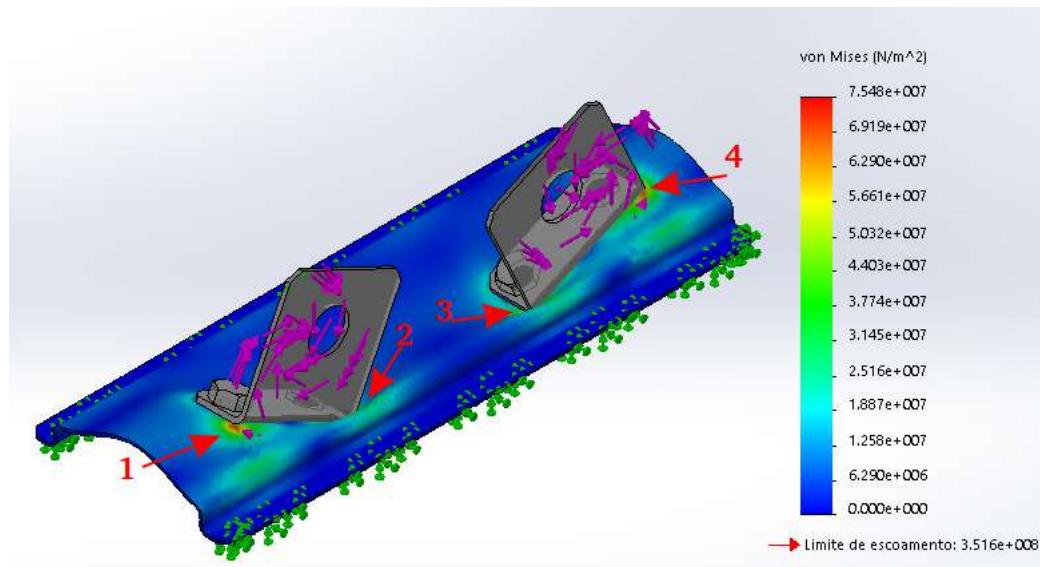
Figura 39: Posicionamento do torque sobre os suportes do motor.



Fonte: Produzido pelo autor.

Como o objetivo desta simulação é apenas explicitar a localização das deformações causadas na base metálica, os suportes foram considerados corpos rígidos e também foi desprezada a distância entre o centro do sulco da polia e a superfície de cada suporte. Na Figura 40 é mostrado o resultado da simulação com deformação da estrutura.

Figura 40: Resultado da simulação mostrando a deformação da base metálica e os melhores pontos para a fixação dos extensômetros.



Fonte: Produzido pelo autor.

Na Figura 40 são mostrados, com setas vermelhas e enumeradas, os melhores pontos para a fixação dos extensômetros. Dos quatro pontos destacados, foi escolhido o indicado pela seta de número 2 para a montagem dos sensores.

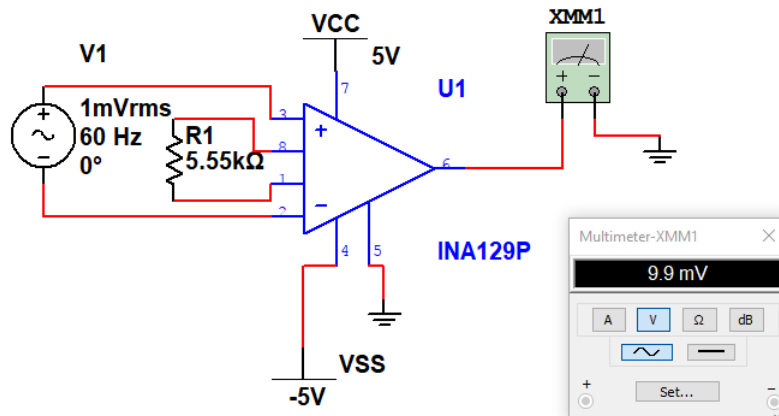
É importante ressaltar que essa simulação é feita de maneira apenas qualitativa e os valores das forças e torques utilizados nesta simulação foram arbitrários. Nota-se também que o *software*, como resultado da simulação, demonstra uma deformação exagerada para fins puramente ilustrativos. Na prática os corpos não sofrerão deformações tão acentuadas.

4.3 Simulação do amplificador de instrumentação

A fim de verificar se o resultado produzido pelo *software Multisim* coincide com valores apresentados na folha de dados do amplificador de instrumentação, fez-se a simulação do funcionamento deste componente.

