

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO GRANDE DO SUL
Campus Ibirubá**

FERNANDO ALFREDO PAZINATO HENKES

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
Desenvolvimento de sistema para monitoramento de torque em equipamentos
com eixo rotativo: Estudo de caso em plataforma de corte de milho

Ibirubá

2025

FERNANDO ALFREDO PAZINATO HENKES

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Desenvolvimento de sistema para monitoramento de torque em equipamentos com eixo rotativo: Estudo de caso em plataforma de corte de milho

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Banca Examinadora designada pelo Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus Ibirubá, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Projeto mecânico e Instrumentação

Orientador: Cristiano Kulman, Dr. Eng

Ibirubá

2025

Pazinato, Fernando

Desenvolvimento de sistema para monitoramento de torque em equipamentos com eixo rotativo: Estudo de caso em plataforma de corte de milho. / Fernando Pazinato

Orientador: Cristiano Kulman, Dr. Eng

Monografia (graduação) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Campus Ibirubá, Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, Ibirubá 2024.

Eletrônica. Instrumentação. Projeto mecânico. Torque. Eficiência operacional.

Desenvolvimento de sistema para monitoramento de torque em equipamentos com eixo rotativo: Estudo de caso em plataforma de corte de milho

Fernando Alfredo Pazinato Henkes

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Banca Examinadora designada pelo Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus Ibirubá, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Ibirubá, 25 de junho de 2025.

Banca Examinadora:

Prof. (orientador): Dr. Eng. Cristiano Kulman
IFRS campus Ibirubá

Prof.: Dr. Eng. Tiago Junior de Bortoli
IFRS campus Ibirubá

Prof.: Dr. Eng. Rafael Zanatta Scapini
IFRS campus Ibirubá

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente minha mãe, Mercedes Madalena Henkes, onde seu sacrifício, dedicação e apoio incondicional foram fundamentais para que eu alcançasse este momento tão importante em minha vida acadêmica, por isso expressei minha mais profunda gratidão.

Agradeço a minha namorada e toda a minha família, que sempre estiveram comigo durante essa caminhada, mesmo nos momentos mais difíceis.

Agradeço aos meus colegas de trabalho, onde sempre estiveram dispostos a transmitir conhecimento e orientações valiosas, sendo fundamentais e de extrema importância em minha capacitação, além do crescimento profissional e pessoal.

Agradeço a todos os professores do IFRS campus Ibirubá, em especial ao orientador Eng. Dr. Cristiano Kulman, por todo o conhecimento e orientação transmitidos durante minha graduação.

Agradeço a banca avaliadora por dispor do seu tempo e expertise para avaliar meu trabalho, com a certeza que suas análises e sugestões construtivas serão fundamentais para enriquecer este trabalho e contribuir significativamente para o meu crescimento acadêmico e profissional.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e da persistência em se chegar a um objetivo”.

Napoleon Hill

RESUMO

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema portátil, capaz de mensurar o torque nominal em equipamentos de eixo rotativo, tendo sua aplicação validada em uma plataforma para corte de milho. O sistema desenvolvido é composto por dois extensômetros ligados em ponte completa de *wheatstone*, responsável pela medição das deformações mecânicas no eixo de transmissão; um módulo HX711, que amplifica e converte os sinais analógicos em digitais; e um microcontrolador ESP32 com conectividade *Wi-Fi/Bluetooth*, responsável pelo processamento e interpretação dos dados coletados, viabilizando assim, a análise do torque em tempo real. A alimentação do sistema é realizada por uma bateria de lítio, gerenciada por um módulo de carregamento TP4056, sendo auxiliados por componentes secundários, como botão de acionamento, medidor de carga e cabos de interconexão para integração do circuito. O sistema mecânico foi projetado para fixação direta no eixo cardan da plataforma de milho, enquanto o sistema eletrônico foi desenvolvido com foco na intercambialidade, permitindo sua utilização em diferentes equipamentos ou áreas de aplicação. O dispositivo desenvolvido visa fornecer dados precisos, respeitando os limites de tolerância estabelecidos por normas técnicas internacionais. Esses dados permitem realizar uma análise detalhada dos esforços aos quais os equipamentos estão sendo submetido, possibilitando realizar um dimensionamento mais assertivo dos componentes, contribuindo diretamente para a otimização dos processos internos e aprimoramento do desempenho e eficiência do produto final. A alta relação de custo-benefício, quando comparado a soluções comerciais similares, permite que empresas e clientes com recursos financeiros limitados também, possam empregar a análise de torque em seus produtos. Além disso, as informações obtidas permitirão à equipe de engenharia criar um banco de dados abrangente, possibilitando a análise do torque em diferentes condições de trabalho, como variedade do grão, tipo de solo, região, umidade, entre outros fatores. Por fim, este trabalho possibilita a evolução do sistema em novas versões, além de abrir caminhos para pesquisas, desenvolvimentos e inovações tecnológicas, visando telemetria, automação de diagnósticos em campo e agricultura de precisão.

Palavras chave: Dispositivo eletromecânico. Torque nominal. Eixo Cardan. Eficiência operacional. Otimização de projeto. Máquinas Agrícolas.

ABSTRACT

This paper presents the development of a portable, system capable of measuring the nominal torque in rotary shaft equipment, having its application validated in a corn cutting platform. The developed system consists of two strain gauges connected in a full Wheatstone bridge, responsible for detecting mechanical deformations in the transmission shaft; an HX711 module, which amplifies and converts analog signals into digital ones; and an ESP32 microcontroller with Wi-Fi/Bluetooth connectivity, responsible for processing and interpreting the collected data, thus enabling real-time torque analysis. The system is powered by a lithium battery, managed by a TP4056 charging module, and is assisted by secondary components, such as a trigger button, load meter and interconnection cables for circuit integration. The mechanical system was designed for direct attachment to the cardan shaft of the corn platform, while the electronic system was developed with a focus on interchangeability, allowing its use in different equipment or application areas. The device developed aims to provide accurate data, respecting the tolerance limits established by international technical standards. This data allows for a detailed analysis of the stresses to which the equipment is being subjected, enabling more assertive dimensioning of the components, contributing directly to the optimization of internal processes and improvement of the performance and efficiency of the final product. The high cost-benefit ratio, when compared to similar commercial solutions, allows companies and customers with limited financial resources to also employ torque analysis in their products. In addition, the information obtained will allow the engineering team to create a comprehensive database, enabling torque analysis in different working conditions, such as grain variety, soil type, region, humidity, among other factors. Finally, this work allows the system to evolve into new versions, in addition to opening avenues for research, development and technological innovations, aiming at telemetry, automation of field diagnostics and precision agriculture.

Keywords: Electromechanical device. Nominal torque. Cardan shaft. Operational efficiency. Project optimization. Agricultural machinery.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CS	Conjunto Soldado
CM	Conjunto Montado
BOM	Bill of Materials
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
3D	3 Dimensões
2D	2 dimensões
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
CAD	Computer-Aided Design
PLA	Polylactic Acid (Ácido Polilático)
PETG	Polyethylene Terephthalate Glycol-modified
DT	Data Output
SCK	Serial Clock
LED	Light Emitting Diode
PCI	Placas de circuito Impresso

LISTA DE SÍMBOLOS

σ	Tensão normal
E	Módulo de elasticidade
ε	Deformação
ΔL	Variação do comprimento
L	Comprimento final
L ₀	Comprimento inicial
ΔR	Variação da resistência elétrica
R	Resistência final
R ₀	Resistência Inicial
R	Resistência final
L	Comprimento final
ρ	Resistividade do material do fio
A	Área transversal da seção
ΔV	Variação volumetria
V	Volume final
m	Coefficiente de sensibilidade do extensômetro (adimensional).
μV	Microvolt
T _t	Torque teórico
P	Peso
g	Gravidade
d	Distância

LISTA DE EQUAÇÕES

(1) Força tangencial na torção de um corpo	28
(2) Equação do torque.....	28
(3) Equação da tensão normal	30
(4) Equação da deformação unitária de um corpo	30
(5) Equação do módulo de cisalhamento.....	32
(6) Lei de Hooke para limites elásticos	33
(7) Equação da variação do comprimento	36
(8) Equação da variação da resistência elétrica	36
(9) Equação da resistência elétrica	37
(10) Equação da área transversal	37
(11) Equação da resistência elétrica de um condutor cilíndrico	37
(12) Derivação da equação da resistência elétrica de um condutor cilíndrico	37
(13) Equação do coeficiente de Poisson	37
(14) Equação da variação relativa da resistência elétrica	38
(15) Equação da deformação	38
(16) Equação da variação relativa da resistência elétrica reescrita	38
(17) Equação da variação relativa da resistência elétrica reescrita	38
(18) Equação da variação relativa da resistência elétrica pelo volume do corpo	38
(19) Equação da variação relativa da resistência elétrica pelo volume do corpo	38
(20) Equação da variação relativa da resistência elétrica pelo volume do corpo	39
(21) Equação da variação relativa da resistência elétrica pelo volume do corpo	39
(22) Equação do Fator Gauge	39
(23) Equação fundamental do extensômetro resistivo.....	40
(24) Equação da tensão de saída da ponte de Wheatstone.....	43
(25) Equação da tensão de saída da ponte de Wheatstone quando variação	43
(26) Equação da tensão de saída da ponte de Wheatstone em equilíbrio	43
(27) Equação do torque teórico	93
(28) Equação de calibração do sistema.....	94
(29) Equação da tendência (erro sistemático).....	95
(30) Equação da tendência (erro sistemático).....	96

