



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**EL SHADAY NUNES SOUZA**

**SISTEMA REMOTO PARA SENSORIAMENTO DE TORQUE EM  
EIXOS ROTATIVOS**

**Cruz Das Almas - BA**

**2021**

**El Shaday Nunes Souza**

**SISTEMA REMOTO PARA SENSORIAMENTO DE TORQUE EM  
EIXOS ROTATIVOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia.

Orientador: Prof<sup>o</sup>. Dr. Ivanoé João Rodowanski

**Cruz Das Almas - BA**

**2021**

**El Shaday Nunes Souza**

## **SISTEMA REMOTO PARA SENSORIAMENTO DE TORQUE EM EIXOS ROTATIVOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia.

Aprovado em: **27 / 09 / 2021**

### **Banca Examinadora**

*Emitido em 27/09/2021*

**FORMULARIO Nº 12/2021 - CETEC (11.01.22)**

**(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)**

*(Assinado digitalmente em 29/09/2021 19:00 )*

**ACBAL RUCAS ANDRADE ACHY**  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
1932340

*(Assinado digitalmente em 29/09/2021 12:17 )*

**IVANÓE JOAO RODOWANSKI**  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
2277028

*(Assinado digitalmente em 30/09/2021 11:56 )*

**ADELSON RIBEIRO DE ALMEIDA JUNIOR**  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
2279463

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sistemas.ufrb.edu.br/documentos/> informando seu número: **12**, ano: **2021**, tipo: **FORMULARIO**, data de emissão: **29/09/2021** e o código de verificação: **8ab759dbf4**

## Dedicatória

À minha família e aos amigos, que me deram força e incentivo, me ajudando a persistir e não desistir dos meus sonhos.

## **Agradecimentos**

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais Edna e Andrezito, por nunca desacreditarem dos meus objetivos e estarem sempre ao meu lado apoiado minhas decisões e me incentivado correr atrás dos meus sonhos. À minhas irmãs Agthan, Adna e Edla, que assim como meus pais estiveram ao meu lado e apesar da distância nos últimos anos me transmitiram muita força e carinho.

Ao meu orientador, Dr. Ivanoé, pela confiança e conselhos que ajudaram na elaboração do trabalho. Agradeço também a todos professores que passaram pela minha formação por terem me proporcionado inúmeros aprendizados.

Agradeço as amizades construídas na Universitária, especialmente à Isabela, Sarita, Laura, Rony e Arthur por tornarem minha passagem pela universidade mais prazerosa. Por fim agradeço a todos que contribuíram para minha formação e que torcem pelo meu sucesso.

*“O insucesso é apenas uma oportunidade  
para recomeçar de novo com mais  
Inteligência”.*

*(Henry Ford)*

## Resumo

As indústrias procuram constantemente melhorar a eficiência dos seus processos. Uma excelente opção para aperfeiçoar as operações, ficar à frente de falhas mecânicas, economizar tempo dos funcionários e reduzir os custos da empresa é medir e controlar o torque em equipamentos rotativos. Esse tipo de medição possibilita executar manutenções preventivas antes que grandes falhas ocorram devido ao torque excessivo, prologando a vida útil do equipamento. Contudo, realizar essa medição em plena operação da máquina ou sistema não é uma tarefa fácil, em razão, principalmente, da necessidade de alimentação e transferência de dados com o sistema em rotação. Neste trabalho é proposto um método de medição de dados de torque de forma remota em eixos rotativos, utilizando extensômetros elétricos, que são medidores de deformação que convertem as deformações em variações equivalentes em sua resistência elétrica, junto a um sistema de aquisição de dados e comunicação sem fio. Após a colagem dos sensores e montagem do sistema foram realizados ensaios estáticos e dinâmicos com o intuito de calibrar e avaliar o sistema desenvolvido, além do ensaio de rendimento da bateria embarcada no sistema. Os resultados do ensaio estático possibilitaram a calibração do sistema, assim como os ensaios dinâmicos mostraram um bom funcionamento do sistema proposto. Já o ensaio de rendimento da bateria mostrou um alto consumo do sistema, sendo necessário buscar melhorias.

**Palavras-Chave:** Sistema remoto; Torque; Extensômetro.

## **Abstract**

Industries are constantly looking to improve the efficiency of their processes. An excellent option to improve operations, stay ahead of mechanical failures, save employee time, and reduce company costs is to measure and control torque on rotating equipment. This type of measurement makes it possible to perform preventive maintenance before major failures occur due to excessive torque, extending the life of the equipment. However, performing this measurement while the machine or system is in full operation is not an easy task, mainly due to the need to feed and transfer data while the system is rotating. In this paper, we propose a method for measuring torque data remotely on rotating shafts, using strain gauges, which are strain gauges that convert deformations into equivalent variations in their electrical resistance, together with a data acquisition and wireless communication system. After gluing the sensors and assembling the system, static and dynamic tests were carried out in order to calibrate and evaluate the developed system, as well as the performance test of the battery built into the system. The results of the static test allowed the calibration of the system, and the dynamic tests showed a good functioning of the proposed system. The battery performance test, on the other hand, showed a high consumption of the system, making it necessary to seek improvements.

**Key words:** Remote system; Torque; Strain gauge.



## LISTA DE FIGURAS E GRÁFICOS

Figura 1 - Efeito do torque em um eixo circular.	17
Figura 2 - Extensômetro elétrico.	18
Figura 3 - Circuito geral, ponte de Wheatstone.	19
Figura 4 - (A)	20
Figura 5 - Posicionamento dos extensômetros em eixos para medição de torque.	20
Figura 6 - Método de medição via anéis coletores.	21
Figura 7 - Método de medição via transformadores circulares.	21
Figura 8 - Sistema de medição proposto por Bin.	22
Figura 9 - Módulo HX711.	22
Figura 10 - Microcontrolador ESP32.	23
Figura 11 - Fluxograma do sistema de medição de torque proposto.	24
Figura 12 - Comunicação entre os componentes eletrônicos.	26
Figura 13 - Extensômetro uniaxial.	26
Figura 14 - Preparo da superfície para colagem.	28
Figura 15 - Colagem dos extensômetros.	28
Figura 16 - Soldagem e proteção do sensor.	29
Figura 17 - Resultado do processo de colagem e soldagem dos extensômetro.	29
Figura 18 – Itens utilizados no ensaio de torque estático.	31
Figura 19 – Ilustração do ensaio estático e exibição dos dados.	32
Figura 20 - Ilustração do ensaio dinâmico.	33
Figura 21 - Desenho mecânico das peças para o ensaio dinâmico.	33
Figura 22 - Peças conectadas ao tubo.	34
Figura 23 - Página web gerada pelo sistema de medição de torque.	34
Figura 24 - Bateria ligada ao sistema para ensaio de rendimento energético.	35
Gráfico 1 - Torque Versus Sinal Digital Amplificado.	37
Gráfico 2 - Resultado do ensaio de torque dinâmico - 0 N.	37
Gráfico 3 - Resultado do ensaio de torque dinâmico – 13,3 N.	38
Gráfico 4 - Resultado do ensaio de torque dinâmico – 18,5 N.	39
Gráfico 5 - Resultado do ensaio de torque dinâmico – 22,6 N.	39

Gráfico 6 - Resultado do ensaio de torque dinâmico – 28,4 N.	40
Gráfico 7 - Curva de descarregamento da bateria no sistema.	41

### **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Materiais e equipamentos.	25
Tabela 2 - Especificações técnicas HX711.	25
Tabela 3 - Especificações técnicas ESP32.	26
Tabela 4 - Especificações técnicas extensômetro.	27
Tabela 5 - Força peso aplicada no ensaio dinâmico.	34
Tabela 6 - Valores das massas, sinal e torque referente.	36

## LISTA DE ABREVIACES

<b>mm</b>	milímetros
<b>F</b>	Força
<b>N</b>	Newton
<b>cm</b>	centímetros
<b>g</b>	gramas
<b>T</b>	Torque
<b>h</b>	horas
<b>s</b>	segundos
<b><math>\Omega</math></b>	Ohm
<b>V</b>	Volt
<b>mAh</b>	miliampere-hora
<b>LED</b>	<i>Light Emitting Diode</i> (diodo emissor de luz)
<b><math>^{\circ}\text{C}</math></b>	Graus Celsius
<b>Vin</b>	<i>tensão de entrada</i>
<b>Vout</b>	<i>tensão de saída</i>

## **Sumário**

LISTA DE FIGURAS E GRÁFICOS	9
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE ABREVIACÕES	11
1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Objetivo geral	15
1.2. Objetivos específicos	15
1.3. Justificativa	16
2. REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1. Torque	17
2.2. Torque a partir das deformações de torção.	17
2.3. Medição do torque	17
2.3.1. Método de medição do torque por extensômetros.	18
2.4. Conversor analógico-digital	22
2.5. Microcontroladores	23
3. MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1. Sistema proposto	24
3.2. Materiais e equipamentos	25
3.2.1. Conversor A/D HX711 e ESP32	25
3.2.2. Sensor de torque (extensômetro)	26
3.3. Processo de instalação dos extensômetros.	27
3.4. Projeto 3D da estrutura mecânica	30
3.5. ENSAIOS	31
3.5.1. Ensaio de torque estático	31
3.5.2. Ensaio de torque dinâmico	32
3.5.3. Ensaio de rendimento da bateria	35
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	36

4.1. Ensaio estático e Calibração do sistema	36
4.2. Ensaio dinâmico	37
4.3. Ensaio de rendimento da bateria	41
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	43
7. REFERÊNCIAS	44
1. APÊNDICE	46
2. Código fonte do ESP32 para medição de torque	46

## 1. INTRODUÇÃO

As indústrias buscam constantemente aumentar a eficiência dos seus processos, uma vez que isto pode determinar sua sobrevivência no mercado. Sabendo disso, é importante analisar em tempo real os seus parâmetros, principalmente o comportamento das máquinas, para controlar e verificar com maior precisão suas condições, e aumentar sua eficiência.

Em vários desses processos é comum a presença de componentes rotativos, sendo este movimento normalmente fornecido por meio de motores elétricos ou motores térmicos e transmitidos na maioria dos casos por meio de eixos e engrenagens, que também controlam parâmetros como velocidade e torque (BORGES, 2015).

Este torque em um mundo altamente mecanizado é um dos parâmetros mais importantes a ser medido e analisado em máquinas com elementos rotativos, já que está diretamente relacionado com a potência mecânica disponível. Com sua medição precisa no sistema é possível determinar onde realmente a potência está sendo consumida e as prováveis perdas mecânicas, proporcionando uma manutenção preventiva eficiente e melhor funcionamento do sistema. Isto o torna altamente significativo em monitoramento e controle de processos, em sistema de transmissão e transporte, garantia de qualidade e P&D (BRITO, 1994).

Porém, segundo Borges, J. C. da Silva, (2015), apesar das técnicas de medições do torque estático serem bastante difundidas na engenharia, a medição dinâmica nem sempre é fácil, devido ao constante movimento rotativo e necessidade de alimentação e transferência de dados. Uma alternativa para contornar este problema é realizar medições indiretas do torque, por meio das deformações sofridas pelos elementos de transmissão.

Portanto o objetivo deste trabalho é desenvolver e avaliar um sistema remoto, com uso de extensômetros de resistência elétrica junto com um sistema e aquisição e transferência de dados, capaz de medir o torque dinâmico de elementos rotativos em função de suas deformações superficiais.

### **1.1. Objetivo geral**

Desenvolver um sistema remoto capaz de medir o torque dinâmico de eixo rotativos.