Na Figura 41 um sinal senoidal de $1mV$ foi dez vezes aumentado com o uso do valor de $5,55k\ \Omega$ para o resistor $R6$. Este valor coincide com o valor discriminado em folha de dados para esta magnitude de ganho.

Figura 41: Simulação de funcionamento do amplificador para ganho de 10X.

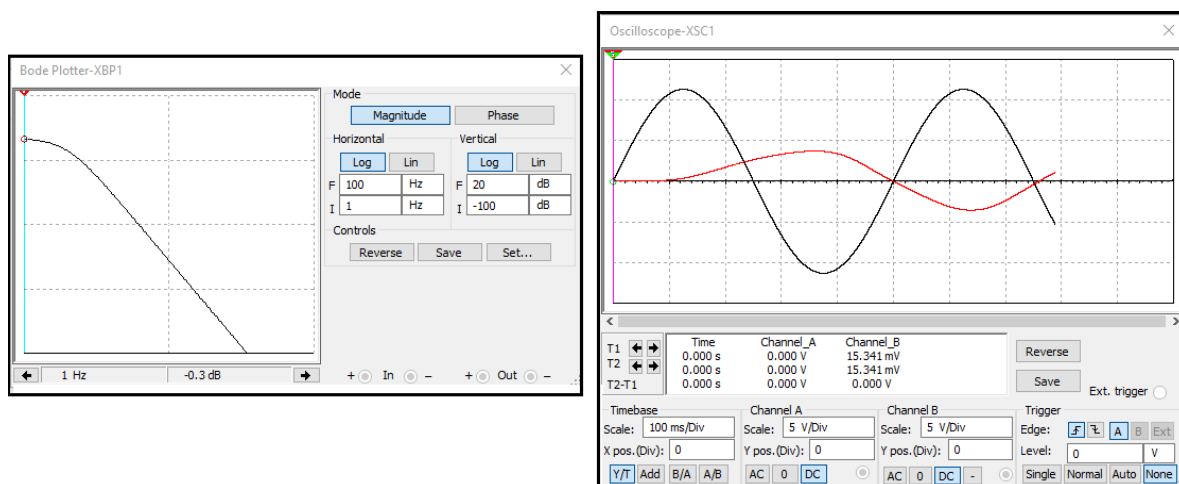


Fonte: Produzido pelo autor.

4.4 Simulação do filtro passa baixas

No *software Multisim* foi desenhado o diagrama da Figura 29 onde o resultado da simulação é mostrado na Figura 42. Nela é possível verificar, através do uso da ferramenta osciloscópio, a amplitude do sinal de saída quando o filtro é excitado por uma onda senoidal de 2Hz. Além disso, através da ferramenta *Bode plotter* é possível visualizar o diagrama de Bode indicando como sendo de aproximadamente -80dB/década o valor da atenuação do sistema.

Figura 42: Simulação do filtro Butterworth de quarta ordem.



Fonte: Produzido pelo autor.

O resultado dessa simulação concorda com o valor teórico de atenuação para este tipo de filtro. Um filtro de primeira ordem possui atenuação de 20 dB/década e o filtro de quarta ordem possui atenuação de 80 dB/década.

Nota-se também que o filtro insere uma defasagem (que é inerente ao uso de filtros) da onda de saída em relação a onda de entrada. Porém, para a aplicação desejada neste

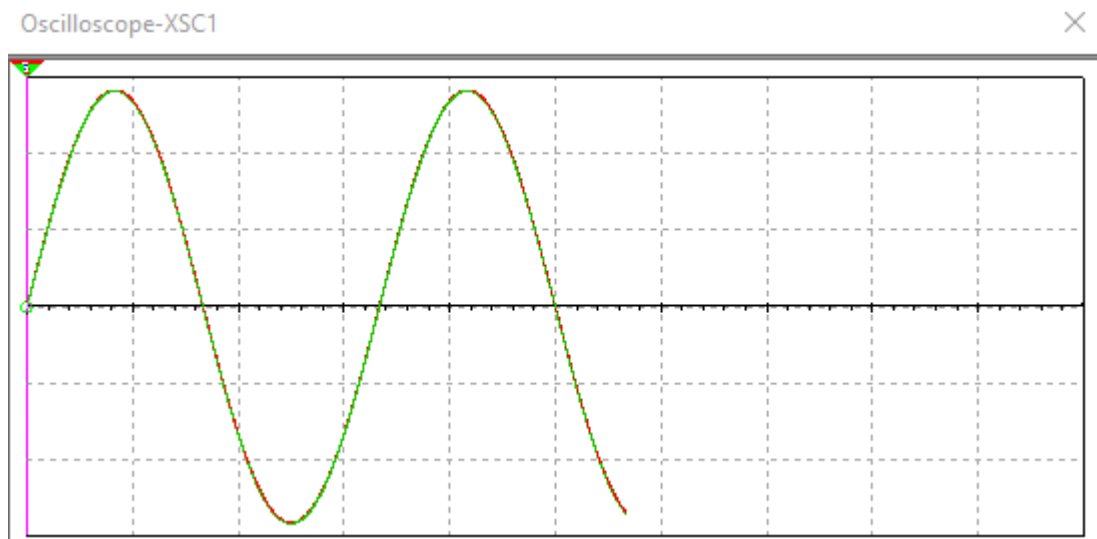
trabalho essa defasagem é irrelevante, não comprometendo assim a validade do resultado.