(31) Equação do desvio padrão (erro aleatório)	97
(32) Equação da incerteza padrão (erro aleatório).....	98
(33) Equação da repetitividade (erro aleatório).....	99
(34) Faixa total da voltagem do sistema eletrônico	108
(35) Faixa total da voltagem do sistema eletrônico.....	108
(36) Faixa de bit do sistema eletrônico.....	108
(37) Torque mínimo que o sistema eletrônico permite detectar.....	108
(38) Torque mínimo que o sistema eletrônico permite detectar.....	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Requisitos de projeto	49
Tabela 2 - Matriz morfológica do sistema elétrico.....	55
Tabela 3 - Matriz morfológica do sistema mecânico	56
Tabela 4 - Matriz morfológica do dispositivo de calibração	56
Tabela 5 – Concepção do sistema eletrônico.....	57
Tabela 6 - Concepção do sistema eletrônico	58
Tabela 7 – Concepção do dispositivo de calibração.....	59
Tabela 8 - Componentes e processo de fabricação.....	61
Tabela 9 - Dimensionamento do cordão de solda.....	64
Tabela 10 – Dados obtidos pelo extensômetro	92
Tabela 11 - Médias finais das leituras dos extensômetros.....	92
Tabela 12 - Dados obtidos pela fórmula fundamental.....	93
Tabela 13 - Tendência do sistema de medição	96
Tabela 14 - Leituras convertidas pela equação de calibração	97
Tabela 15 - Médias finais das leituras dos extensômetros.....	97
Tabela 16 - Gráfico da tendência do sistema de medição	98
Tabela 17 - Incerteza padrão	99
Tabela 18 - Repetitividade.....	100
Tabela 19 - Comparativo entre valor do sistema x valor teórico.....	101
Tabela 20 - Tabela de erros sistemático e erro aleatório	104
Tabela 21 - Composição de custos do sistema de medição.....	110
Tabela 22 - Custo de fabricação por unidade produzida	111
Tabela 23 - Análise de preços de equipamentos concorrentes	112
Tabela 24 - Análise comparativa de custos finais	113

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Primeira máquina para colheita de grãos	17
Figura 2 - Plataformas de corte para colheita de milho	18
Figura 3 - Colhedora automotriz Axial.....	20
Figura 4 - Plataforma para corte de milho	21
Figura 5 - Componentes plataforma de corte Vence Tudo.....	21
Figura 6 – Funcionamento dos rolos recolhedores	22
Figura 7 - Funcionamento das chapas espigadoras	23
Figura 8 – Conjunto corrente e rolos recolhedores.....	23
Figura 9 – Vista isométrica do componente helicóide (sem-fim)	24
Figura 10 - Cardan acoplado a plataforma para corte de milho	25
Figura 11 - Vista isométrica da plataforma de corte	25
Figura 12 – Eixo motriz da colhedora e eixo cardan da plataforma.....	26
Figura 13 – Representação de uma força em um braço de alavanca.....	27
Figura 14 - Distribuição das forças	28
Figura 15 - Torção em eixos: a) eixo redondo; b) eixo quadrado	29
Figura 16 – Demonstração da deformação quando aplicado força	30
Figura 17 - Curva tensão-deformação	31
Figura 18 - Módulo de Elasticidade em diferentes materiais	31
Figura 19 - Coeficiente de Poisson em diferentes materiais	32
Figura 20 - Diagrama de medição através de extensômetros	35
Figura 21 - Deformações em eixos verticais	35
Figura 22 - Componentes do Extensômetro	36
Figura 23 - Valores de Kg	39
Figura 24 - Curva de sensibilidade para diferentes materiais.....	40
Figura 25 - Tipos de extensômetros e rosetas.....	41
Figura 26 - Tipos de Pontes de <i>Wheatstone</i>	42
Figura 27 - Ponte completa de <i>Wheatstone</i>	43
Figura 28 - Setor de atuação dos entrevistados	45
Figura 29 - Gráfico do ciclo de vida do produto	45
Figura 30 - Pesquisa realizada	46

Figura 31 - Resultados da pesquisa sobre requisitos do cliente	47
Figura 32 - Requisitos de cliente x Requisitos de projeto	48
Figura 33 - Atributos de projeto	50
Figura 34 - Desdobramento estrutural	53
Figura 35 - Esboço do projeto – vista isométrica	60
Figura 36 - Solda executada no flange estrutural	65
Figura 37 - Modelo de impressora 3D.....	66
Figura 38 - Versões das Proteções em ABS	67
Figura 39 - Extensômetro duplo espinha de peixe	68
Figura 40 - Modelo de colagem do extensômetro	69
Figura 41 - Configuração da ponte <i>Wheatstone</i> para torque	70
Figura 42 - Superfície de colagem sem acabamento x com acabamento	71
Figura 43 - Marcações de posicionamento do extensômetro	72
Figura 44 - Extensômetro após o processo posicionamento e colagem	73
Figura 45 - Placas de soldagem	74
Figura 46 - Verificação da corrente do Extensômetro.....	75
Figura 47 - Módulo HX 711	76
Figura 48 - Microcontrolador ESP32	77
Figura 49 - Aplicativo Serial <i>Bluetooth</i> Terminal	78
Figura 50 - Módulo TP4056	79
Figura 51 - Bateria de lítio.....	80
Figura 52 - Medidor de bateria de barra gráfica.....	80
Figura 53 - Interruptor Pulsante e Interruptor com travamento.....	81
Figura 54 - Placa de fenolite – a) Placa em fase de projeto; b) placa após usinagem	82
Figura 55 - Placa de fenolite interligando demais componentes.....	82
Figura 56 - Diagrama elétrico do sistema.....	83
Figura 57 - Diagrama de comunicação.....	84
Figura 58 - Fluxograma da programação do código do Arduino	85
Figura 59 - Código de programação do sistema eletrônico	86
Figura 60 - Dispositivo de calibração 3D	89
Figura 61 - Dispositivo de calibração.....	89
Figura 62 - Fixação do eixo instrumentado junto ao dispositivo de calibração	90

Figura 63 - Montagem final do dispositivo de calibração	91
Figura 64 - Gráfico de dispersão	94
Figura 65 – Tabela T de <i>student</i>	100
Figura 66 - Gráfico da tendência do sistema de medição	103
Figura 67 – Curva de erros	105
Figura 68 - Erro máximo	106
Figura 69 - Sistema eletrônico interno	114
Figura 70 - Montagem completa do sistema (isométrica)	115

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVA.....	13
1.2	OBJETIVOS	14
1.2.1	Objetivos específicos	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	HISTÓRIA DA AGRICULTURA.....	16
2.1.1	Mecanização Agrícola	17
2.1.2	Colheita de milho	19
2.2	COLHEDORAS AUTOMOTRIZES.....	19
2.3	PLATAFORMA PARA CORTE DE MILHO	20
2.3.1	Principais sistemas	21
2.4	SISTEMA DE TRANSMISSÃO POR EIXO ROTATIVO	26
2.5	SUPERDIMENSIONAMENTO EM PROJETO MECÂNICOS	26
2.6	TORQUE E TORÇÃO: CONCEITOS FUNDAMENTAIS	27
2.7	CONCEITOS DE RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS.....	29
2.7.1	Tensão-deformação (lei de hooke)	29
2.7.2	Módulo de elasticidade (E)	31
2.7.3	Coefficiente de Poisson (ν)	32
2.7.4	MÓDULO DE CISALHAMENTO (G)	32
2.8	EXTENSÔMETRIA	33
2.8.1	Sistema de medição	34
2.8.2	Funcionamento do Extensômetro de Resistencia	35
2.8.3	Tipos de extensômetros	41
2.8.4	Ponte de <i>Wheatstone</i>	42
3	PROJETO	44
3.1	PROJETO INFORMACIONAL	44
3.1.1	Ciclo de vida do produto	45

3.1.2	Requisitos do cliente.....	46
3.1.3	Requisitos de projeto	48
3.2	PROJETO CONCEITUAL	51
3.2.1	Escopo do projeto.....	52
3.2.2	Estrutura funcional.....	52
3.2.3	Desdobramento estrutural do projeto.....	53
3.2.4	Matriz morfológica.....	54
3.2.5	Avaliação das concepções	57
3.3	PROJETO PRELIMINAR	60
4	FABRICAÇÃO DO PROTÓTIPO.....	63
4.1	MODELAMENTO E DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA MECÂNICO	63
4.2	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA MECÂNICO	63
4.2.1	Fabricação Mecânica	63
4.2.2	Processo de soldagem.....	64
4.2.3	Prototipagem Rápida	65
4.3	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA ELETRÔNICO	67
4.3.1	Extensômetro	67
4.3.2	HX 711 – AMPLIFICADOR E CONVERSOR	75
4.3.3	ESP32 - Microcontrolador	76
4.3.4	Dispositivo móvel – Interface de exibição	78
4.3.5	TP 4056 – Módulo de carregamento	79
4.3.6	Bateria de íon de lítio 3,7 v - 18650.....	79
4.3.7	Medidor de bateria com barra gráfica – 1S.....	80
4.3.8	Interruptor ON/OFF.....	81
4.3.9	Placa de Fenolite.....	81
4.3.10	Componentes auxiliares	82
4.3.11	Diagrama Elétrico.....	83
4.3.12	Código para programação	84
4.4	CALIBRAÇÃO.....	88
4.4.1	Dispositivo de calibração	88