### **1.2. Objetivos específicos**

- Desenvolver um sistema com uso de extensômetros de resistência elétrica, ligados diretamente a eixos rotativos;
- Projetar protótipo em 3D da estrutura mecânica do sistema;
- Estabelecer comunicação entre a plataforma microcontrolada, com a célula de carga, utilizando-se o módulo HX711;
- Desenvolver um código de programação que realize o monitoramento das mudanças do torque em função das deformações superficiais sofridas;
- Implementar e calibrar o dispositivo;
- Avaliar o dispositivo desenvolvido por meio de ensaios experimentais estáticos, dinâmicos e do consumo energia.

### **1.3. Justificativa**

Medir o torque fornece uma visão de como o seu equipamento está funcionando. Quando se tem medições detalhadas sobre o funcionamento do equipamento rotativo, pode-se melhorar as operações, e ficar à frente de falhas mecânicas economizando tempo dos funcionários, prologando a vida útil do equipamento e reduzir os custos da empresa uma vez que os sistemas de medição costumam ser uma fração do custo de uma linha de transmissão quebrada. O sistema de medição de torque além de fornecer uma visão diagnóstica do equipamento permitindo realizar manutenções preventivas garante que os parâmetros dos equipamentos permaneçam dentro dos limites operacionais seguros, sendo que uma vez que o limite pré-determinado for ultrapassado, os dados da medição podem sinalizar o equipamento para desligá-lo antes que uma falha ocorra.

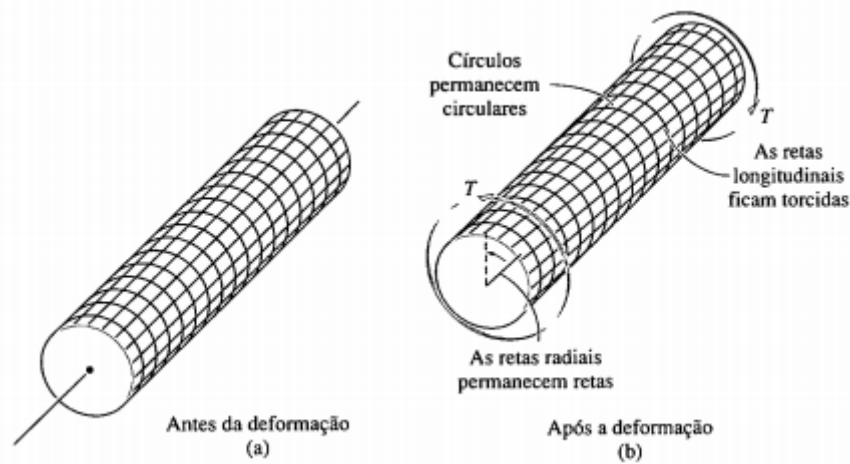


## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. Torque

Para Hibbeler (2010), o principal interesse do torque está em projetos de eixos usados em veículos e maquinários. Sendo que o torque pode ser descrito como o momento que tende a torcer o membro em torno de seu eixo longitudinal. A figura 1 mostra o que acontece quando o torque é aplicado em um eixo circular.

Figura 1 - Efeito do torque em um eixo circular.



Fonte: Hibbeler, 2010.

### 2.2. Torque a partir das deformações de torção.

Quando um torque externo é aplicado a um eixo, surge um torque interno equivalente em seu interior. Esse torque pode ser expresso matematicamente pela equação 1:

$$T = \frac{\gamma}{c} GJ \quad (1).$$

Onde:

$T$  = torque interno resultante que atua na seção transversal;

$G$  = módulo de elasticidade transversal do eixo;

$J$  = momento de inércia polar da área da seção transversal;

$\gamma$  = deformação radial;

$c$  = raio externo do eixo.

### 2.3. Medição do torque

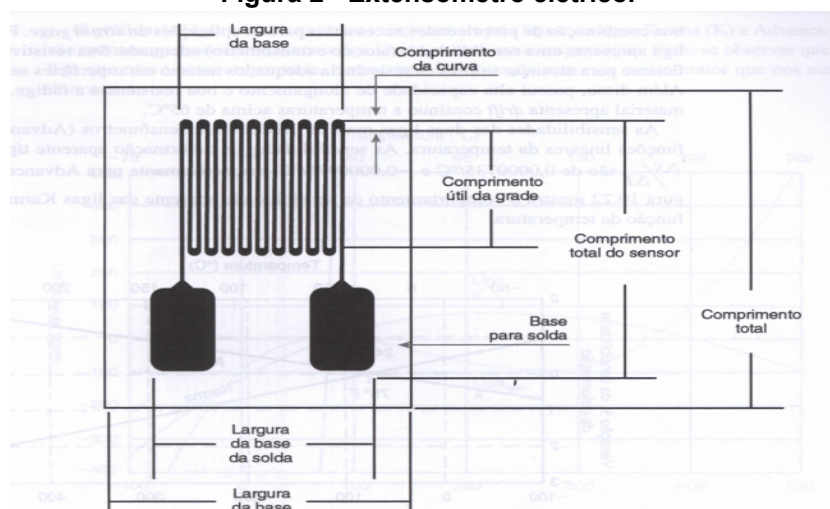
O primeiro método de medição de torque surgiu somente no século XVIII, com a revolução industrial e a necessidade de quantificá-lo com o advento da máquina a vapor. O método que mede o toque por meio de um sistema de absorção de energia devido a frenagem do eixo em rotação, foi desenvolvido pelo físico francês Gaspar de Prony (1755-1839) (BRITO, R., 1994).

Posteriormente métodos similares foram desenvolvidos, ficando conhecidos como freio de Froude e freio de Foucault. Além desses métodos que utilizam um sistema de absorção de energia, existem métodos que usam um sistema de reação, medido o torque a partir da deformação superficial causada no eixo utilizando sensores como extensômetros, piezelétricos e magnético-elásticos ou pelo ângulo de torção.

### 2.3.1. Método de medição do torque por extensômetros.

Os extensômetros elétricos mostrados na figura 2 são medidores de deformação que convertem pequenas deformações em variações equivalentes em sua resistência elétrica (Andolfato, R. P., et al., 2004). Para Balbinot et al. (2007), os métodos de medição que utilizam extensômetros são bastante comuns, sendo principalmente utilizados para medições de força e tensões, sobretudo pela sua alta precisão, custo e peso reduzido.

Figura 2 - Extensômetro elétrico.



Fonte: BALBINOT e BRUSSAMARELLO, 2007.

Kevin em 1856 observou em experimentos que a resistência elétrica de fios de cobre e ferro sofriam alterações quando deformados na região elástica.

Observou também que a variação relativa entre a resistência e a deformação é constante, obedecendo a seguinte equação 2.

$$\frac{\Delta R}{R} = k \varepsilon \quad (2).$$

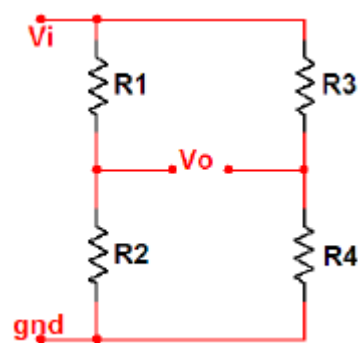
Onde  $k$  é uma constante de proporcionalidade,  $R$  a resistência inicial,  $\Delta R$  a variação de resistência, e  $\varepsilon$  a deformação relativa (BALBINOT e BRUSAMARELLO, 2007).

Portanto, conhecendo o valor da resistência do extensômetro, pode-se obter a deformação da peça. Vale ressaltar que é necessário realizar compensações na medição, devido às variações de temperatura e ao tipo de material em análise (Borges, J. C. da Silva, 2015).

Com as mudanças de temperatura os extensômetros de resistência elétrica sofrem com a variação do fator  $K$  e de sua resistência, além do alongamento ou contração das células ou das grades, por isso é comum a utilização do arranjo denominado ponte de Wheatstone para minimizar esses efeitos (BALBINOT e BRUSSAMARELLO, 2007).

No arranjo da figura 3, podemos observar a ponte de Wheatstone que foi inicialmente proposta por Samuel Hunter Christie em 1833, porém sua utilização foi popularizada por Sir Charles Wheatstone em 1858 (ARENY e WEBSTER, 2001).

Figura 3 - Circuito geral, ponte de Wheatstone.



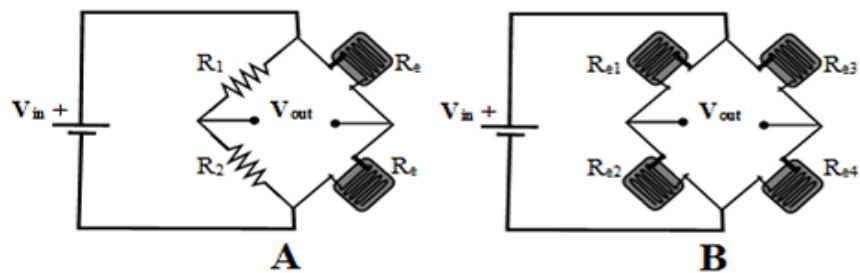
Fonte: FRADEN, 2004.

Para Fraden (2004), as pontes de Wheatstone são circuitos muito populares e muito eficazes que usam a técnica ratiométrica. Sendo que a tensão de saída da ponte pode ser expressa de forma generalizada pela equação 3.

$$V_{out} = \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) V_{ref} \quad (3).$$

Em uma ponte de Wheatstone utilizando resistências simples, por exemplo, podemos substituir dois desses resistores por extensômetros ou todos os resistores por extensômetros. Estes arranjos são conhecidos como medição em meia ponte e ponte completa (Borges, J. C. da Silva, 2015). A figura 4 traz os dois arranjos.

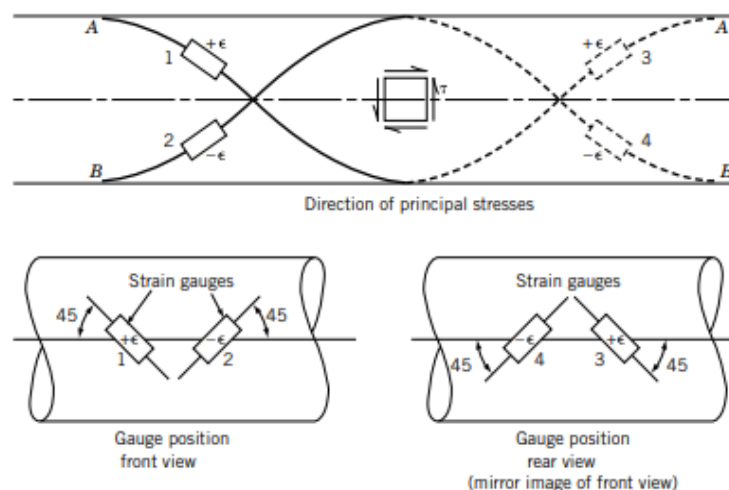
Figura 4 - (A) meia-ponte e (B) ponte completa.



Fonte: Borges, J. C. da Silva, 2015.

Para um eixo em torção pura, não há tensões normais. As principais tensões estão ao longo de uma linha que faz um ângulo de 45 graus com o eixo, conforme ilustrado na figura 5. Como os extensômetros só indicam as deformações unidirecionalmente, eles devem ser posicionados nesses locais para ser possível medir diretamente o torque em termos da tensão de saída da ponte (FIGLIOLA e BEASLEY, 2011; Borges, J. C. da Silva, 2015).

Figura 5 - Posicionamento dos extensômetros em eixos para medição de torque.