4.5 Simulação do sistema casador de impedância

No *software Multisim* foi desenhado o diagrama da Figura 30. Um sinal foi injetado na entrada do circuito e observa-se o sinal de saída.

Na figura 43 é mostrado o resultado da simulação desse subsistema com a ferramenta osciloscópio. Nota-se que o sinal de entrada, que está representado pela cor verde, e o sinal de saída, que está representado pela cor vermelha, são idênticos.

Figura 43: Simulação do sistema casador de impedância.



Fonte: Produzido pelo autor.

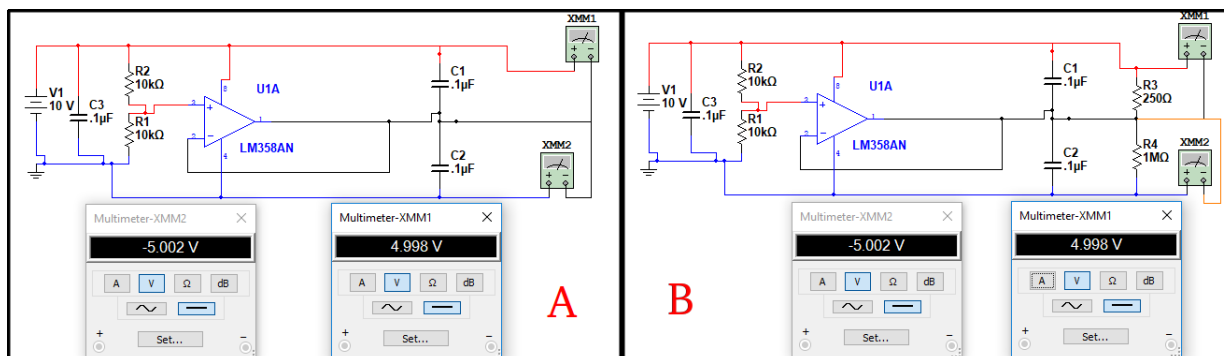
Este resultado observado concorda com o teórico para um seguidor de tensão (PERTENCE, 2003), verifica-se então o correto funcionamento deste circuito.

4.6 Simulação da fonte de alimentação

No *software Multisim* foi desenhado o diagrama da fonte de alimentação exibido na Figura 31, porém usando uma fonte ideal de 10V no lugar do regulador de tensão (IC4 - 7810). Esta mudança no circuito da simulação não compromete os resultados, pois a fonte fornece capacidade de corrente inferior (20mA) à capacidade de corrente do regulador de tensão (1A).

Com a ferramenta multímetro é possível visualizar as tensões positiva e negativa da fonte. O resultado da simulação é mostrado na Figura 44.

Figura 44: Simulação da fonte de alimentação.



Fonte: Produzido pelo autor.

Em (A) a fonte é simulada sem carga e em (B) a fonte é simulada com uma carga desbalanceada através do uso dois resistores de valores distintos. A simulação feita com carga desbalanceada exibe o resultado obtido para pior caso de funcionamento da fonte, quando é fornecido a corrente máxima de saída da fonte em apenas um dos lados da fonte. Porém é uma situação que não ocorre no sistema proposto neste trabalho.

Verificando os valores das tensões na situação sem carga e com carga, conclui-se que o funcionamento da fonte está adequado ao uso do sistema de medição de torque.