4.4.2 Metodologia de calibração.....	90
4.5 ERROS DE MEDIÇÃO.....	95
4.5.1 Erro sistemático.....	95
4.5.2 Erro aleatório	96
4.5.3 Erro máximo.....	100
5 RESULTADOS.....	101
5.1 RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO EXPERIMENTAL	101
5.2 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA	102
5.2.1 Erro sistemático.....	102
5.2.2 Erro aleatório	104
5.2.3 Erro máximo.....	106
5.2.4 Precisão	107
5.2.5 Resolução	107
5.2.6 Estabilidade da bateria.....	109
5.3 VIABILIDADE ECONÔMICA.....	109
5.4 ANÁLISE CRÍTICA: PONTOS FORTES E OPORTUNIDADES DE MELHORIAS 113	
5.5 CONCEPÇÃO FINAL DO PROJETO	114
6 CONCLUSÃO	116
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	118
REFERÊNCIAS	119
APÊNDICE	124
ANEXOS	136

1 INTRODUÇÃO

O setor agrícola tem passado por constantes transformações, impulsionado pela busca de alta produtividade, eficiência energética e sustentabilidade nas operações no campo. Nesse cenário, o uso de máquinas modernas e tecnicamente otimizadas, tornou-se indispensável para atender às exigências do mercado e às condições operacionais cada vez mais rigorosas. Dessa forma, é fundamental que haja novos estudos na área, com a finalidade de viabilizar a utilização de novas tecnologias no aprimoramento de equipamentos mecânicos, a fim de ser economicamente acessíveis para empresas com menor capacidade de investimento.

O correto dimensionamento dos equipamentos mecânicos é uma etapa essencial no desenvolvimento de produtos, especialmente em equipamentos agrícolas, os quais o desempenho operacional está diretamente atrelado a sua eficiência energética, durabilidade e segurança operacional. Conforme Santos & Costa (2017), ao ajustar um sistema às suas reais condições de trabalho, evitamos o consumo excessivo de combustível, desgaste prematuro de componentes e amplia-se a vida útil do equipamento.

Além dos benefícios mecânicos citados acima, o dimensionamento adequado impacta diretamente na produtividade. Pereira (2020), comenta que as máquinas dimensionadas de forma adequadas realizam suas funções de maneira mais rápida e eficiente, reduzindo o tempo de operação e melhorando o rendimento. Do ponto de vista econômico, ocorre a redução dos custos operacionais, pois, diminui a frequência da necessidade de manutenção dos equipamentos, prolongando a vida útil e evitando despesas extras.

Do ponto de vista técnico, a determinação precisa do torque nominal de um equipamento é fundamental para o seu correto dimensionando, principalmente em sistemas primordiais como os sistemas de transmissão de potência. No entanto, essa medição representa um desafio técnico e econômico, pois, a ausência de infraestrutura adequada e as condições operacionais severas dificultam a aplicação de métodos tradicionais de instrumentação. Já, em ambientes laboratoriais, a replicação das condições reais de operação exige de bancadas especializadas e equipamento de alto custo, tornando esse tipo de análise inviável para muitas empresas.

Essa limitação leva à prática do superdimensionamento do sistema (*overdesign*), que consiste em projetar componentes ou conjuntos com capacidade superior a real necessidade, garantindo assim, a confiabilidade em diferentes condições operacionais (PAHL; BEITZ, 2005).

Embora essa prática seja eficaz do ponto de vista de confiabilidade e segurança, o *overdesing* acarreta diversas outras desvantagens, como o aumento do peso, custo com material, custo de fabricação e da complexidade do projeto (ULRICH; EPPINGER, 2012).

No contexto de equipamentos para o ramo agrícola, à prática do superdimensionamento pode gerar impactos negativos significativos, especialmente em implementos como plataformas de corte de milho. O aumento desnecessário de peso, por exemplo, compromete a eficiência energética das colhedoras automotrizes, elevando o custo de combustível. Além disso, o impacto sobre o solo, favorece a compactação excessiva. Esse fenômeno afeta diretamente a qualidade da colheita e pode reduzir a fertilidade do solo para ciclos produtivos subsequentes.

Já, sobre a segurança operacional, sistemas projetados de forma compatível com as condições reais de trabalho oferecem maior confiabilidade, reduzindo o esforço excessivo sobre os componentes, prevenindo falhas mecânicas e minimizando o risco de acidentes durante a operação.

1.1 JUSTIFICATIVA

Como vimos anteriormente, o correto dimensionamento de sistemas é de extrema importância no desenvolvimento de produtos eficientes, seguros e duráveis. No ramo agrícola, essa prática assume ainda maior importância, considerando as condições de operação severas, as variações de carga e a necessidade de otimizar recursos, como combustível, tempo de operação e vida útil dos componentes.

Um produto bem dimensionado proporciona não apenas um melhor desempenho operacional, mas contribui diretamente em outros aspectos, como redução dos custos de manutenção e a minimização de falhas em campo, onde uma parada não programada de um equipamento agrícola pode resultar em perdas incalculáveis para o produtor final. Além das despesas financeiras com a manutenção corretiva e a substituição de peças, uma parada não programada impacta diretamente na produtividade da lavoura, podendo comprometer a qualidade do grão, aumentar as perdas e provocar atrasos na janela de colheita. Consequentemente, há reflexos em toda a cadeia produtiva, atrasando o planejamento para o próximo plantio, na logística de escoamento da safra e até mesmo no aproveitamento de condições climáticas favoráveis.

Outro ponto que devemos ressaltar, que além do impacto operacional e econômico, as falhas de equipamentos a campo afetam negativamente a percepção de confiabilidade da marca,

pois quando um produto falha durante sua operação, o produtor tende a associar a marca à baixa durabilidade, à falta de segurança e suporte técnico, podendo vir a influenciar em decisões futuras de compra, reduzir fidelização do cliente e comprometer a reputação da empresa no mercado.

Tais ocorrências só evidenciam a importância em investir em soluções que aumentem a confiabilidade dos produtos. Entretanto, para alcançar essa condição, é necessário entender o comportamento do equipamento em condições reais, dispondo de embasamento e dados técnicos, como o torque de trabalho, especialmente em sistemas mecânicos como de transmissão de potência, auxiliando nas decisões de projeto e dimensionamento.

Para a obtenção de dados técnicos, normalmente demanda o uso de equipamento especializados de alto desempenho, no qual possuem um elevado custo de aquisição, exigindo também de uma infraestrutura laboratorial e de profissionais capacitados para instalação e operação. Para muitas empresas de pequeno e médio porte, esse investimento se torna inviável, resultando na ausência dos dados reais, tornando necessário à prática de superdimensionamento de componentes (*overdesign*), resultando em diversas desvantagens, como já citadas anteriormente.

Sendo assim, é necessário o desenvolvimento de novos recursos que visam atender empresas que desejam contar com esse serviço de análise de torque de seus produtos, prevendo possível problemas de dimensionando e assim melhorando cada vez mais a eficiência dos produtos.

Por fim, o projeto apresenta caráter inovador ao aplicar princípios de instrumentação com utilização de extensômetros em ambientes severos, como do ramo agrícola. Ao utilizar conectividade *Bluetooth/Wifi*, abre caminho para futuros desenvolvimentos, como telemetria rural, automação de diagnósticos e aprimoramento da agricultura de precisão.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema portátil, capaz de mensurar o torque nominal em equipamentos de eixo rotativo. O sistema proposto atua desde a captação das deformações mecânicas, passando pela amplificação e conversão dos sinais analógicos para digitais, até o processamento e interpretação dos dados. Os resultados do torque devem ser exibidos de forma prática, em tempo real, com uma precisão dentro dos limites estabelecidos por normas.

1.2.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Definir os requisitos de projeto, que atendam às necessidades do cliente;
- Desenvolver o sistema eletrônico para utilização em equipamentos agrícolas, mas que permita ser de fácil intercambialidade com outros equipamentos e áreas;
- Desenvolver o código de programação;
- Desenvolvimento da estrutura de fixação na plataforma de corte;
- Desenvolvimento da estrutura de proteção do sistema eletrônico, onde deseja-se obter um bom isolamento e vedação;
- Construir o protótipo de validação da solução;
- Realizar a calibração do dispositivo;
- Avaliar o desempenho e a funcionalidade do sistema;
- Obter o respectivo dado do torque em tempo real.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste tópico encontra-se a revisão bibliográfica realizada para compreensão do tema abordado no trabalho. O tópico será dividido em duas partes, primeiramente realizando uma abordagem sobre a agricultura com ênfase em plataformas para corte milho, onde será discutido os princípios básicos de funcionamento da plataforma, os sistemas principais e problemas relacionados ao torque incorreto em uma plataforma.