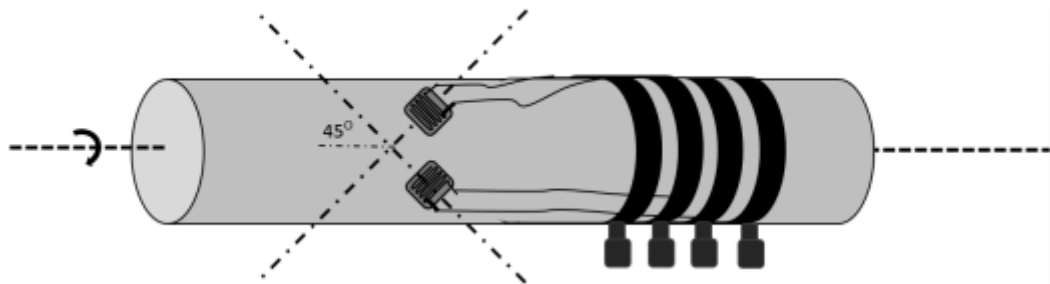


Fonte: FIGLIOLA e BEASLEY, 2011.

Segundo Borges, J. C. da Silva (2015), várias técnicas de medições de torque com extensômetros já foram utilizadas, sendo a de anéis coletores a

primeira empregada com essa finalidade. Neste método os anéis coletores são fixados radialmente nos eixos, a alimentação e a recepção dos sinais são feitas por escovas de grafite que também são posicionadas no eixo. A figura 6 traz a ilustração do método de medição via anéis coletores.

**Figura 6 - Método de medição via anéis coletores.**

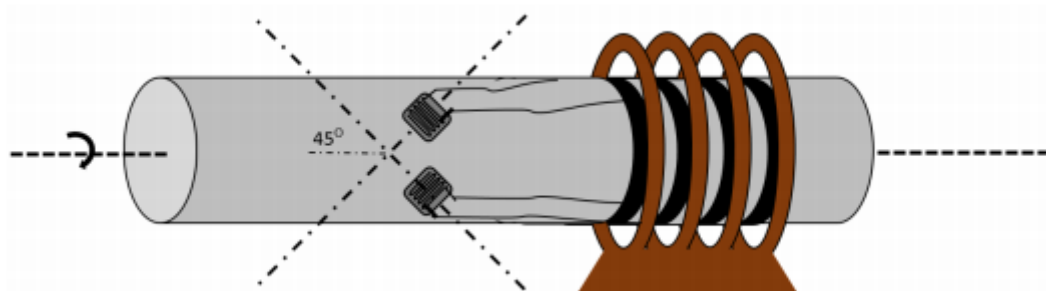


Fonte: Borges, J. C. da Silva, 2015.

Apesar desse método permitir a medição do torque em sistemas dinâmicos o desgaste, e o aquecimento das escovas que são ocasionados pelo aumento do ruído reduz sua precisão. O sistema também apresenta instabilidade quando submetido a vibrações ou em alta rotação (Borges, J. C. da Silva, 2015).

Outra alternativa para a medição do torque com extensômetros de forma direta, mostrada na figura 7, são as que utilizam transformadores circulares. Como o método anterior, este também possui uma série de limitações como a velocidade de rotação do eixo e erros na aquisição de dados causados pelo alinhamento entre as bobinas. Suas características o tornam mais caro que os sistemas com anéis coletores tornando muito questionável sua aplicação em determinadas situações (LIMA FILHO et al., 2011).

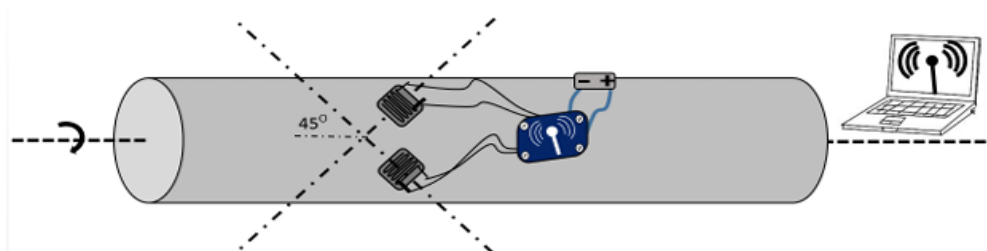
**Figura 7 - Método de medição via transformadores circulares.**



Fonte: Borges, J. C. da Silva, 2015.

A figura 8 ilustra um sistema desenvolvido por Bin (2005), nesse sistema não tem a necessidade de transformadores ou escovas para sua alimentação. A solução proposta por Bin neste trabalho foi a de fixar pequenas baterias no eixo junto com o circuito de aquisição e transmissão de dados. Com esse sistema foi possível realizar medidas mais precisas, por ser utilizada uma fonte de energia com baixa emissão de ruído e com poucas oscilações.

**Figura 8 - Sistema de medição proposto por Bin.**



Fonte: Borges, J. C. da Silva, 2015.

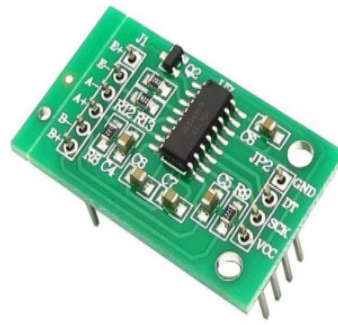
Outros sistemas similares ao de Bin, foram o de Wassermann et al (2005) e Oliveira (2010). O primeiro utilizou um sistema de alimentação montada sob o eixo junto com um sistema de transmissão de dados via infravermelho. Já Oliveira utilizou um sistema de transmissão de rádio UHF ponto a ponto, com frequências na faixa 902 – 928 MHz, alimentado por bateria de celular fixa ao eixo.

#### **2.4. Conversor analógico-digital**

O extensômetro é um transdutor que converte deformações mecânicas em sinais elétricos analógicos. Para converter os sinais elétricos analógicos em sinais digitais, é normalmente usados um conversor analógico/digital. O sinal analógico é transformado num sinal amostrado, por meio de uma quantização com finitos números inteiros, determinado pela resolução característica do conversor (BRAGA NEWTON, 2014).

O módulo HX711 é um conversor analógico-digital (ADC) de resolução de 24 bits projetado para balanças e aplicações de controle industrial para fazer interface direta com um sensor (AVIA SEMICONDUCTOR, 2018). A Figura 9 mostra o módulo HX711.

**Figura 9 - Módulo HX711.**



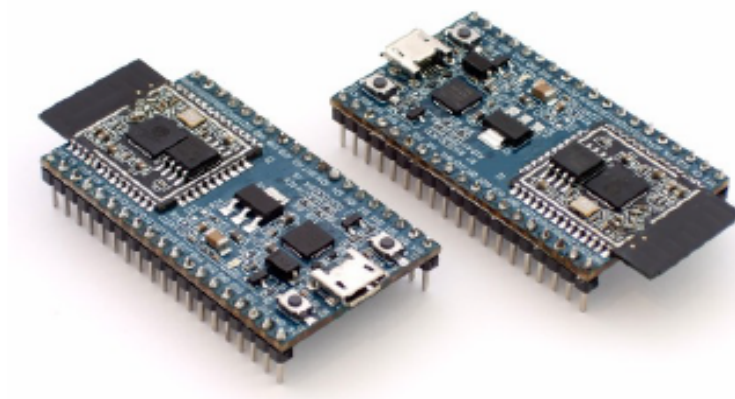
Fonte: MERCADO LIVRE, 2021.

## 2.5. Microcontroladores

Microcontroladores podem ser considerados como computadores de um único chip. Esse chip possui em seu interior um processador, memória, periféricos de entrada e de saída, temporizadores, dispositivos de comunicação serial, dentre outros. Assim, os microcontroladores só dependem de uma fonte de alimentação externa para seu funcionamento (Penido, É. de C. Castro e Trindade, R. Silva, 2013).

O ESP32 é um microcontrolador desenvolvido pela Espressif Systems e está no mercado desde o final de 2016. Vem sendo considerado como um dos melhores controladores do mercado, tendo como pontos fortes sua velocidade de processamento, acessibilidade e conectividade (KOLBAN, 2018). O microcontrolador pode ser visualizado na figura 10.

**Figura 10 - Microcontrolador ESP32.**



Fonte: KOLBAN, 2018.

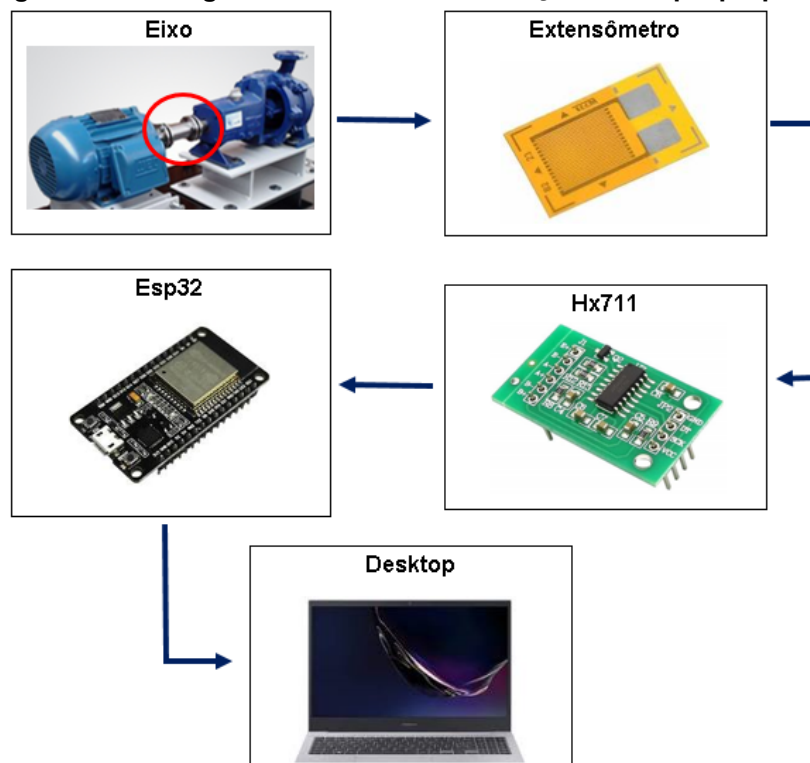
### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são detalhadas todas as etapas de desenvolvimento do sistema, assim como os itens adquiridos para o sistema mecânico, para o sistema de aquisição de dados e para a realização dos testes.

#### 3.1. Sistema proposto

O sistema de medição de torque proposto é composto pelos extensômetros que são colados ao eixo, ele tem a função de captar as deformações superficiais e enviar um sinal analógico para o conversor HX711. Após o conversor transformar o sinal analógico em um sinal digital e amplificá-lo, o sinal é enviado para o microcontrolador, neste projeto vamos utilizar o ESP32 que será responsável por ler o sinal, tira uma média de vinte medidas antes de processar o sinal e enviar o resultado via wifi para um receptor, que pode ser um celular, notebook ou tablet. A Figura 11 apresenta um fluxograma do sistema de medição de torque proposto.

Figura 11 - Fluxograma do sistema de medição de torque proposto.





### 3.2. Materiais e equipamentos

A lista dos materiais e equipamentos os quais foram utilizados para montagem do sistema proposto e realização dos ensaios necessários são listados na tabela 1.

**Tabela 1 - Materiais e equipamentos.**

N°	Materiais e equipamentos
1	Extensômetros
2	ESP 32
3	Conversor A/D HX711
4	Carregador portátil 5000mAh
5	Fios
6	Tubo de alumínio
7	Tubo de aço maciço
8	Lixas abrasivas para metal
9	Fita adesiva
10	Cola adesiva
11	Silicone transparente
12	Desengraxante
13	Notebook
14	Estação de solda
15	Multímetro
16	Balança digital
17	Furadeira
18	Morsa

Fonte: Autor.