4.7 Aferição do leitor da célula de carga do dinamômetro

Na Tabela 2 é feita a comparação entre pesos medidos na balança de referência e pelo sistema de leitura da célula de carga do dinamômetro.

Tabela 2: Comparação entre os pesos medidos na balança de referência, leitor da célula de carga (balança montada) e leitor de célula de carga (instalado na base metálica).

Balança de referência	Leitor da célula de carga (balança ainda montada)	Leitor da célula de carga (instalado na base metálica)
12 (g)	12 (g)	12 (g)
18 (g)	18 (g)	18 (g)
84 (g)	84 (g)	84 (g)
98 (g)	98 (g)	98 (g)
110 (g)	110 (g)	110 (g)

Fonte: Produzido pelo autor.

Com base na Tabela observa-se que o sistema de leitura da célula de carga está corretamente aferido e adequado para a utilização no dinamômetro.

4.8 Montagem do gráfico de aferição

Com todo o sistema montado foram anotados os valores de tensão de saída do sistema de medição de torque e do peso registrado pela balança eletrônica que compõe o dinamômetro a cada pequeno incremento de tensão de alimentação do motor.

Na Tabela 3 são mostrados os valores de tensão de saída do sistema de medição de torque, o peso registrado pelo sistema da balança que compõe o dinamômetro e também o torque desenvolvido pelo motor.

Tabela 3: Tabela com valores de peso, torque e tensão de saída.

Peso (g)	Tensão (V)	Torque (N.cm)
26	0,11	1,09
34	0,12	1,43
39	0,12	1,64
46	0,14	1,93
51	0,18	2,14
57	0,2	2,39
59	0,21	2,48
62	0,22	2,60
70	0,23	2,94
74	0,24	3,11
78	0,26	3,28

Fonte: Produzido pelo autor

O cálculo do torque do motor é feito usando a equação:

$$T = \frac{P}{1000}gd \quad (4.1)$$

Onde T é o torque, P é o peso medido pelo leitor da célula de carga e d é a distância entre o ponto de apoio da alavanca até o centro de rotação do gerador. A medida d (d=4,2cm) é destacada na Figura 11.

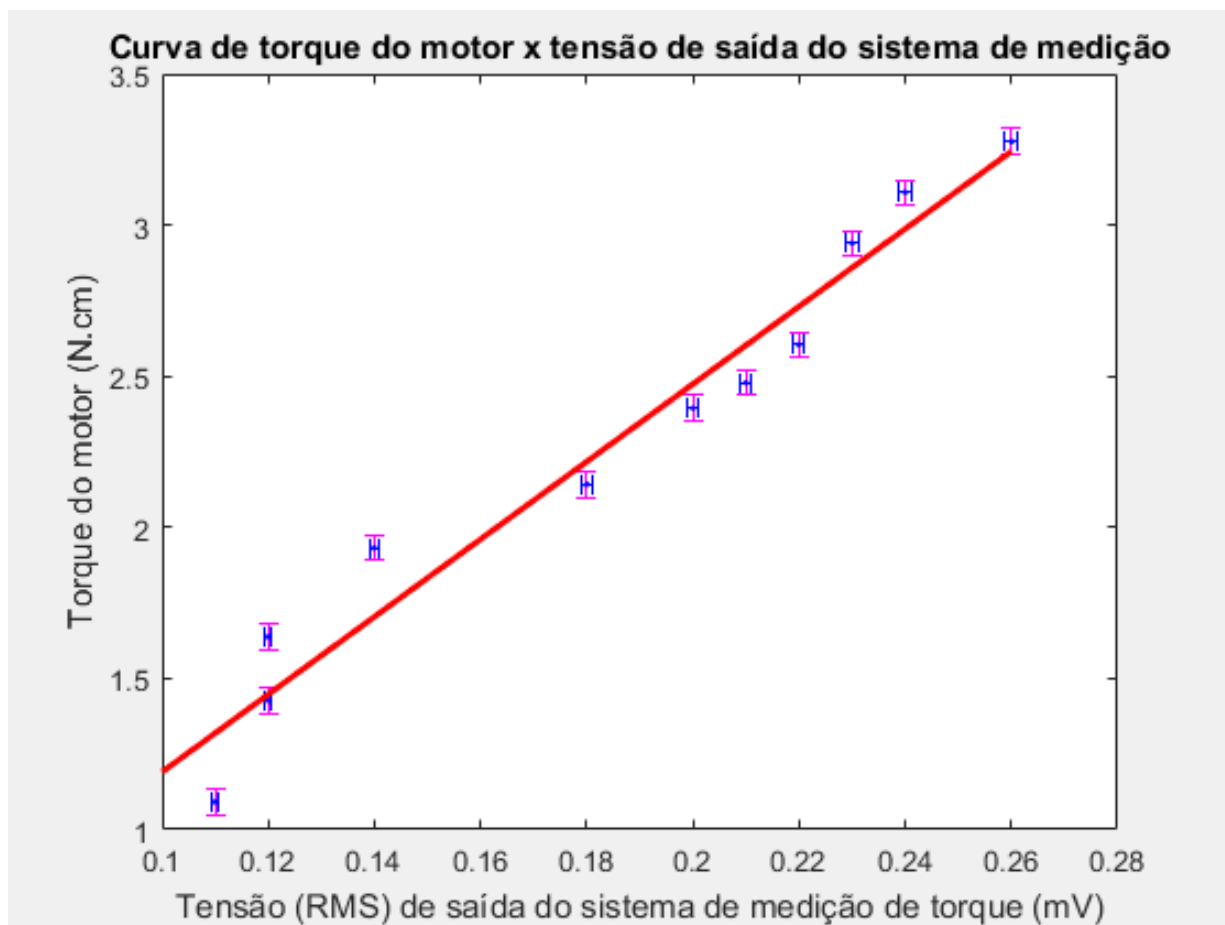
Na Figura 45 é mostrado o gráfico de torque do motor x tensão na saída do sistema de medição de torque. Os pontos discriminados no gráfico possuem barras de erro gerados pelos desvios de 1g do sistema de leitura da célula de carga usada no dinamômetro e do erro de 0,5% do valor de leitura advindo do multímetro na escala usada para fazer as medições.