No segundo momento, será abordado tópicos fundamentais sobre sistemas elétricos, citando os componentes utilizados para o desenvolvimento no sistema, dando ênfase no funcionamento de extensômetros e a calibração do dispositivo.

2.1 HISTÓRIA DA AGRICULTURA

A agricultura surgiu há cerca de 10 mil anos atrás, no qual marcou uma das maiores revoluções da história, permitindo a ocorrência da transição de sociedades nômades para comunidades sedentárias. De acordo com Mazoyer e Roudart (2010), a prática da domesticação das plantas e animais tornou possível o acúmulo de alimentos, formando assim o surgimento das primeiras cidades, divisões sociais e sistemas econômicos de forma organizados. Desde então, a agricultura passou a ocupar um papel relevante no desenvolvimento das civilizações, sendo continuamente aprimorada por inovações técnicas e científicas.

Segundo Derry e Williamns (1997), até o século XVIII, as ferramentas utilizadas no ambiente agrícola eram, de modo geral, artesanais, confeccionadas com madeira e ferro, resultando em baixos níveis de produtividade. No século XIX, impulsionado pela revolução industrial e com o crescimento populacional na Europa, intensificou-se a necessidade de alimento, fazendo-se necessário a expansão e modernização dos métodos de produção agrícola.

Anziliero (2021) destaca que as primeiras indústrias dedicadas de implementos agrícolas surgiram nos Estados Unidos, em meados do século XIX. Nesse período, percebeu-se que o uso de implementos agrícolas promovia uma economia de insumos, além do aumento na produtividade. Antes disso, no século XX, esses implementos agrícolas eram movidos manualmente ou com o auxílio de tração animal.

A primeira máquina para colheita (Figura 1), desenvolvida por Cyrus McCormick, no ano de 1831, ficou conhecida como ceifadeira mecânica, no qual revolucionou a agricultura e

permitiu assim uma colheita mais rápida e eficiente de grãos, marcando o início da mecanização agrícola em larga escala (Silva, 2010).

Figura 1 - Primeira máquina para colheita de grãos



Fonte: loveandothertractors (2024).

No Brasil, a evolução da agricultura intensificou-se a partir da década de 60, impulsionado por investimentos em pesquisa e créditos rurais. Desde então, a agricultura no Brasil passou a utilizar diversas tecnologias em seus equipamentos, visando elevar a capacidade operacional, tornando-se em um dos principais produtores de alimentos no mundo (CONAB, 2022).

2.1.1 Mecanização Agrícola

A mecanização agrícola é definida como um conjunto de técnicas que utilizam máquinas e implementos para realizar, de forma total ou parcial, operações agrícolas. Esse processo visa reduzir o trabalho manual humano e otimizar etapas no processo de produção, como no preparo do solo, semeadura, colheita e transporte. Conforme Souza e Andrade (2018), a utilização de máquinas agrícolas específicas para cada etapa do processo de produção, tem proporcionado diversos avanços em termos de eficiência e rendimento operacional.

Com a necessidade de aumentar a produção de alimentos de forma mais rápida e eficiente, a colheita mecanizada surgiu para auxiliar nesse processo. Máquinas capazes de separar a espiga da planta e realizar a debulha trouxeram vantagens significativas para o produtor em comparação ao método de colheita manual (QUEIROZ et al, 2004).

Antes da produção comercial de máquina colhedoras, a colheita era realizada de forma manual, no qual exigia um grande número de trabalhadores. Até o final do século passado, aproximadamente 54% da colheita de milho no Brasil ainda era feita manualmente. Embora que a colheita manual apresentasse uma taxa menor de perdas quanto comparado a mecanizada, a introdução das máquinas tornou o processo mais eficiente, pois substituiu uma grande quantidade de mão de obra (SANTOS; MANTOVANI, 1997).

Figura 2 - Plataformas de corte para colheita de milho



Fonte: Vence tudo (2024)

A utilização de máquinas agrícolas foi fundamental para viabilizar a produção em larga escala, principalmente com culturas de soja, trigo e milho. O uso de equipamentos como tratores, pulverizadores, colhedoras automotrizes e semeadoras adubadoras permitiu o cultivo em grandes áreas, com uma menor utilização de mão de obra humana.

O uso de equipamentos e sistemas automatizados permitiu o monitoramento de variáveis durante as operações, como tempo, potência, força, umidade, rendimento e perdas. Nesse cenário, a coleta de dados e análise dos parâmetros operacionais, passaram a se essenciais para o planejamento de dimensionamento dos implementos agrícolas (SANTOS; COSTA, 2017).

2.1.2 Colheita de milho

No Brasil, a produção do milho ocorre em duas safras: a de verão e a de inverno, também conhecida como safrinha. A primeira, representa aproximadamente 26,2% da produção nacional, enquanto a segunda safra corresponde cerca de 73,8%. Os principais estados produtores da primeira safra são Rio Grande do Sul, Paraná e Minas Gerais, e da segunda safra, Mata Grosso do Sul, Goiás e Paraná (CONAB, 2019).

De acordo com a CONAB (2023), a produção nacional de milho ultrapassou a marca de 120 milhões de toneladas por safra, tornando o Brasil como um dos principais exportadores de grãos no mundo. Para permitir que seja possível atingir essa marca, o avanço em novas tecnologias é essencial, produzindo equipamento mais eficientes, com alta produtividade e menos perdas, capazes de operar em diversas condições de solo e clima.

2.2 COLHEDORAS AUTOMOTRIZES

Conforme Balastreire (1987), as colhedeiras automotrizes revolucionaram a colheita agrícola, pois com elas foram possíveis integrar diversas operações em uma única máquina, aumentando assim a produtividade no campo.

De acordo com Balastreire (1987), uma colhedeira automotriz é formada por diversos componentes fundamentais, que operam em conjunto para maximizar a eficiência da colheita. Dentre eles, podemos citar a plataforma de corte, responsável pelo corte das plantas e as direcionando para o sistema de alimentação. O cilindro de trilha é responsável por separar os grãos, enquanto o sistema de limpeza remove as impurezas através de peneiras e ventiladores. A máquina também possui um compartimento de armazenamento e um mecanismo de descarga, que facilita o escoamento do produto, conforme visto na Figura 3.

Figura 3 - Colhedora automotriz Axial



Fonte: Case IH (2024).

2.3 PLATAFORMA PARA CORTE DE MILHO

Antes de ser processado pela colhedora, o milho precisa ser retirado do campo, e o dispositivo responsável por esse processo, em conjunto com a máquina, é a plataforma de corte. O principal objetivo de uma plataforma de corte de milho é recolher o máximo de espigas de milho da lavoura, com a maior eficiência e velocidade, minimizando o desperdício. Ao mesmo tempo, deve promover a deterioração da cana e da palha, acelerando assim a sua decomposição. Tudo isso deve ocorrer com a menor quantidade possível de massa verde entrando na colhedora, reduzindo assim a energia necessária para separar os grãos, resultando em um menor consumo de combustível.

A plataforma para corte de milho (Figura 4) possui um divisor para cada linha colhida, com uma corrente coletora equipada com dentes que empurram o material colhido em direção a um eixo helicoidal condutor. Acima de cada corrente coletora, há dois rolos espigadores que giram no sentido horário, puxando o colmo da planta para baixo, restando apenas a espiga e um pouco de matéria verde. Após esse processo, o material restante é conduzido para os mecanismos internos da colhedora automotriz (SRIVASTAVA, 1996).

Figura 4 - Plataforma para corte de milho

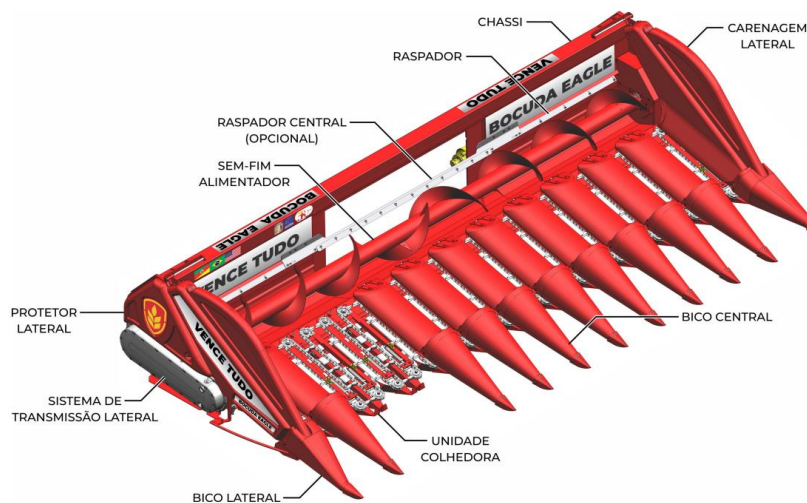


Fonte: O autor, (2025).