#### 3.2.1. Conversor A/D HX711 e ESP32

Como dito anteriormente o conversor utilizado no sistema foi o HX711, que além de converter o sinal analógico em digital, funciona como amplificador. O HX711 é ligado diretamente aos sensores, suas especificações técnicas são apresentadas na tabela 2.

**Tabela 2 - Especificações técnicas HX711.**

Especificações	Detalhes
Tensão de alimentação	2.6 a 5V
Diferencial de tensão de entrada	$\pm 40\text{mV}$
Precisão dos dados	24 bits
Frequência de atualização	80 Hz
Corrente de funcionamento	< 10 mA
Tamanho	38mm x 21mm X 10mm
Ganho selecionável	32, 64 e 128 vezes
Temperatura de operação	-40 até +85 °C

Fonte: AVIA SEMICONDUCTOR, 2018.

Na tabela 3 podemos observar algumas especificações do microcontrolador ESP32, que foi escolhido por ser um dos poucos controladores de pequeno porte a possuir embarcado o sistema de transmissão de dados pelo protocolo Bluetooth e wi-fi.

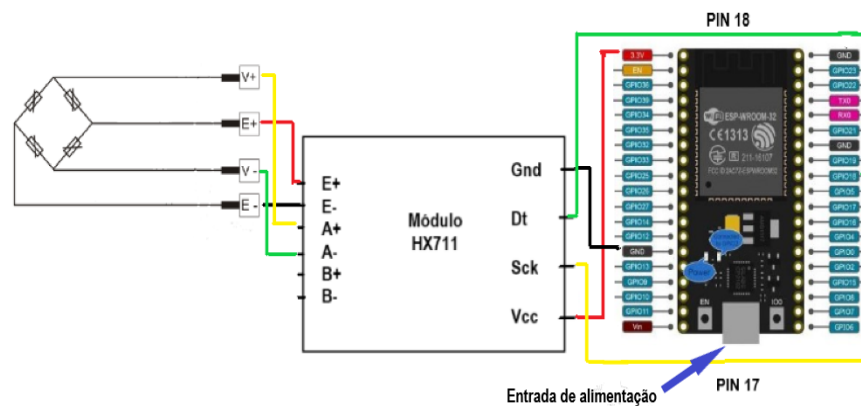
**Tabela 3 - Especificações técnicas ESP32.**

Especificações	Detalhes
Tensão de operação	3.3V
Processador	Tensilica L108 32 bit
Velocidade do processador	Dual 240MHz
Memória RAM	520K
Conectividade sem fio	Wi-Fi: 802.11 b/g/n Bluetooth: v4.2 BR/EDR e BLE
GPIOs	34
Entradas conversoras analógico/digital	7

Fonte: (KOLBAN, 2018).

A figura 12 ilustra como foi feita a comunicação entre os extensômetros, conversor HX711 e o microcontrolador ESP32 e as portas usadas.

**Figura 12 - Comunicação entre os componentes eletrônicos.**



Fonte: Autor.

### 3.2.2. Sensor de torque (extensômetro)

Os extensômetros mais encontrados no mercado possuem resistência de 120 $\Omega$ , 350 $\Omega$ , 500 $\Omega$  e 1000 $\Omega$ , sendo o mais comum o de 120 $\Omega$ . Portanto para este trabalho será utilizado um extensômetro de 120 $\Omega$  uniaxial disposto a 45° como pode ser visto na figura 13.

**Figura 13 - Extensômetro uniaxial.**



Fonte: Tnkmo, 2021.

O modelo do sensor é BX120-3BA produzido pela Tnkmo e possui as especificações descritas na tabela 4:

**Tabela 4 - Especificações técnicas extensômetro.**

Modelo	BX120-3BA	
Dimensões da grade sensível (mm)	Comprimento	Largura
	3	2
Dimensões total (mm)	Comprimento	Largura
	10,5	10,5
Resistência ( $\Omega$ )	120 $\pm$ 0.2	
Fator gage	2,08 $\pm$ 1%	
Faixa de Temperatura operacional ( $^{\circ}\text{C}$ )	-30 ~+ 70	
Limite de tensão (%)	2.5	
Características de trabalho	Descrição	Nível de precisão
Resistência do extensômetro	Desvio do valor nominal $\pm\%$	1
	Tolerância média $\pm\%$	0.1
Coeficiente de sensibilidade	Dispersão da média %	1
Retardo mecânico	Em temperatura ambiente $\mu\epsilon$	2
Resistência de isolamento	Em temperatura ambiente $M\Omega$	50000
Coeficiente de efeito lateral	Em temperatura ambiente %	0.5
Fadiga	À temperatura ambiente (ciclos)	$10^7$
Mudança do coeficiente de sensibilidade com a temperatura	Mudança média na faixa de temperatura de trabalho % $100^{\circ}\text{C}$	2
	Dispersão do valor médio em cada temperatura $\mu\epsilon/\%100^{\circ}\text{C}$	3
Saída de calor	Coeficiente médio de produção de calor $\mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$	1
	Dispersão da produção média de calor $\mu\epsilon$	80

Fonte: Tnkmo, 2021.

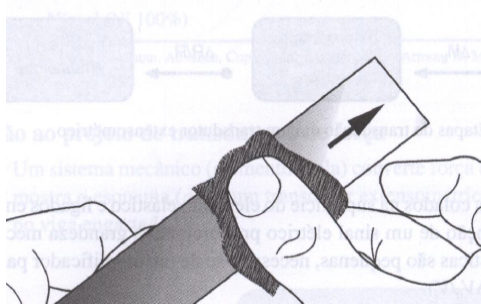
### 3.3. Processo de instalação dos extensômetros.

Segundo Balbinot e Brussamarello, (2007), o processo de instalação e o alinhamento correto dos extensômetros, pode evitar vários erros como fluência e isolamento pobre da peça. Esses detalhes também são importantes para definir

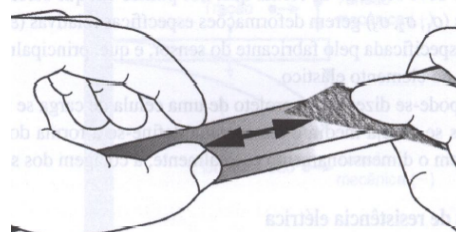
alguns parâmetros como estabilidade, precisão, máximo alongamento, tempo de vida, entre outros. O processo de instalação adequado será abordado a seguir:

a. Como ilustrado na figura 14, a superfície onde será colada o extensômetro deve ser limpa, desengraxada e dependendo das condições da superfície ela deve ser lixada até atingir uma rugosidade adequada. Posteriormente deve ser traçada linhas de referência para orientação dos sensores e uma nova limpeza com desengraxante.

**Figura 14 - Preparo da superfície para colagem.**



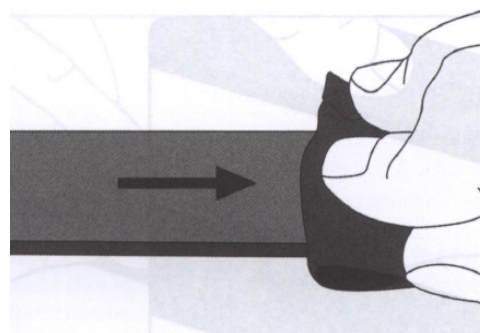
a) Limpeza



b) Abrasão da superfície



c) Traçado linhas de orientação

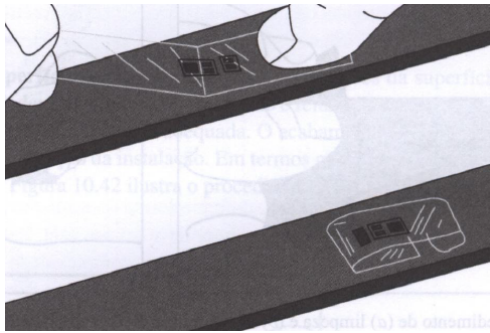


d) Limpeza final

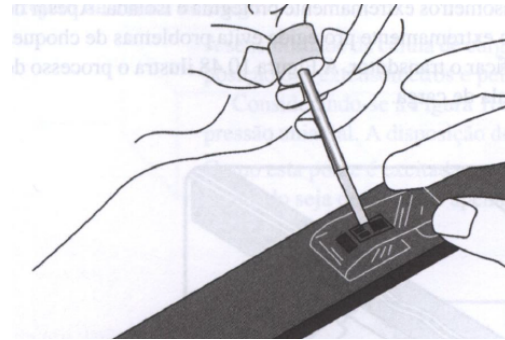
Fonte: BALBINOT e BRUSSAMARELLO, 2007.

b. O manuseio do extensômetro nunca deve ser feito diretamente com os dedos (devido à gordura das mãos), e sim com o auxílio de pinça ou fita adesiva, em seguida o sensor deve ser posicionado conforme as linhas de referências e devidamente colocado como é ilustrado na figura 15.

**Figura 15 - Colagem dos extensômetros.**



a) Manuseio/ posicionamento do extensômetro.



b) Colagem

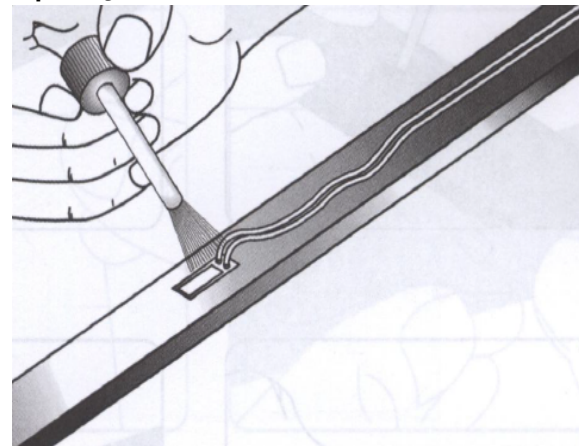
Fonte: BALBINOT e BRUSSAMARELLO, 2007.

c. Por fim como pode ser visto na figura 16, deve ser feita a solda dos terminais do extensômetro e a proteção do local em que o sensor do foi instalado para evitar problemas que inutilizem o sensor.

**Figura 16 - Soldagem e proteção do sensor.**



a) Soldagem dos condutores



b) Proteção

Fonte: BALBINOT e BRUSSAMARELLO, 2007.

A figura 17 mostra o resultado do processo de instalação dos extensômetros que foi colocado a um tubo de alumínio com comprimento de 200 mm e espessura de 1 mm. O tubo foi usado para simular um eixo.