Com base nos pontos do gráfico, foi traçado em vermelho o ajuste linear, o qual obedece a equação:

$$\text{Torque} = 12,83x - 0,09$$

Onde "x" é o valor de tensão obtido na saída do sistema de medição de torque (em mV) e "Torque" é o valor do torque desenvolvido pelo motor (em N.cm).

Figura 45: Curva de torque do motor x tensão de saída do sistema de medição de torque.



Fonte: Produzido pelo autor

4.9 Discussão dos resultados

O comportamento ideal do gráfico foi assumido como sendo linear, pois, tanto na medição de torque pelo dinamômetro quanto pelo sistema de medição desenvolvido neste trabalho, há a utilização de células de carga que operam em regime elástico para dois materiais diferentes (alumínio e aço, respectivamente). Devido ao fato de ambas as células de carga trabalharem em regime elástico (ou linear), o comportamento das duas células de carga se diferem apenas pela inclinação da reta.

Alguns fatores contribuíram para o comportamento não linear dos pontos do gráfico mostrado na Figura 45:

- O principal causador de erros foi o atrito do mancal de deslizamento do dinamômetro que provocou pequenos emperramentos que se opunham à rotação da carcaça do gerador. Como o torque desenvolvido pelo motor e gerador eram bastante reduzidos, tal atrito exerceu grande influencia nas medidas mesmo com o uso de óleos lubrificantes.
- Houveram flutuações de tensão devido ao alto ganho utilizado no sistema de amplificação (20000x). A principal desvantagem em usar altos ganhos é que há maior amplificação de ruídos que se traduzem em flutuações de tensão de saída e que provocam erros de leitura.
- Houveram também erros devido à variação da constante elástica da correia de borracha que se tornava mais macia com o aumento da temperatura da mesma. O aquecimento desse componente era inevitável já que o atrito nas polias do motor e do gerador se intensificavam com aumento da rotação de trabalho.

Apesar de haver variação da constante elástica da correia, a leitura na saída do sistema de medição só é alterada quando o sistema mecânico está parado e livre de forças externas. Uma vez em movimento, a "folga" da correia é compensada pelo movimento das polias.

- Finalmente destaca-se que o fato de terem sido empregados na montagem dois motores de potência reduzida e também ao fato de que a estrutura da base metálica ser bastante rígida, houve pouca deformação causada pela variação de torque do motor. Isso resultou, com relação ao gráfico de aferição, em uma escala muito estreita de tensão, tornando erros devido a pequenas flutuações de tensão e mesmo erros do multímetro bastante relevantes para a construção do gráfico.