2.3.1 Principais sistemas

Neste tópico será abordado os principais sistemas de uma plataforma para corte de milho, entre eles a linha recolhadora (ou unidade recolhadora), responsável por realizar o corte e através de correntes conduzir a espiga até o sistema sem-fim, responsável por conduzir as espigas até o alimentador da colhedora. Ambos os sistemas citados anteriormente são acionados por um sistema de transmissão. A Figura 5 representa os principais componentes da plataforma.

Figura 5 - Componentes plataforma de corte Vence Tudo



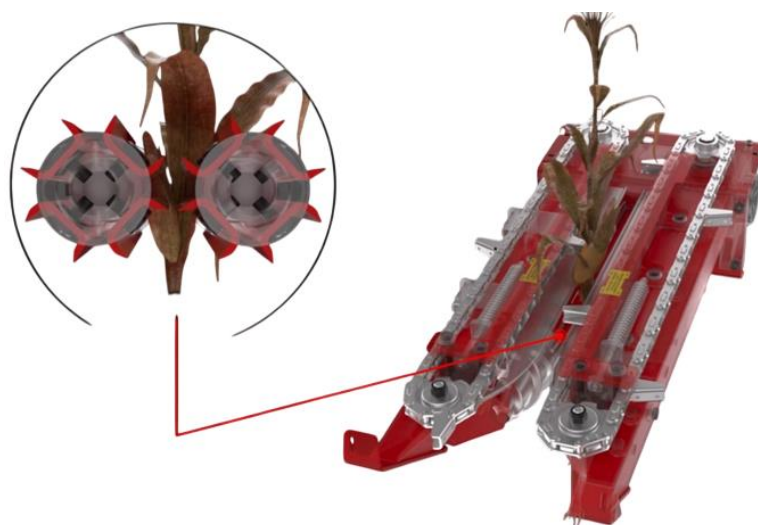
Fonte: Vence Tudo (2024)

2.3.1.1 Linha recolhedora

As linhas recolhedoras desempenham um papel fundamental em uma plataforma de corte, pois são responsáveis por puxar o colmo do milho para baixo, destacando a espiga e assim transportando para o interior da plataforma. Além disso, também impedem a entrada de massa verde e auxiliam na decomposição dos materiais orgânicos. Os principais componentes de uma unidade recolhedora são:

- **Rolos recolhedores:** Posicionados abaixo da linha, são responsáveis por puxar o colmo do milho para baixo, fazendo que o mesmo atinge as chapas espigadoras. Também são responsáveis por danificar o colmo, facilitando sua decomposição na lavoura, além de evitar o envio de material orgânico para dentro da plataforma. Além disso, o sistema de rolo recolhedor contam com um rolo direito, que gira no sentido anti-horário, e um rolo esquerdo, que giram no sentido horário.

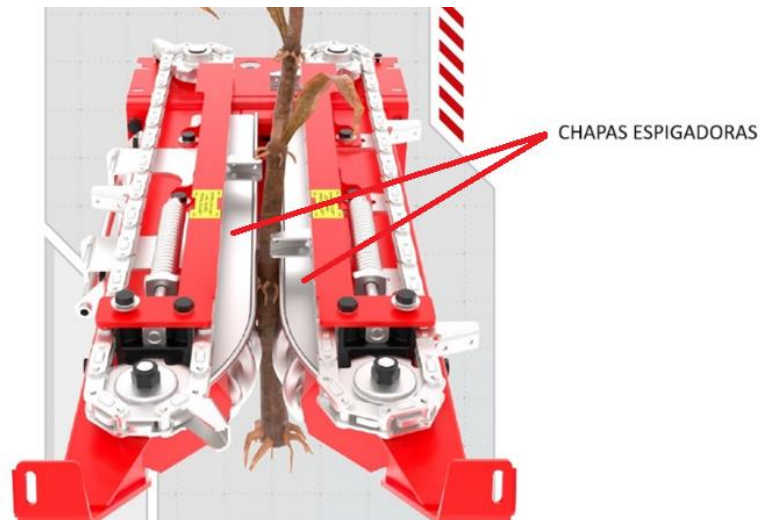
Figura 6 – Funcionamento dos rolos recolhedores



Fonte: Vence tudo (2024)

- **Chapas espigadoras:** Posicionadas em cima da unidade recolhedora, responsável por direcionar e destacar a espiga do colmo do milho, até que as correntes recolhedoras os encontrem. Um lado das chapas espigadoras permanecem fixo, o outro lado é móvel e deve ser regulado conforme a espessura do colmo.

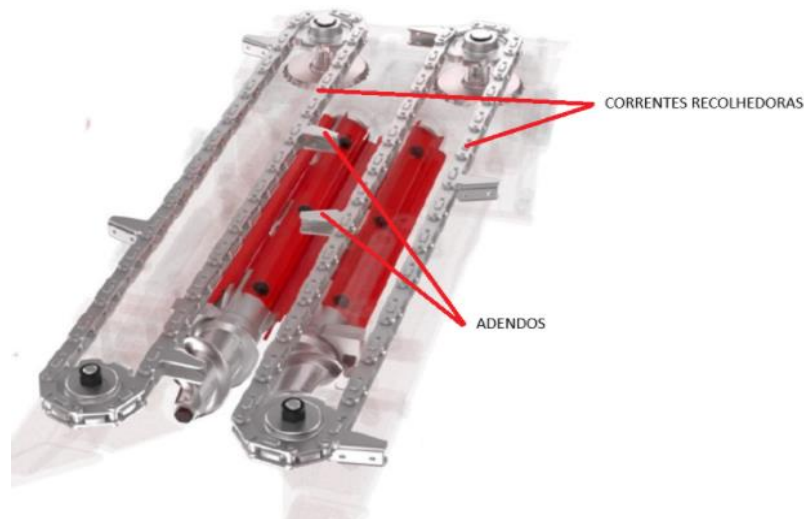
Figura 7 - Funcionamento das chapas espigadoras



Fonte: Vence tudo (2024)

- **Correntes recolhedoras:** Sistema posicionado acima das chapas espigadoras, são responsáveis por levar as espigas destacadas através de adendos unidos a corrente até o alimentador sem-fim. O movimento da corrente é obtido através de uma caixa de transmissão, no qual fornecerá a rotação necessária para a colheita.

Figura 8 – Conjunto corrente e rolos recolhedores

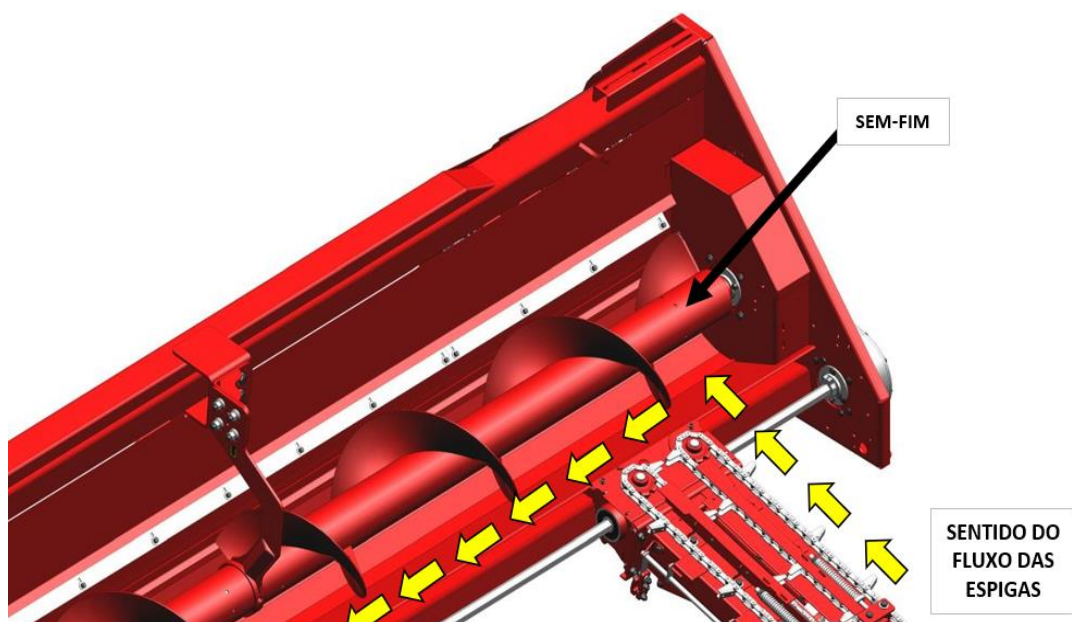


Fonte: Vence tudo (2024)

2.3.1.2 Sem-fim (Helicoide)

Esse sistema tem a função de transportar algum tipo de material de forma contínua e eficiente. Na plataforma para corte de milho, é responsável por mover as espigas de milho recolhidos pelos rolos recolhedores e transportados pelas correntes recolhedoras até o alimentador central da colhedora. Esse sistema garante que o fluxo de material seja constante e evita que ocorra obstruções. A Figura 9 demonstra o sentido de fluxo das espigas.