**Figura 17 - Resultado do processo de colagem e soldagem dos extensômetro.**

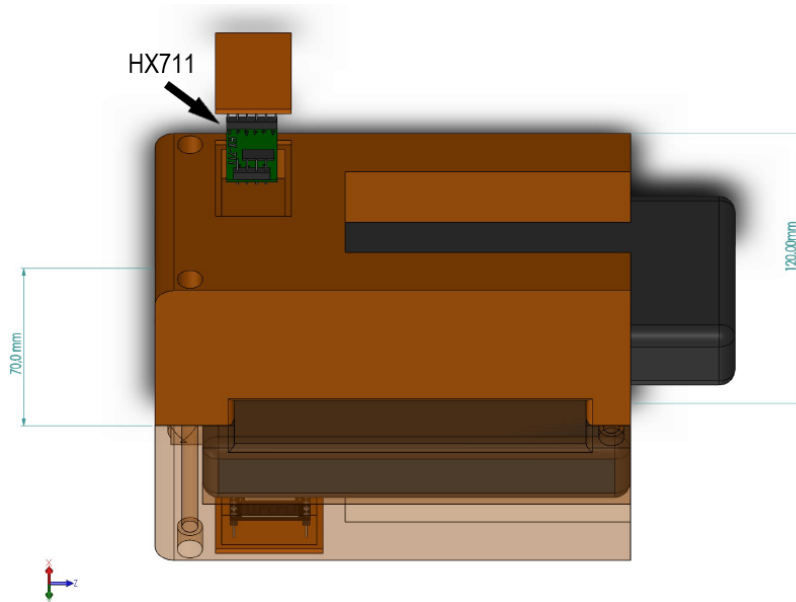
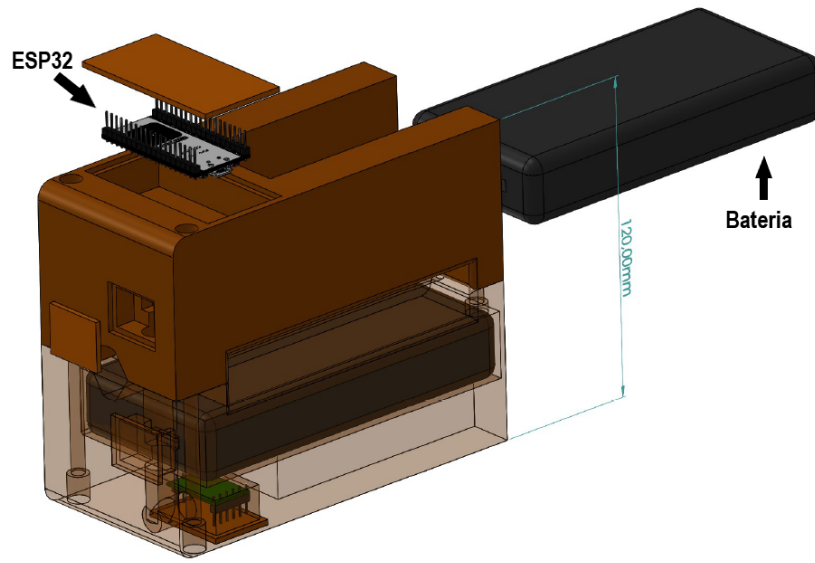


Fonte: Autor.

### 3.4. Projeto 3D da estrutura mecânica

A elaboração do projeto 3D da estrutura mecânica do sistema de medição se deu com o auxílio do software de projeto mecânico SolidWorks®. O projeto da estrutura mecânica levou em consideração as dimensões dos componentes Esp32, Hx711 e o suporte para conexão de dois carregadores portáteis (Bateria), além de ser possível conectar a estrutura em diferentes diâmetros de eixos. O projeto 3D é mostrado em perspectiva isométrica na figura 18.

**Figura 18 – Perspectiva isométrica explodida da estrutura mecânica do sistema de medição.**



Fonte: Autor.



### 3.5. ENSAIOS

Os ensaios do sistema desenvolvido foram realizados em três etapas: uma medição em situação estática, uma medição em situação dinâmica e um ensaio de rendimento para verificar o consumo e duração da bateria. A medição estática é realizada sem rotação, e é necessária para verificar o funcionamento do sistema, realizar ajustes e calibrações, depois termos a realização do ensaio dinâmica, sendo que esta última possui um maior grau de complexidade para execução.

#### 3.5.1. Ensaio de torque estático

O ensaio estático foi realizado para calibrar o sistema. No ensaio foi utilizado uma morsa em que uma das extremidades do tubo de alumínio é fixada impedindo sua rotação, na outra extremidade do tubo foi realizado um furo para colocar uma barra de aço com comprimento de 19,5 cm. Também foram utilizados uma balança digital para aferição do peso, um notebook para realizar a aquisição dos dados e uma garrafa PET com água que servirá como peso padrão. Alguns dos itens utilizados podem ser vistos na figura 19.

Figura 18 – Itens utilizados no ensaio de torque estático.

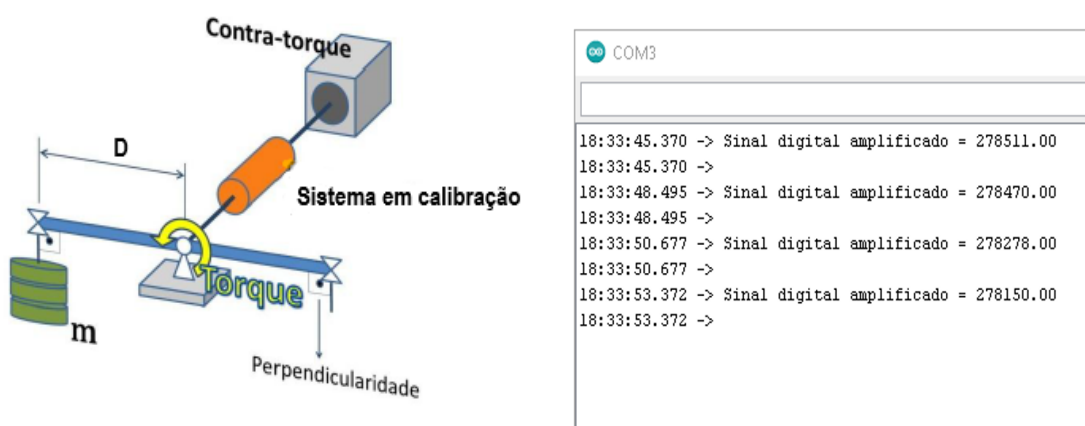




Fonte: Autor.

Para obter a primeira medida o tubo foi fixado na morsa e o sistema ligado ao notebook, após realizar essas etapas os dados foram registrados com auxílio do programa Arduino IDE. Para a segunda medida a barra de aço com peso e comprimento conhecido foi colocada na outra extremidade do tubo, posteriormente os dados foram registrados. Para as demais medidas foi colocada na extremidade da barra uma garrafa pet com água, e para saber o peso da garrafa é utilizada a balança digital. Depois que os dados são registrados é alterado o peso da garrafa PET com a adição de água para realizar mais medições, esse último processo foi repetido algumas vezes. A figura 19 ilustra o ensaio e os dados sendo exibidos.

**Figura 19 – Ilustração do ensaio estático e exibição dos dados.**



Fonte: Autor, 2021; Oliveira, 2015.

Após a realização do ensaio e com os dados obtidos é possível calcular o valor do torque aplicado no sistema pela equação 4:

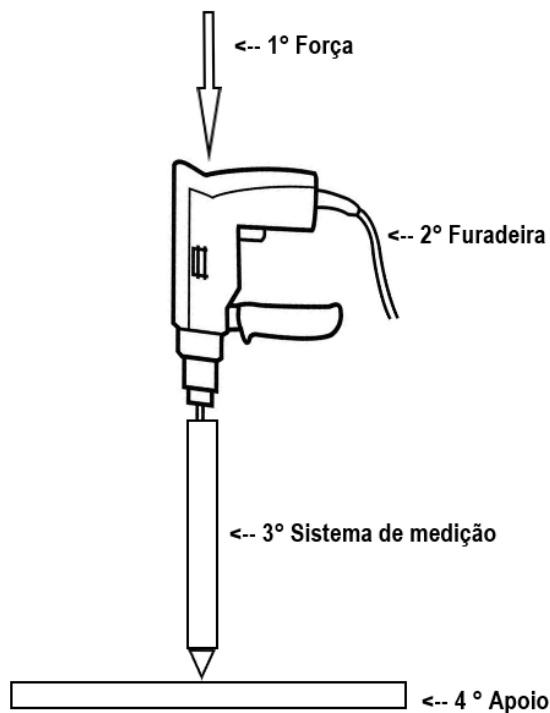
$$T = F \cdot d \quad (4).$$

Onde a força aplicada "F" é igual a força peso e "d" igual ao comprimento da barra.

### 3.5.2. Ensaio de torque dinâmico

Finalizado o ensaio estático e a calibração do sistema, deu-se início ao ensaio dinâmico, onde o sistema foi submetido a cargas compressivas, enquanto se mantinha sobre rotação. Para melhor visualização de como o ensaio foi realizado a figura 20 mostra uma ilustração.

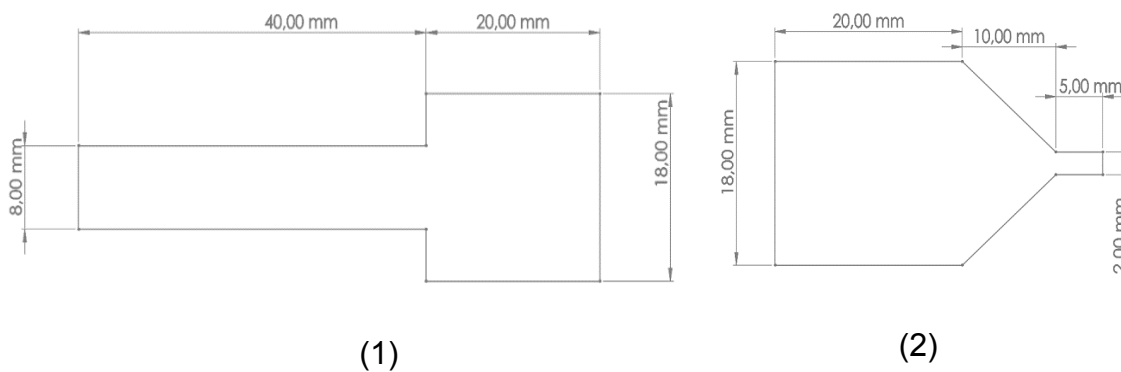
**Figura 20 - Ilustração do ensaio dinâmico.**



Fonte: Autor.

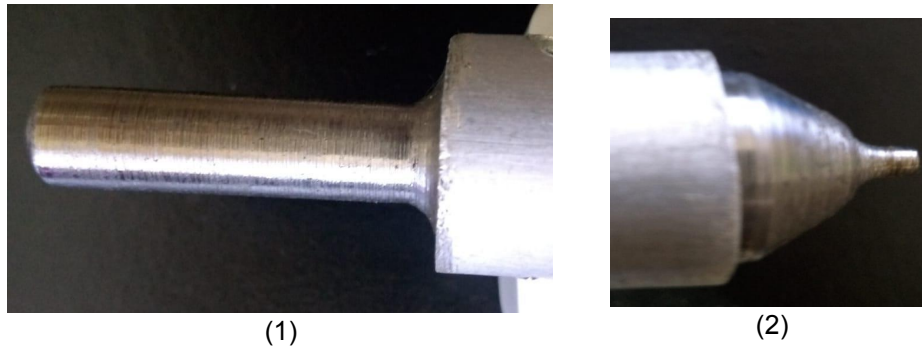
Como dito anteriormente, o tubo simula o eixo nos ensaios e para ser possível a realização do ensaio foi necessário a fabricação de duas peças que vão conectadas ao tubo. Na figura 21 podemos ver o desenho mecânico das peças e na figura 22 elas já fabricadas e conectadas ao tubo. A peça (1) foi concebida para ser conectada a furadeira, já a peça (2) foi concebida para ser apoiada em algo com um furo, nesse caso foi utilizado uma madeira MDF.

**Figura 21 - Desenho mecânico das peças para o ensaio dinâmico.**



Fonte: Autor.

**Figura 22 - Peças conectadas ao tubo.**



Fonte: Autor.

Foram realizadas cinco medidas em diferentes condições para este ensaio, a primeira somente com a rotação livre do sistema sem aplicação de força compressiva. Na segunda medida além da rotação o sistema foi apoiado sendo aplicada a força peso da própria furadeira contra o sistema, para as medidas posteriores foram adicionados diferentes pesos no sistema em rotação. A tabela 5 traz os pesos utilizados no ensaio dinâmico.