4.9.1 Sugestões para trabalhos futuros.

Segue abaixo algumas sugestões ao projeto eletrônico e à montagem mecânica para diminuir os defeitos apontados neste trabalho:

- Substituir o mancal de deslizamento do dinamômetro por um mancal de rolamentos. Este componente evitaria pequenos emperramentos que aconteceram durante o funcionamento do sistema.
- Utilizar dois estágios de amplificadores em cascata para diminuir o ganho exigido de cada um deles. Com isso é possível aumentar a estabilidade do sistema, diminuindo ruídos e oscilações no sinal de saída.
- Utilizar correias com malhas de nylon para diminuir sua elasticidade e também a sua variação de rigidez com o aumento da temperatura.

- Devido à dificuldades de encontrar perfis de chapas mais finas para a confecção da base metálica, é mais prático utilizar motores de potência mais elevadas para aumentar as deformações sobre os extensômetros.
- Utilizar extensômetros maiores para aumentar a variação de resistência com as deformações. Isso permitiria também trabalhar com ganhos mais reduzidos no amplificador, diminuindo também o ruído amplificado no processo.
- Um estudo mais detalhado pode ser feito a respeito do valor da frequência de corte do filtro passa baixas: Através da determinação da faixa de rotação do motor pode estabelecer valores maiores de frequência de corte, implicando na diminuição dos valores dos capacitores utilizados na montagem deste filtro.
- Pode ser utilizado um sistema micro controlado para fazer a leitura dos níveis de tensão de saída do sistema de medição. O uso de micro controladores possibilita não apenas o uso de displays, mas também a implementação de lógicas de automação ou proteção.
- Pode-se estudar a possibilidade de, em trabalhos futuros, fazer a utilização de sensores piezoelétricos. Estes sensores são baratos e mais fáceis de fixar na base metálica.

5 CONCLUSÃO

É possível fazer a medição indireta de torque desenvolvido por um motor elétrico usando técnicas de extensometria junto à estrutura de fixação do mesmo. No entanto, o projeto deste sistema de medição exige cuidados especiais quanto a compensação de efeitos térmicos tanto por parte do circuito eletrônico quanto dos sensores utilizados.

Uma escolha mais criteriosa dos extensômetros a serem utilizados deve ser feita levando em conta a magnitude das deformações que o torque desenvolvido pelo motor proporciona ao seu sistema de fixação. Devido a diferentes tamanhos e geometrias, uma melhor escolha desses sensores permite o uso de ganhos mais reduzidos por parte do amplificador, aumentando a estabilidade do sistema quanto a flutuações de tensão de saída.

A utilização do *software* (*Multisim*) evitou a propagação de erros cometidos durante o projeto elétrico, no entanto ainda houveram problemas de natureza térmica e eletromagnética que não eram possíveis de serem previstos durante as simulações. A experiência em projetos de amplificadores para célula de carga é de grande importância para a redução do tempo de desenvolvimento e aumento da qualidade do sistema de medição.

O uso do *software* de simulação mecânica (*SolidWorks*) oferece grande ajuda no desenvolvimento de sistemas que envolvem técnicas de extensometria. Através do conhecimento dos esforços envolvidos, geometria e material da estrutura mecânica, pode-se fazer boas ilustrações de deformações. Isso permite determinar com precisão qual o melhor local para o posicionamento dos extensômetros.

O sistema de medição proposta neste trabalho oferece uma alternativa para uso em sistemas mecânicos movidos por motores elétricos ou à combustão interna, onde a escassez de sensores impede a utilização de outros métodos de medição de torque. O uso de técnicas de extensometria possibilita a implementação do mesmo tipo lógicas de automação ou de proteção que os demais sistemas de medição de torque permitem.

Versões mais aprimoradas deste sistema de medição podem ser desenvolvidas com o uso de microcontroladores para traduzir os níveis de tensão de saída em números exibidos em um display já na unidade de torque desejada. O sistema desenvolvido neste trabalho dá base para esta implementação, já que os níveis de tensão da fonte de alimentação e da saída do sistema casador de impedância são adequados ao uso de microcontroladores.