Figura 9 – Vista isométrica do componente helicoide (sem-fim)



Fonte: Vence tudo (2024)

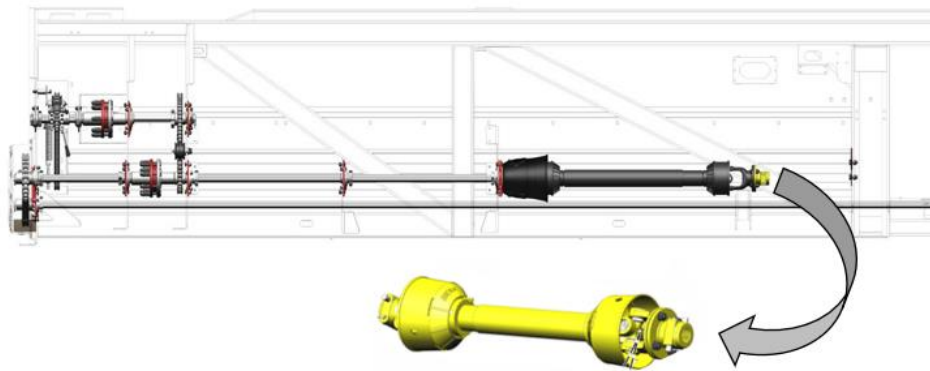
2.3.1.3 Sistema de transmissão

A transmissão de uma plataforma para corte de milho tem a função de transmitir a potência provinda da colhedora para os demais sistemas da plataforma, sendo eles o sem-fim e a linha recolhedora (rolo recolhedor e corrente recolhedora). Com isso, garante que esses sistemas funcionem da melhor maneira, com potência e rotação correta.

No eixo de acionamento da colhedora é acoplado o componente denominado como Cardan, utilizado para transmitir torque entre diferentes partes e com ângulos diferentes (até 15°, conforme tabela de fornecedores), de forma contínua, sem perda de eficiência. Ele que será responsável por fazer a transmissão da potência da colhedora automotriz até a plataforma.

O eixo cardan (Figura 10), é um componente de transmissão utilizado para conectar dois sistemas rotativos não alinhados, separados por alguma distância. Segundo Rudenko (1999), o eixo cardan é composto essencialmente por um tubo de aço, juntas universais em suas extremidades e, em alguns casos, luvas deslizantes para compensar variações no comprimento da transmissão durante o trabalho.

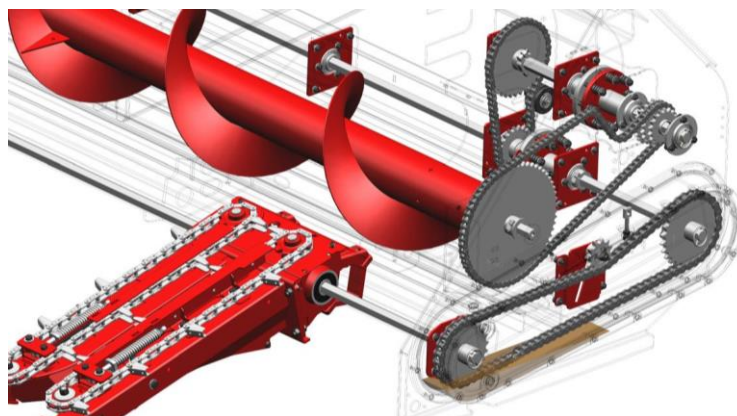
Figura 10 - Cardan acoplado a plataforma para corte de milho



Fonte: Vence Tudo (2024).

Posteriormente, essa transmissão puramente mecânica, irá transmitir a potência através de rodas dentadas e eixos para os sistemas mencionados acima. Além disso, é possível ajustar as velocidades de cada sistema, mudando o número de dentes das rodas dentadas, assim adequando conforme as condições de cada lavoura e também da velocidade vinda da colhedora, evitando que ocorra perdas no processo de colheita ou danos ao equipamento, conforme demonstra a Figura 11.

Figura 11 - Vista isométrica da plataforma de corte



Fonte: Vence Tudo (2024).

2.4 SISTEMA DE TRANSMISSÃO POR EIXO ROTATIVO

De acordo com Rudenko (1999), os eixos rotativos podem estar conectados por acoplamentos diretos ou por juntas universais (eixo cardan), permitindo assim a utilização tanto em condições alinhadas quanto em ângulos variáveis.

A transmissão de potência por eixos rotativos é empregada em diversos sistemas mecânicos onde existe a necessidade de transferir torque entre dois dispositivos. Esse tipo de transmissão transmite torque de forma contínua entre o elemento motriz e o elemento movido, como no caso da colhedora automotriz que fornece a potência necessária para o funcionamento dos sistemas da plataforma de corte de milho, conforme visto na Figura 12.

Figura 12 – Eixo motriz da colhedora e eixo cardan da plataforma



Fonte: Vence Tudo (2024).

2.5 SUPERDIMENSIONAMENTO EM PROJETO MECÂNICOS

O superdimensionamento (*overdesign*), é uma prática recorrentes em projetos mecânicos, que consiste em projetar componentes ou sistemas com uma capacidade superior à demanda real. Conforme Pahl e Beitz (2005), essa prática visa garantir a confiabilidade operacional do componente diante da ausência de dados técnicos, no qual torna-se impossível prever com exatidão as reais condições de trabalho no qual o componente está sendo submetido.

No meio agrícola, essa prática é ainda mais frequente, devido à alta complexidade e variabilidade das condições encontradas em campo, onde fatores como solo, revelo, clima e até mesmo fatores culturais possam vir afetar diretamente no projeto. De acordo com Ulrich e Eppinger (2012), devido à falta de dados e de medições precisa dos esforços reais, engenheiros e projetistas tendem a aplicar fatores de segurança elevados, dimensionando componentes de forma robusta.

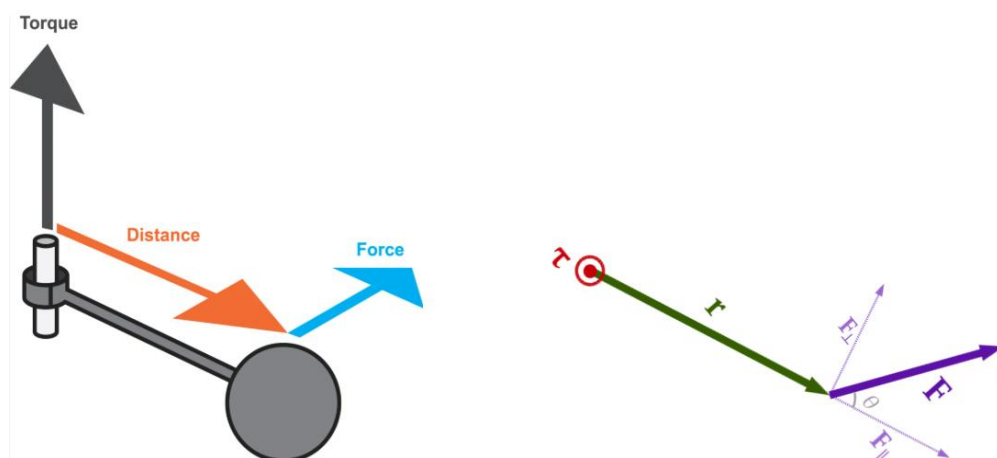
Em implementos agrícolas, como plataforma de corte de milho, essa prática resulta em estruturas pesadas, embora sejam confiáveis, impactam negativamente em diversos outros aspectos. O aumento da massa exige um maior esforço, elevando o consumo de combustível e, conseqüentemente, elevando os custos operacionais do produtor. Além disso, o excesso de peso favorece a compactação do solo, reduzindo a infiltração de água e impactando no desenvolvimento do cultivo, comprometendo assim a fertilidade da área e a produtividade.

Contudo, o excesso de material utilizado no dimensionamento de componentes e sistemas, impactam na margem de lucro das empresas e no custo final do produtor, comprometendo diretamente na competitividade dos equipamentos no mercado.

2.6 TORQUE E TORÇÃO: CONCEITOS FUNDAMENTAIS

O Torque é uma grandeza fundamental da Engenharia, no qual desempenha um papel crucial no estudo de sistemas rotativos. Também conhecido como momento de torção, expressa a capacidade de uma determinada força em provocar rotação em torno de um eixo.

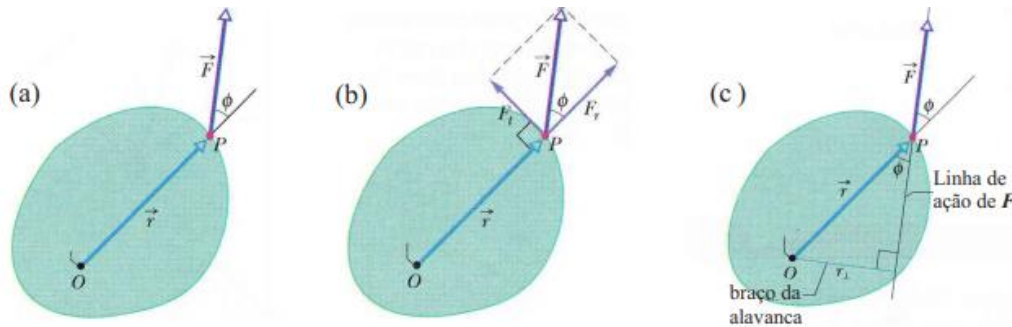
Figura 13 – Representação de uma força em um braço de alavanca



Fonte: Wikipédia (2023).