**Tabela 5 - Força peso aplicada no ensaio dinâmico.**

<b>N°</b>	<b>Peso (g)</b>	<b>Força (N)</b>
<b>1°</b>	0	0
<b>2°</b>	1356	13,3
<b>3°</b>	1886	18,5
<b>4°</b>	2304	22,6
<b>5°</b>	2892	28,4

Fonte: Autor.

O registro dos dados resultantes do ensaio ocorreu através do notebook conectado à rede wifi do sistema e acessando a página web local gerada pelo sistema usando um navegador, como podemos ver na figura 23.

**Figura 23 - Página web gerada pelo sistema de medição de torque.**



Fonte: Autor.

### 3.5.3. Ensaio de rendimento da bateria

O ensaio de rendimento é feito para verificar o consumo de energia do sistema e a duração da bateria de 5000 mAh. Para realização do ensaio inicialmente foi verificada a carga da bateria, posteriormente ela é conectada ao sistema ligando-o, durante o ensaio é possível acompanhar a carga da bateria pelos LED's ligados portanto o consumo do sistema. Um cronômetro é usado para conferir o tempo de duração do ensaio, que termina quando a carga da bateria esgotar e o sistema desligar. A figura 24 mostra o sistema ligado durante o ensaio.

Figura 24 - Bateria ligada ao sistema para ensaio de rendimento energético.



Fonte: Autor.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com o desenvolvimento do trabalho. Primeiramente verificou-se o funcionamento do sistema realizando o ensaio estático e sua calibração, por fim são apresentados os dados obtidos no ensaio dinâmico e do rendimento da bateria.

### 4.1. Ensaio estático e Calibração do sistema

A partir do ensaio estático foram obtidos os valores do sinal digital amplificado e das massas registradas com a balança digital. Usando a equação 4, conhecendo o comprimento da barra e a massa aplicada em sua extremidade obtemos o torque. Os valores do sinal, da massa e do torque referente a eles podem ser vistos na tabela 6.

Tabela 6 - Valores das massas, sinal e torque referente.

Massa (g)	Sinal	Torque (N.cm)
0	272796	0,00
22,5	282299	0,44
70,5	292424	1,37
123,5	306260	2,41
176,5	324270	3,44
225,5	336808	4,40
274,5	350950	5,35
333,5	368411	6,50
388,5	384790	7,58
424,5	408661	8,28
490,5	417944	9,56
527,5	424631	10,29
575,5	437257	11,22
630,5	453365	12,29
676,5	465786	13,19
726,5	480613	14,17
781,5	498166	15,24
836,5	507981	16,31
912,5	527636	17,79

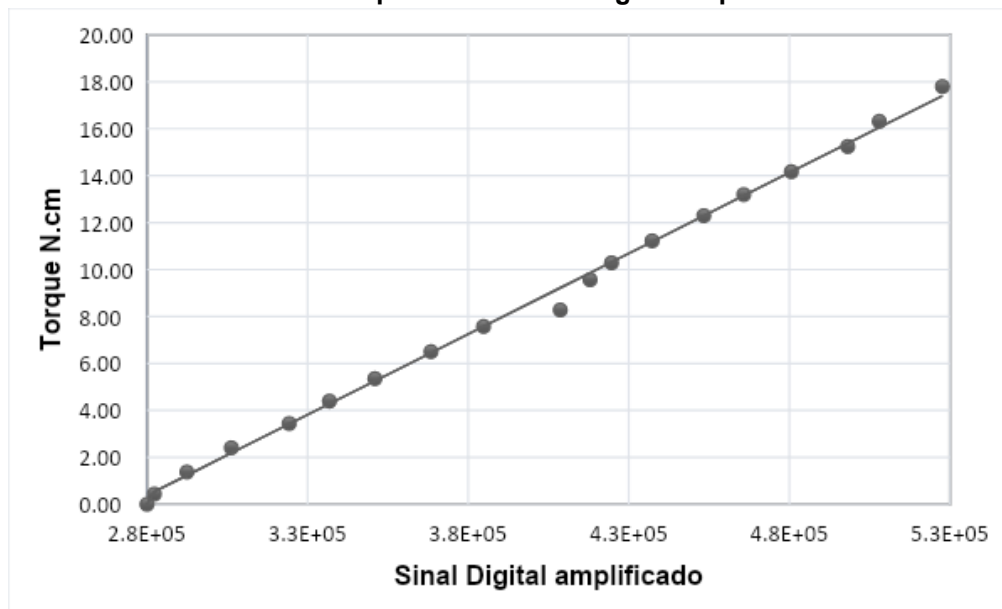
Fonte: Autor.

No gráfico 1 é mostrado a curva de torque versus sinal digital amplificado, fundamental para a calibração do sistema. Analisando os pontos do gráfico a seguir é possível perceber uma linearidade entre as medições, e dessa forma foi traçado a linha de ajuste linear que obedece a equação 5 que representa a equação do torque no sistema:

$$y = 7 * 10^{-5} x - 18,87 \quad (5).$$

Onde o eixo “x” representa o valor da leitura do sistema de medição de torque e o eixo “y” representa o torque aplicado no eixo.

**Gráfico 1 - Torque Versus Sinal Digital Amplificado.**

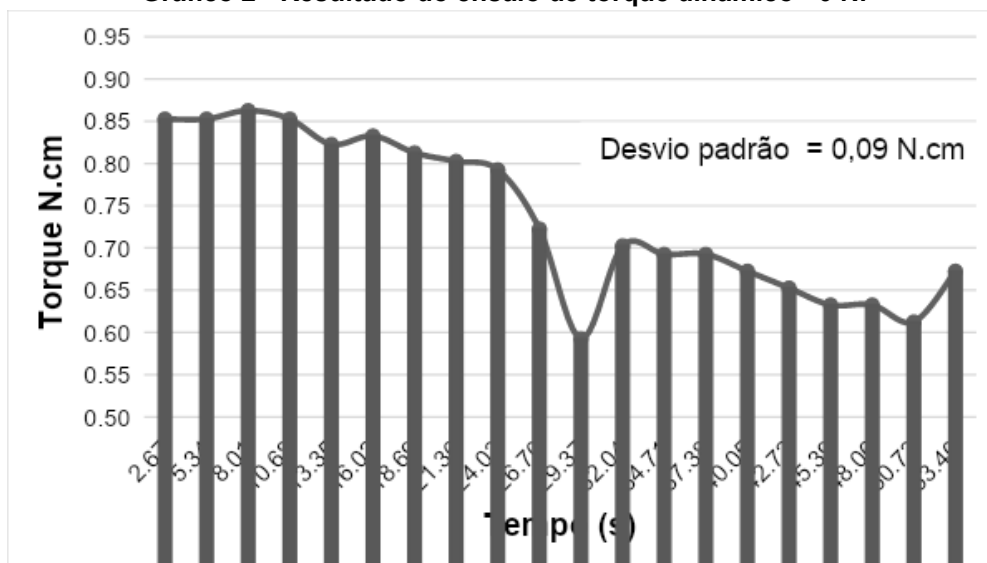


Fonte: Autor.

#### 4.2. Ensaio dinâmico

O primeiro ensaio dinâmico que ocorreu sem a aplicação de forças compressivas no sistema, durante o primeiro ensaio foi aplicada uma rotação e os dados registrados com o auxílio de um navegador. Com os dados obtidos foi gerado o gráfico 2, torque versus tempo e calculado o desvio padrão.

**Gráfico 2 - Resultado do ensaio de torque dinâmico - 0 N.**

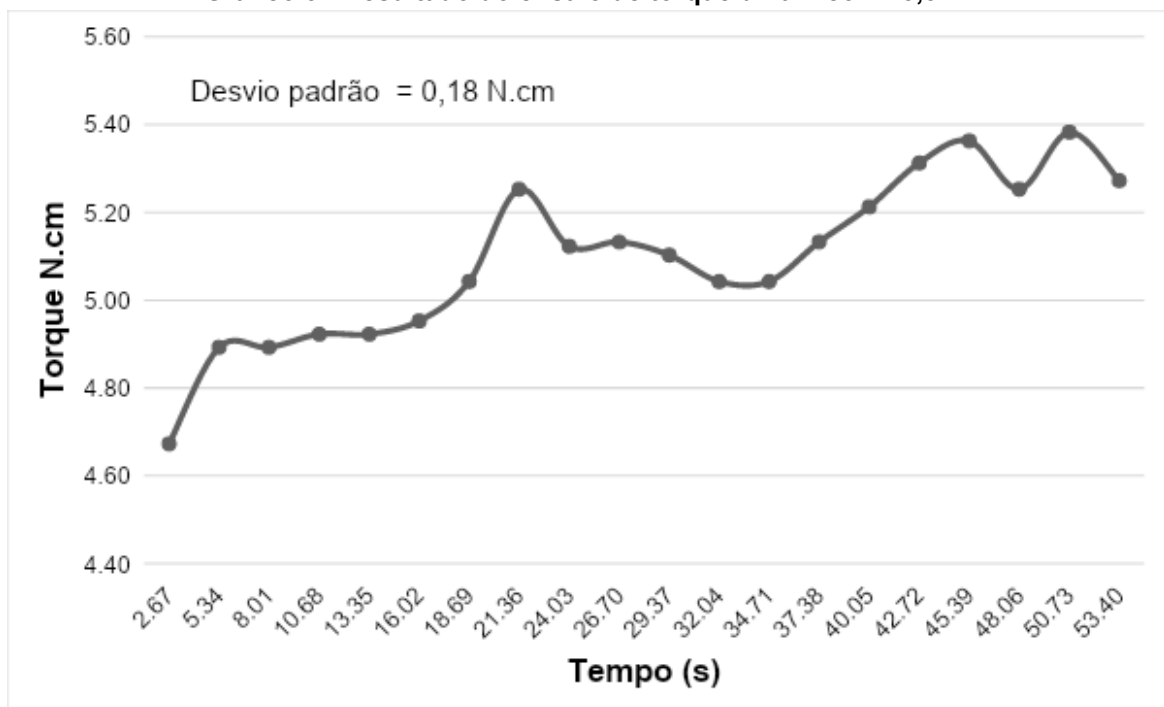


Fonte: Autor.

O desvio padrão de 0,09 N.cm encontrado, como poderemos ver ao decorrer dos resultados, será o menor desvio padrão do ensaio dinâmico, isso pode ser explicado pela ausência de forças compressivas e por neste primeiro ensaio a presença de vibração ser mínima.

O gráfico 3 exibe os resultados obtidos no ensaio com aplicação de uma força compressiva de 13,3 N, essa força representa a força que a furadeira faz contra o sistema durante a execução do ensaio. Neste e nos demais ensaios ocorreu a presença de muita vibração durante a coleta de dados, o que possivelmente pode influenciar em uma variação superior ao da primeira condição utilizada.