REFERÊNCIAS

- AGILENT TECHNOLOGIES. **Resolvendo problemas em aplicações de célula de carga com a solução de conectividade sem fio da agilent**. [S.l.]: Agilent Technologies, 2012.
- BRUSSAMARELLO, V. **Introdução a medição com extensômetros (Strain-gages)**. Porto Alegre: UFRGS, 2015.
- BULLMER, W. et al. **Arrangement of controlling the output torque of an automatic transmission**. Estados Unidos: US Patent, 18 apr. 1995. US 005407401A. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/US5407401A/en?q=us5407401A>>.
- CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5. ed. [S.l.]: AMGH Editora, 2013.
- DOEBELIN, E. O.; MANIK, D. N. **Measurement systems: application and design**. New York: McGraw-Hill, 1990.
- GUZZELLA, L.; ONDER, C. **Introduction to modeling and control of internal combustion engine systems**. New York: Springer, 2010.
- HOFFMANN, K. **An introduction to measurements using strain gages**. [S.l.]: Hottinger Baldwin Messtechnik Darmstadt, 1989.
- MECANICA INDUSTRIAL. Como funciona um motor universal. 2018. Disponível em: <<https://www.mecanicaindustrial.com.br/como-funciona-o-motor-universal/>>.
- NATIONAL INSTRUMENTS. **Strain gauges measurement: a tutorial**. [S.l.]: National Instruments Corporation, 1998.
- PERTENCE, A. **Amplificadores operacionais e filtros ativos**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2003.
- SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. **Baja SAE rules**. Warrendale: SAE, 2018.
- TEXAS INSTRUMENTS. **Datasheet INA128 - INA129**. Dallas: Texas Instruments Incorporated, 2018.

Apêndices

APÊNDICE A – APENDICE

A.1 Apêndice A - Dimensionamento do Filtro passa baixas

Utilizando a tabela 46, foram encontrados os valores de **a** e **b** para um filtro do tipo Buterworth e segunda ordem.

Figura 46: Parâmetros a e b para filtros Butterworth de até quarta ordem.

n	a	b
2	1,414214	1
3	1,000000	1
	—	1
4	0,765367	1
	1,847759	1
5	0,618034	1
	1,618034	1
	—	1
6	0,517638	1
	1,414214	1
	1,931852	1
7	0,445042	1
	1,246980	1
	1,801938	1
	—	1
8	0,390181	1
	1,111140	1
	1,662939	1
	1,961571	1

Fonte: ([PERTENCE, 2003](#)), pág 203.

Desse modo $a = 1.414214$ e $b = 1$

A frequência de corte desejada é de 2Hz ($f = 2$).

$$C1' = a/2b$$

$$C2' = 2/a$$

Define se então o valor de escalonamento de impedância: $ISF = 10^5 \text{ hom}$

Define se também o fator de escalonamento de frequência: $FSF = 2 * \pi * f1Hz$

Então:

$$C1 = C1'/(FSF * ISF) \text{ ou } C1 \cong 560nF$$

$$C2 = C2'/(FSF * ISF) \text{ ou } C2 \cong 1.2uF$$

$$R1 = R2 = ISF = 100k \text{ hom}$$

A.2 Apêndice B - Código do Matlab utilizado na construção do gráfico de aferição

```

clear all
close all

D=4.2; % distancia do braço, 4.2cm

Peso=[26 34 39 46 51 57 59 62 70 74 78];
Peso=Peso/1000; % pois as massas foram medidas em gramas
g=10;
Forca=Peso*g;
Torque=Forca*D;
Erro_peso=1/1000*10*D;
Erro_Torque=linspace(0.042,0.042,11);

Tencao=[0.11 0.12 0.12 0.14 0.18 0.2 0.21 0.22 0.23 0.24 0.26];
Erro_Tensao=Tencao*0.005;
plot(Tencao,Torque,'*k')
title("Curva de torque do motor x tensão de saída do sistema de
medição");
xlabel("Tensão de saída do sistema de medição de torque (mV)");
ylabel("Torque do motor (N.cm)");

constant=lsqcurvefit(@f, [0,0],Tencao,Torque);

m=constant(1)
c=constant(2)

xfit=0.1:0.01:0.26;
yfit=f(constant,xfit);

figure(2)
errorbar(Tencao, Torque,Erro_Torque,'.m')
hold on
errorbar(Tencao, Torque,Erro_Tensao,'horizontal','.b')
title("Curva de torque do motor x tensão de saída do sistema de
medição");
xlabel("Tensão de saída do sistema de medição de torque (mV)");
ylabel("Torque do motor (N.cm)");
hold on
plot(xfit,yfit,'r','linewidth',2)

function y=f(constant,x)
    y=constant(1)*x + constant(2);%y=mx+c

end

```