Para determinar como a Força (F) resulta na rotação do eixo, a Figura 14 representa a decomposição da força em duas componentes.

Figura 14 - Distribuição das forças



Fonte: UNESP (2024)

Uma delas é chamado de componente radial (F_r), no qual não causa rotação pois atua na mesma linha que passa o ponto zero, ou seja, apenas exerce uma tração/compressão sobre o ponto zero. A outra componente é chamada de componente tangencial (F_t), é perpendicular a r e é responsável por causar rotação. Possui intensidade conforme a equação abaixo:

$$F_t = F \sin \theta \quad (1)$$

A capacidade da força em girar um componente não está somente na intensidade de sua componente tangencial, mas também da distância em relação ao ponto O, conforme visto na figura anterior. O vetor r é decomposto em componentes paralelos ($R_{\parallel} = r \cos \theta$) e perpendiculares ($R_{\perp} = r \sin \theta$), chamados de linha de ação e braço de alavanca, respectivamente. Com isso, a equação abaixo define o torque sofrido por um corpo sob ação de uma força (F) aplicada em um ponto (P) a uma determinada distância (r) do eixo de rotação:

$$T = F_t \times r \quad (2)$$

Sendo:

T = Torque (N.m);

F_t = Força (N);

r = Distância entre os centros (m).

Quando um eixo circular é submetido a um esforço torcional, todas as suas seções transversais mantêm-se planas e inalteradas. Essa propriedade é característica somente em eixos circulares, não se apresentando em peças com seções diferentes, conforme Figura 15. O fato de as seções transversais permanecerem planas e indeformadas, ocorre por que o eixo é axissimétrico, ou seja, sua aparência se mantém igual quando o eixo é rodado de um determinado ângulo. A figura 15 compara as deformações entre um eixo circular e um eixo quadrado.

Figura 15 - Torção em eixos: a) eixo redondo; b) eixo quadrado



Fonte: BEER, (2017).

2.7 CONCEITOS DE RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS

A resistência dos materiais é fundamental no ramo da Engenharia, no qual estuda o comportamento dos corpos sólidos quando submetidos a diferentes tipos de carregamentos. Os conceitos abordados nesse tópico são essenciais para compreender o funcionamento de sistemas de medição por extensômetros.

2.7.1 Tensão-deformação (lei de hooke)

Conforme Hibbeler (2015), ao aplicar uma força sobre um material, dentro do seu limite elástico, será possível observar uma relação linear entre tensão (σ) e deformação (ϵ), no qual é representada pela Lei de Hooke. Essa lei estabelece que a tensão é diretamente proporcional a deformação, sendo o coeficiente de proporcionalidade conhecido como módulo de elasticidade, ou módulo de Young.

A tensão (σ) é um vetor, tendo uma magnitude e uma direção, e é definida como a força aplicada por unidade de área, sendo expressa no sistema internacional em Pascal (Pa), embora

muito utilizada em kgf/cm^3 ou MPa. Podem ser do tipo normal (σ) ou cisalhante (τ), tendo origens de tração, compressão, torção, residual ou térmica. Podem ser representadas no estado de tensão uniaxinal, bi-axial ou tri-axial.

$$T\sigma = \frac{F}{A} \quad (3)$$

Sendo:

σ = Tensão normal (Pa, N/m^2 ou MPa);

F = Força aplicada (N);

A = área da seção transversal (m^2).

A deformação (ϵ) é a razão entre a variação do comprimento (ΔL) e o comprimento original (l_0), sendo uma grandeza adimensional. A variação do comprimento (ΔL) é a diferença entre o comprimento final e o comprimento inicial (Figura 16).

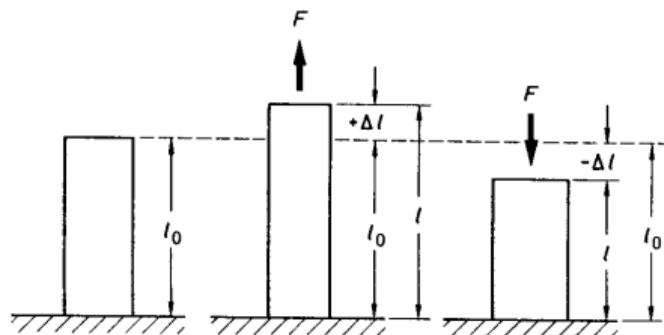
$$T = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (4)$$

Sendo:

ϵ = Deformação unitária (adimensional);

ΔL = Variação no comprimento (m);

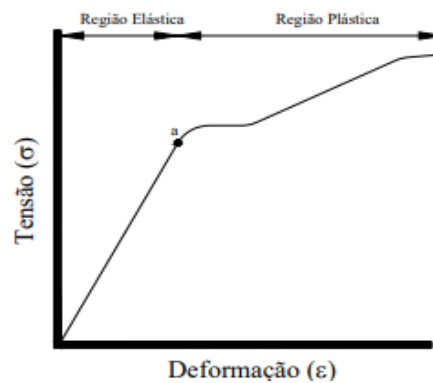
L_0 = Comprimento original (m).



Fonte: UFSC, (2004).

A análise da curva tensão (Figura 17), permite identificar regiões importantes do comportamento de um determinado material. Primeiramente, na região elástica, a relação tensão-deformação é linear, ou seja, é possível seguir os fundamentos da Lei de Hooke, no qual serve de princípio no funcionamento dos extensômetros. Já na região plástica, onde as deformações são permanentes, o princípio da Lei de Hooke não se aplicam.

Figura 17 - Curva tensão-deformação



Fonte: UFSC, (2004).

2.7.2 Módulo de elasticidade (E)

O módulo de elasticidade (E), também conhecido como módulo de Young, é uma propriedade que determina a rigidez de um material quando submetido a esforços dentro do limite da região elástica. Essa propriedade relaciona tensão (σ) e a deformação (ϵ) conforme a Lei de Hooke. Quanto maior o valor de E, menor será a deformação de um material quando uma mesma carga for aplicada. A unidade de medida utilizada é Pascal (Pa ou MPa).

Figura 18 - Módulo de Elasticidade em diferentes materiais

Material	Densidade kg/m ³	Limite de resistência			Tensão de escoamento ³		Módulo de elasticidade, GPa	Módulo de elasticidade transversal, GPa
		Tração, MPa	Compressão ² , MPa	Cisalhamento, MPa	Tração, MPa	Cisalhamento, MPa		
Aço								
Estrutural (ASTM-A36)	7860	400			250	145	200	77,2
Baixa liga e alta resistência								
ASTM-A709 Classe 345	7860	450				345	200	77,2
ASTM-A913 Classe 450	7860	550				450	200	77,2
ASTM-A992 Classe 345	7860	450				345	200	77,2

Fonte: BEER (2011).

2.7.3 Coeficiente de Poisson (ν)

O coeficiente de Poisson (ν) é uma propriedade mecânica que expressa a relação entre a deformação lateral e a deformação longitudinal de um corpo quando submetido a um carregamento axial. É uma grandeza adimensional, amplamente utilizado em cálculos de modelagens de elementos finitos. Normalmente tem valores típicos da faixa de 0 até 0,5 para materiais sólidos.

Figura 19 - Coeficiente de Poisson em diferentes materiais

Material	Coeficiente de Poisson (ν)
Alumínio	0,345
Aços-carbono	0,293
Cromo	0,210
Cobre	0,343
Ouro	0,440
Ferro	0,293
Manganês	0,291
Níquel	0,312
Prata	0,367
Titânio	0,321
Tungstênio	0,280

Fonte: Hertzberg (1995).

2.7.4 MÓDULO DE CISALHAMENTO (G)

O módulo de cisalhamento (G), também conhecido como módulo de rigidez, é uma propriedade mecânica que relaciona a tensão de cisalhamento (τ) com a deformação angular (γ) de um material.

Segundo Hibbeler (2015), o módulo de cisalhamento é fundamental para a análise de esforços torcionais em componentes estruturais, como eixos. Para materiais isotrópicos, a equação que define o módulo de cisalhamento (G) é dada por:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (5)$$

2.8 EXTENSÔMETRIA

O dimensionamento de componentes na Engenharia é tradicionalmente baseado em métodos analíticos, no qual comparam a resistência de um determinado material com as cargas aplicadas. Entretanto, essas cargas aplicadas normalmente são estimadas, o qual pode resultar em falhas mecânicas, tanto envolvendo sobrecarga quanto desgastes. Conforme Beer e Johnston (2017), as avaliações imprecisas das cargas reais atuantes em um componente podem comprometer diretamente a segurança e a durabilidade do mesmo.

Com o avanço da tecnologia e a crescente busca por eficiência, surgiu a necessidade de compreender, com maior exatidão, os carregamentos reais atuantes em um componente. A busca por redução de custos e otimização de matéria prima tornaram indispensável o uso de técnicas experimentais, como a extensometria. De acordo com Callister (2012), o conhecimento preciso do comportamento real dos componentes garante um projeto seguro e funcional, especialmente em estruturas no qual os esforços são imprevisíveis e variados.