**Gráfico 3 - Resultado do ensaio de torque dinâmico – 13,3 N.**

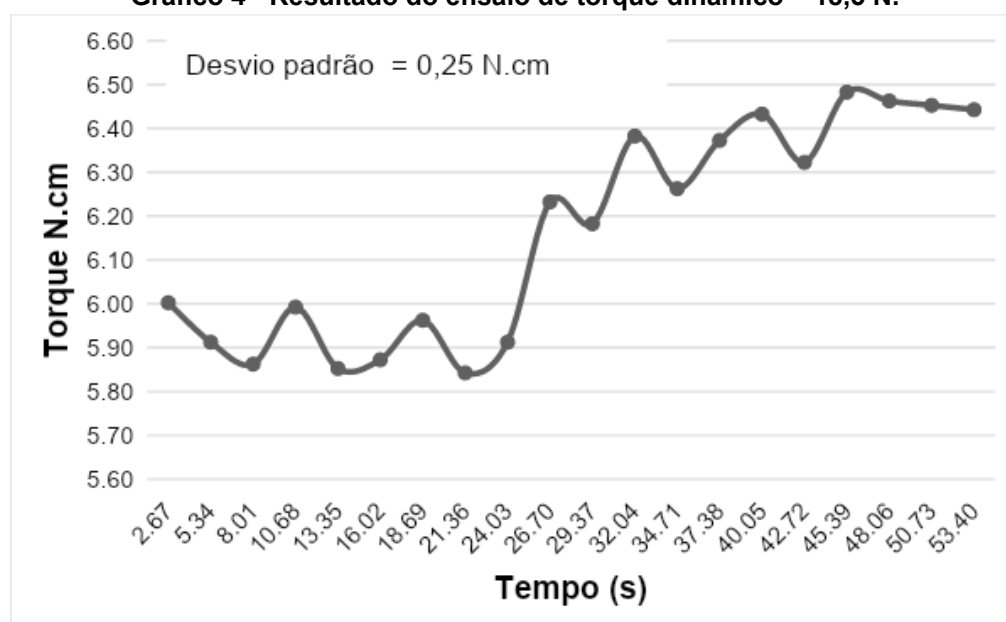


Fonte: Autor.

Com a aplicação da força compressiva, o sistema de medição aferiu um torque superior ao torque da primeira condição, portanto o funcionamento do sistema ocorreu como o esperado. O desvio padrão para a amostra coletada foi de 0,18 N.cm, maior que o encontrado no primeiro ensaio, como dito anteriormente o surgimento de vibrações durante o ensaio pode ter provocado um desvio maior.

Aplicando uma força de 18,5 N no sistema durante o ensaio foi gerado o gráfico 4 de torque versus tempo, que assim como os demais ensaios o intervalo de tempo de processamento e exibição é em média de 2,67 segundos. Ao total a coleta de dados durou 53,4 segundos obtendo um valor médio de torque superior aos testes anteriores o que era esperado, também ocorreu um aumento no desvio padrão em relação aos ensaios anteriores.

**Gráfico 4 - Resultado do ensaio de torque dinâmico – 18,5 N.**

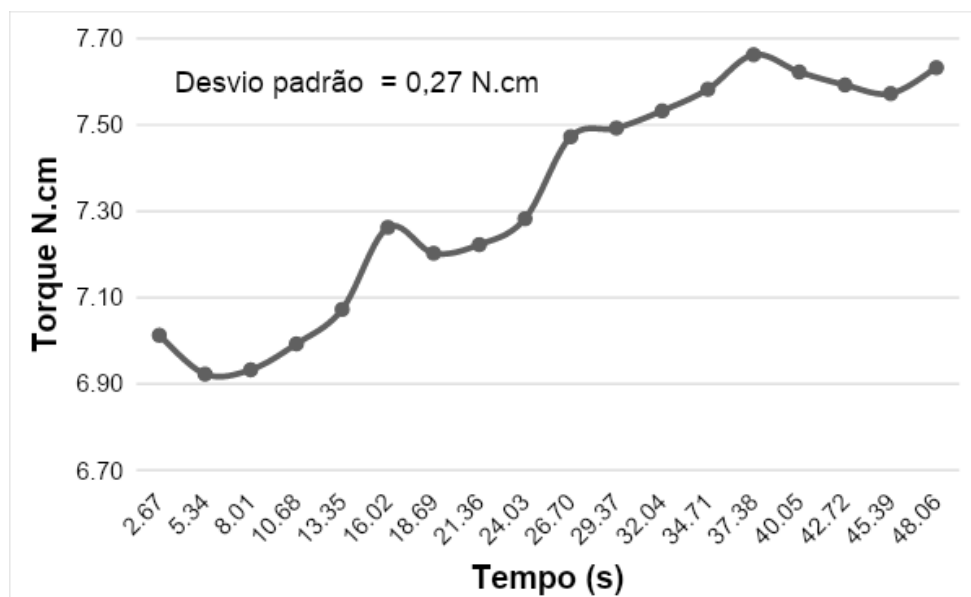


Fonte: Autor.

O mesmo procedimento foi realizado para um força de 22,6 N resultando no gráfico 5 de torque versus tempo. Analisando o gráfico os dados se comportaram como esperado, ocorrendo um aumento relativo do torque médio em relação aos ensaios com uma força compressiva inferior e um aumento do desvio padrão.

**Gráfico 5 - Resultado do ensaio de torque dinâmico – 22,6 N.**



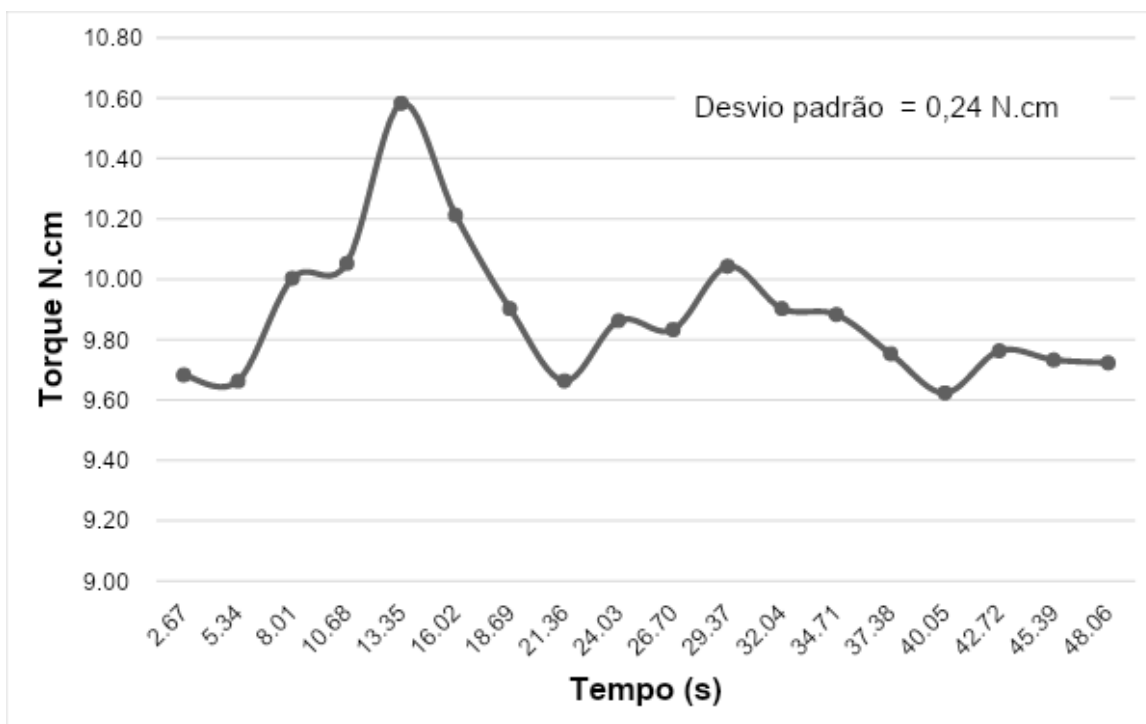


Fonte: Autor.

O aumento do desvio padrão desse e dos demais ensaios como mencionado anteriormente pode ser explicado pelo surgimento de vibrações na realização do ensaio, essa vibração pode ter ocorrido por diferentes motivos como desbalanceamento do sistema, desalinhamento do tubo ou do tubo com as peças, entre outros.

Para finalizar os ensaios dinâmicos foi aplicado uma força compressiva de 28,4 N que resultou no gráfico 6 de torque versus tempo. Houve também um aumento do torque médio devido ao aumento da força aplicada durante o ensaio, porém diferente dos ensaios anteriores o desvio padrão não aumentou.

**Gráfico 6 - Resultado do ensaio de torque dinâmico – 28,4 N.**



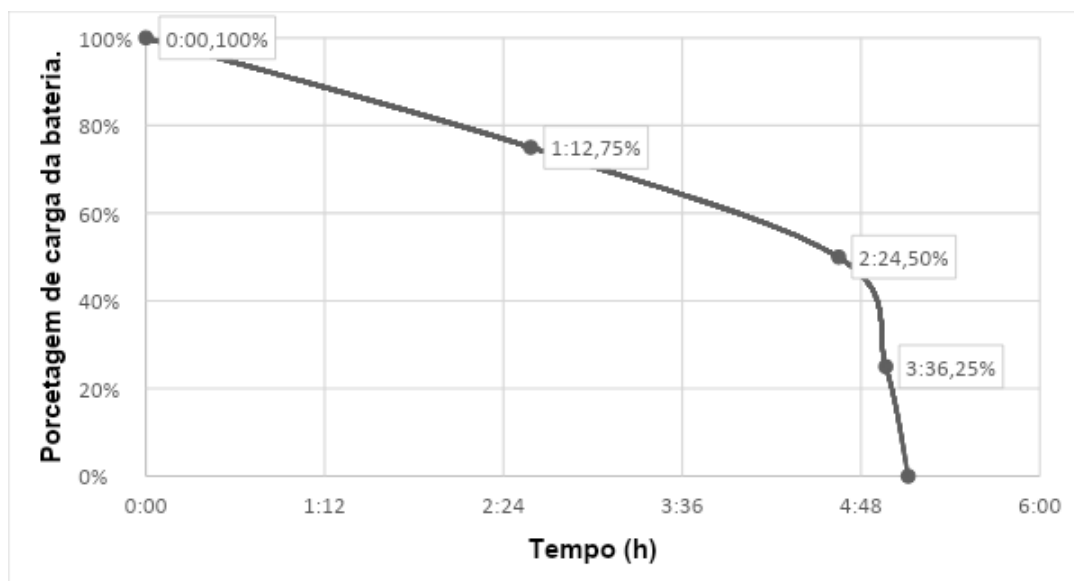
Fonte: Autor.

Analisando o gráfico e comparando com os anteriores o ensaio apresentou a maior amplitude de torque, porém durante a maior parte do tempo se manteve com uma menor amplitude de torque em relação aos ensaios com a aplicação de forças compressivas. Isso significa que o ensaio se comportou de maneira mais estável em quase todo procedimento, mas devido a alguma instabilidade durante a operação fez também a amplitude de variação do torque ser a maior.

### 4.3. Ensaio de rendimento da bateria

O ensaio analisou o tempo de duração da bateria de 5000mAh utilizada no sistema durante o processo de verificação de seu funcionamento. O intuito deste ensaio foi avaliar o consumo de energia do sistema determinando a possibilidade de sua aplicação em máquinas e equipamentos. O resultado obtido durante o ensaio é mostrado no gráfico 7 de porcentagem de carga da bateria versus tempo.

**Gráfico 7 - Curva de descarregamento da bateria no sistema.**



Fonte: Autor.

Fazendo uma análise no gráfico vemos que a duração da bateria foi de 5 horas e 7 minutos, podemos ver também que seu descarregamento não ocorreu de forma uniforme, tendo os primeiros 50% de sua carga consumida em 4 horas e 39 minutos e os outros 50% durando somente 28 minutos. Isso ocorre devido a curva de descarregamento das baterias de lítio, portanto a curva de descarregamento da bateria no sistema medição obedece a curva das bateria lítio.

Com o ensaio percebemos que o consumo de energia do sistema foi alta, e que a duração de pouco mais de 5 horas dificultaria a utilização dessa bateria no sistema de medição instalado em um equipamento real, considerando que o mesmo funcione no mínimo 8 horas por dia.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento de um sistema de medição remota do torque em eixos rotativos. Para o seu desenvolvimento foi utilizado o método de extensometria onde extensômetros de resistência elétrica associado a um sistema de aquisição de dados e transmissão sem fio medem o torque convertendo pequenas deformações no eixo em variações equivalentes em sua resistência elétrica. Também foram realizados ensaios estático, dinâmico e do rendimento com o intuito de avaliar o sistema.

O ensaio estático mostrou-se bastante eficaz sendo fundamental para verificar o funcionamento do sistema e fazer ajustes. Sua execução não apresentou dificuldades e a partir do seu resultado obteve-se a equação de torque possibilitado a realização do ensaio dinâmico.

Com os resultados do ensaio dinâmico foi possível avaliar o funcionamento do sistema em diferentes condições, os resultados mostraram que o torque varia conforme as condições de operação são alteradas. Apesar do resultado satisfatório, o ensaio dinâmico apresentou bastante instabilidade durante sua execução devido a constante vibração do sistema, além disso com a realização desse modelo de ensaio não foi possível validar o sistema sendo necessário realizar novos ensaios comparativos com sistemas de torque comerciais.

A bateria utilizada no sistema teve uma duração de 5 horas e 7 minutos mostrando um alto consumo de energia do sistema tornando difícil sua aplicação no monitoramento de equipamentos rotativos. Algumas alterações no sistema podem ser feitas para diminuir o consumo de energia e elevar seu tempo ligado, uma delas é alterar o modelo do microcontrolador ESP32, trazendo um com menos portas e com um poder de processamento menor como por exemplo ESP32-C3 RISC-V. Outra modificação que pode ser feita no sistema é a utilização de duas baterias de 20000 mAh ou superior ao invés de usar um ou duas baterias de 5000 mAh, o que aumentaria consideravelmente o tempo de duração do sistema sem a necessidade de recarregar ou trocar a bateria.

## **6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Tem-se como sugestões para trabalhos futuros, realizar melhorias no sistema para diminuir o consumo de energia, realizar novos ensaio dinâmicos com intuito de avaliar e validar o sistema em diferentes condições, aplicar e avaliar o sistema de medição em um equipamento real. Além do desenvolvimento de um novo sistema para exibição do torque mensurado.

## 7. REFERÊNCIAS

Andolfato, R. P., Camacho, J. S., de Brito, G. A., **Extensometria básica**. NEPAE UNESP, Ilha Solteira, 2004.

AVIA SEMICONDUCTOR. **24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales**. Disponível em:

<[https://cdn.sparkfun.com/datasheets/sensors/forceflex/hx711\\_english.pdf](https://cdn.sparkfun.com/datasheets/sensors/forceflex/hx711_english.pdf)> .

Acesso em: 20 jan. 2021.

ARENY P. Ramon, WEBSTER G. John. **Sensors And Signal Conditioning**. New York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto: 2 ed. Ed. John Wiley & Sons, Inc. 2001. p. 73 - 205. ISBN 0-471-33232-1

BALBINOT, A., Brusamarello V.J., **Instrumentação e Fundamentação de Medidas**. 2o ed. Arte e Ideia. Rio de Janeiro, 2007.

BIN, M Z. L. **Research on torque real time monitoring system of rotary machine**. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, v. 26, p. 38-39, 2005.

BRAGA, Newton C. **Como funcionam os Conversores A/D**. 2014. Disponível em:

<<http://www.newtonbraga.com.br/index.php/como-funciona/1508-conversores-ad>> . Acesso em: 12 de fevereiro de 2021.

BRITO, Renato Machado. **Sistema Eletro-eletrônico para medição direta de torque em dispositivos girantes utilizando extensômetros de resistência elétrica**. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em engenharia Metalúrgica e dos Materiais. UFRGS. Ponto Alegre, 1994.

Borges, Jacques Caousteau da Silva. **Estudo e desenvolvimento de um transdutor de torque para eixos rotativos por meio de sensores de efeito Hall/ Jacques Caousteau da Silva Borges**. – João Pessoa, 2015.

FIGLIOLA, R.; BEASLEY, D.; 2011, **Theory and design for the mechanical measurements, 5th ed**. Portland: John Wiley & Sons, 605 p. Danvers, USA, 2011. ISBN: 978-0470547410.

FRADEN, Jacob. **Handbook of Modern Sensors. Physics, Designs and Applications, 3 ed**. Springer – Verlag New York, Inc., 2004. ISBN 0-387-00750-4.

HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos materiais**. 7.ed. ed. São Paulo : Pearson Prentice Hall, 2010.

KOLBAN, Neil. **Kolban's book on ESP32**. [S.I.]: Leanpub, 2018.

LIMA FILHO, A. C.; Belo, F. A.; Santos, J. L. S.; Anjos E. G. **Self-Powered Telemetric Torque Meter**, *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, v. 133, p. 1-7, 2011.

MERCADO LIVRE. **Módulo HX711 célula de carga 24 bits**. Disponível em: < [https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-808263469-modulo-celula-de-carga-24-bits-balanca-hx711 -\\_JM](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-808263469-modulo-celula-de-carga-24-bits-balanca-hx711_-_JM) >. Acesso em: 07 set. 2021.

OLIVEIRA, José Sérgio de. **Avaliação experimental e teórica do torque no laminador de chapas grossas da USIMINAS**. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em engenharia Metalúrgica e de Minas. UFMG. Belo Horizonte, 2010.

Oliveira, Rafael Soares de. **Fundamentos para a padronização metrológica da grandeza torque dinâmico**/ Rafael Soares de Oliveira. –Salvador, 2015.

Penido, Édilus de Carvalho Castro. **Microcontroladores / Édilus de Carvalho Castro Penido. Ronaldo Silva Trindade**. – Ouro Preto: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais; Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Técnico Industrial de Santa Maria; Rede e-Tec Brasil, 2013.

WASSERMANN, J.; et al. **“Wireless Data Transfer System for Rotating Machinery – Very Robust Against Electromagnetic Interference”**, 1st International Conference on Sensing Technology, Palmerston North, New Zealand, pp. 651- 647. Nov 21-23, 2005.

## 1. APÊNDICE

### 2. Código fonte do ESP32 para medição de torque

```
1  #include <WiFi.h>
2  #include <WiFiClient.h>
3  #include <WiFiServer.h>
4  #include <ESPAsync_WiFiManager.h>
5  #include <AsyncTCP.h>
6  #include <HX711.h>
7  #include <ESPmDNS.h>
8
9  #define DT 18
10 #define SCK 17
11
12 // Credenciais de rede
13 const char* ssid = "Sensoriamento";
14 const char* senha = "senhatorque";
15
16 AsyncWebServer server(80);
17
18 // Variáveis de Tempo
19 unsigned long lastTime = 0;
20 unsigned long timerDelay = 1000;
21
22 // Variável do sensor
23 HX711 torque;
24 // Variáveis globais
25 float medida;
26 float media = 0;
27 float tmedida;
28
29 AsyncEventSource events("/events");
30
31 void getSensorReadings() {
32     media = torque.read_average(20); // Media do sinal
33     medida = (0.00007 * media) - 18.87;
34     tmedida = abs(medida); // Valor absoluto
35 }
36
37 // Inicialização do WiFi
38 void initWiFi() {
39     Serial.printf("Configurando ponto de acesso '%s'\n", ssid);
40     WiFi.softAP(ssid, senha);
41     server.begin();
42     Serial.println("Configuração concluída");
```



```

43     }
44
45     String processor(const String& var) {
46         getSensorReadings();
47         //Serial.println(var);
48         if (var == "medida") {
49             return String(medida);
50         }
51         else if (var == "tmedida") {
52             return String(tmedida);
53         }
54         return String();
55     }
56
57     const char index_html[] PROGMEM = R"rawliteral(
58     <!DOCTYPE HTML><html>
59     <head>
60         <title>SISTEMA REMOTO PARA SENSORIAMENTO DE TORQUE EM
61         EIXOS ROTATIVOS</title>
62         <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1">
63         <link
64             href="https://use.fontawesome.com/releases/v5.7.2/css/all.css"
65             integrity="sha384-fnmOCqbTIWlIj8LyTjo7mOUStjsKC4pOpQbqyi7RrhN7u
66             di9RwhKkMHpvLbHG9Sr" crossorigin="anonymous">
67         <link rel="icon" href="data:,">
68         <style>
69             html {font-family: Arial; display: inline-block; text-align: center;}
70             p { font-size: 1.2rem;}
71             body { margin: 0;}
72             .topnav { overflow: hidden; background-color: #00acee; color: white;
73             font-size: 1rem; }
74             .content { padding: 20px; }
75             .card { background-color: white; box-shadow: 2px 2px 12px 1px
76             rgba(140,140,140,.5); }
77             .cards { max-width: 800px; margin: 0 auto; display: grid; grid-gap: 2rem;
78             grid-template-columns: repeat(auto-fit, minmax(200px, 1fr)); }
79             .reading { font-size: 1.4rem; }
80         </style>
81     </head>
82     <body>
83         <div class="topnav">
84             <h1>SISTEMA REMOTO PARA SENSORIAMENTO DE TORQUE EM
85             EIXOS ROTATIVOS</h1>
86         </div>
87         <div class="content">
88             <div class="cards">
89                 <!--/*<div class="card">

```

```

                <p><i class="fas fa-thermometer-half" style="color:#059e8a;"></i>
Sinal          digital</p><p><span          class="reading"><span
82 id="torq">%media%</span> und</span></p>
83 </div> Ensaio estatico*/-->
84 <div class="card">
                <p><i class="fas fa-tint" style="color:#00add6;"></i>
TORQUE</p><p><span          class="reading"><span
85 id="hum">%tmedida%</span> N.cm</span></p>
86 </div>
87 </div>
88 </div>
89 <script>
90 if (!!window.EventSource) {
91   var source = new EventSource('/events');
92
93   source.addEventListener('open', function(e) {
94     console.log("Events Connected");
95   }, false);
96   source.addEventListener('error', function(e) {
97     if (e.target.readyState != EventSource.OPEN) {
98       console.log("Events Disconnected");
99     }
100    }, false);
101
102    source.addEventListener('message', function(e) {
103      console.log("message", e.data);
104    }, false);
105
106    source.addEventListener('media', function(e) {
107      console.log("media", e.data);
108      document.getElementById("torq").innerHTML = e.data;
109    }, false);
110
111    source.addEventListener('tmedida', function(e) {
112      console.log("tmedida", e.data);
113      document.getElementById("hum").innerHTML = e.data;
114    }, false);
115
116
117  }
118 </script>
119 </body>
120 </html>)>rawliteral";
121
122
123 void setup() {
124   torque.begin(DT, SCK);

```

```

125 Serial.begin(115200);
126 initWiFi();
127
128 // Handle Web Server
129 server.on("/", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest * request) {
130     request->send_P(200, "text/html", index_html, processor);
131 });
132
133 events.onConnect([](AsyncEventSourceClient * client) {
134     if (client->lastId()) {
135         Serial.printf("Client reconnected! Last message ID that it got is: %u\n",
136             client->lastId());
137     }
138     client->send("hello!", NULL, millis(), 1000);
139 });
140
141 server.addHandler(&events);
142 server.begin();
143 }
144
145 void loop() {
146     if ((millis() - lastTime) > timerDelay) {
147         getSensorReadings();
148         /*Serial.printf("Sinal digital amplificado = %.2f \n", media);--->Ensaio
149         estatico*/
150         Serial.printf("Torque = %.2f N.cm \n", tmedida);
151         Serial.println();
152
153         // Send Events to the Web Server with the Sensor Readings
154         events.send("ping", NULL, millis());
155         /*events.send(String(media).c_str(),"media",millis());---> Ensaio
156         estatico*/
157         events.send(String(tmedida).c_str(), "tmedida", millis());
158
159         lastTime = millis();
160     }
161 }

```