A relação entre tensão e deformação é descrita por Robert Hooke, que propôs no ano de 1678 a Lei de Hooke, no qual estabelece que a deformação elástica de um material é proporcional à tensão aplicada dentro dos seus limites elásticos. O módulo de elasticidade do material (E) é uma constante que quantifica a rigidez do material, sendo fundamental para compreender o comportamento estrutural de um componente.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (6)$$

Onde:

σ = Tensão normal (Pa);

E = Módulo de elasticidade (GPa);

ε = Deformação (m).

Historicamente, a medição de deformações iniciou-se por meio de dispositivos mecânicos, porém apresentavam diversas limitações e erros de medições. Com a evolução da tecnologia, Charles Wheatstone, em 1843, desenvolveu a ponte de *Wheatstone*, fundamental para leituras de pequenas variações de resistência elétrica. Na sequência, no ano de 1856, William Thomson demonstrou que a resistência elétrica de um condutor varia sob tensão

mecânica. Com base nesses dois princípios, Eduard Simmons e Arthur Ruge desenvolveram, no ano de 1938, os primeiros extensômetros de resistência elétrica,

2.8.1 Sistema de medição

A medição de deformação por meio de extensômetros requer não apenas o sensor, mas também da utilização de um sistema completo de aquisição e interpretação dos sinais. A utilização do sistema completo é necessária porque as deformações mecânicas geradas nos componentes são, em sua maioria, extremamente pequenas, resultando em variações mínimas na resistência elétrica do extensômetro. Essa variação mínima na resistência é, normalmente, na casa de milivolts, no qual não podem ser detectadas por instrumentos convencionais, como multímetros.

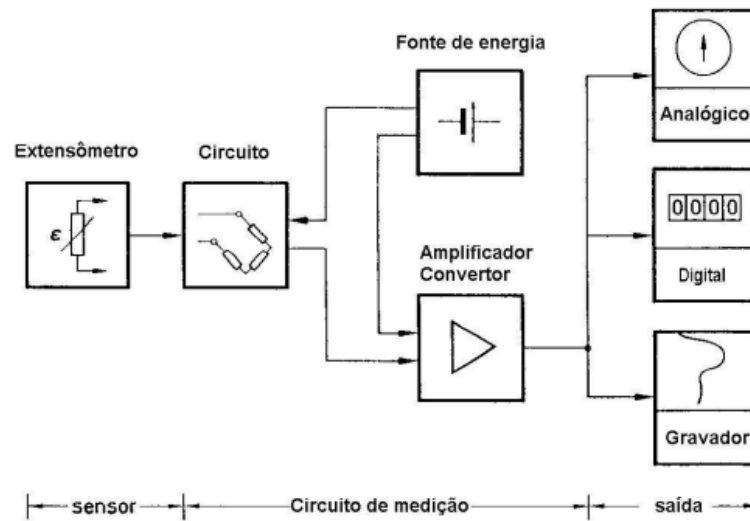
Nesse contexto, o sistema completo tem como função transformar os sinais elétricos captados pelos extensômetros em dados que sejam possíveis analisar. Esse sistema é capaz de captar, amplificar, converter e interpretar os sinais obtidos em diversas variáveis físicas, como deformação, força e pressão.

Segundo Beckwith, Marangoni e Lienhard (2007), na extensometria elétrica, a conversão da deformação do componente em sinal elétrico é feita pela ponte de *Wheatstone*, circuito amplamente utilizado para essa finalidade. Essa ponte permite captar variações de resistência extremamente pequenas.

Essa ponte pode ter diferentes combinações: $\frac{1}{4}$ de ponte, $\frac{1}{2}$ ponte ou ponte completa, dependendo da sensibilidade e precisão que seja necessário. Quando ocorre uma deformação em um componente onde haja extensômetro fixado, uma alteração na resistência elétrica do mesmo será produzida, gerando um desequilíbrio da ponte de *Wheatstone*, resultando em uma tensão diferencial de saída.

Segundo material didático da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC, 2016), normalmente essa tensão diferencial de saída gerada pelo desequilíbrio da ponte, precisa ser amplificada e, posteriormente, interpretada por uma placa de aquisição de dados.

Figura 20 - Diagrama de medição através de extensômetros



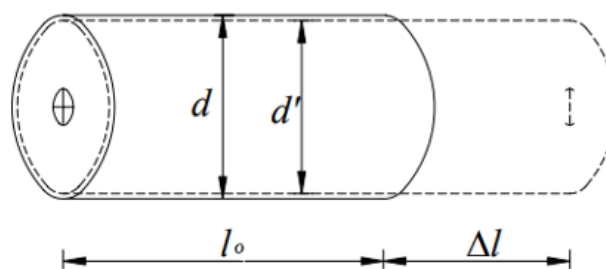
Fonte: UFSC, (2004).

2.8.2 Funcionamento do Extensômetro de Resistência

O funcionamento do extensômetro de resistência variável, conhecido também como *strain gauge*, é um sensor que tem como função detectar e quantificar deformações mecânicas em componentes. Como já dito anteriormente, seu princípio de funcionamento é baseado na variação da resistência elétrica de um condutor quando submetido a uma deformação.

Quando o extensômetro estiver colado na superfície de um componente, e o mesmo venha a sofrer algum tipo de esforço mecânico, dentro do seu limite elástico, como compressão, tração ou torção, o corpo do extensômetro acompanha essa deformação, resultando em uma mudança proporcional do seu comprimento e, conseqüentemente, na sua resistência elétrica (HIBBELER, 2015).

Figura 21 - Deformações em eixos verticais



Fonte: UFSC, (2004).

Conforme a Figura 21, ao aplicar força mecânica em um componente, o mesmo sofrerá uma variação no comprimento, conforme representado pela equação

$$\Delta L = L - L_0 \quad (7)$$

Sendo:

ΔL = Variação do comprimento (m);

L = Comprimento final (m);

L_0 = Comprimento inicial (m).

Em consequência desta variação do comprimento do componente (Figura 22), ocorre uma variação da resistência do extensômetro fixado, representado pela equação abaixo:

$$\Delta R = R - R_0 \quad (8)$$

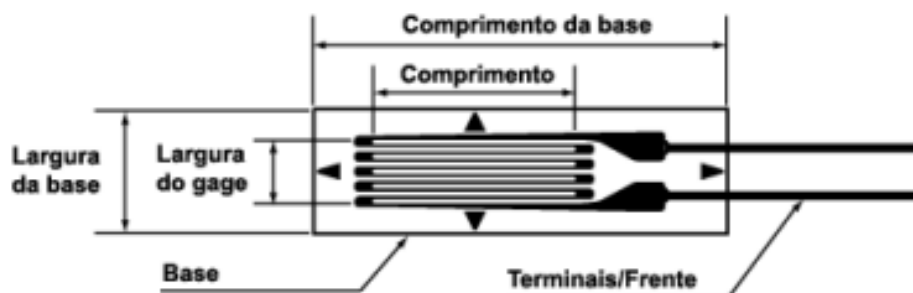
Sendo:

ΔR = Variação da resistência elétrica (Ω);

R = Resistência final (Ω);

R_0 = Resistência Inicial (Ω).

Figura 22 - Componentes do Extensômetro



Fonte: USP, (2012).

Sabendo que a Resistência final (R) é representada por:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} \quad (9)$$

Sendo:

R = Resistência final (Ω);

L = Comprimento final (m);

ρ = Resistividade do material do fio ($\Omega \cdot m$);

A = Área transversal da seção (m^2).

Sabendo que:

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (10)$$

O resultado da expressão é dado por:

$$R = \frac{4 \cdot L \cdot \rho}{\pi \cdot D^2} \quad (11)$$

Ao derivar a equação anterior, o diferencial da Resistência final é expresso por:

$$\frac{\partial R}{R} = \frac{\partial L}{L} - 2 \frac{\partial D}{D} + \frac{\partial \rho}{\rho} \quad (12)$$

Substituindo pelo coeficiente de Poisson:

$$v = - \frac{\partial D / D}{\partial L / L} \quad (13)$$

A equação pode ser reescrita como:

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2 \cdot \nu) \cdot \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (14)$$

Como a deformação (ε) é expressa por:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (15)$$

Temos como resultado a equação:

$$\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon (1 + 2 \cdot \nu) + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (16)$$

Finalmente pode-se escrever a equação da seguinte forma:

$$\frac{\Delta R/R}{\varepsilon} = (1 + 2 \cdot \nu) + \frac{\Delta \rho/\rho}{\varepsilon} \quad (17)$$

Como a resistividade elétrica (ρ) varia proporcionalmente com a mudança volumétrica do material (ΔV), de modo que:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = m \cdot \frac{\Delta V}{V} \quad (18)$$

Sendo:

ΔV = Variação volumétrica (m^3);

V = Volume final (m^3);

m = Coeficiente de sensibilidade do extensômetro (adimensional).

E sabendo que:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta L}{L} + \left(-2 \cdot \nu \cdot \frac{\Delta L}{L}\right) \quad (19)$$

$$\frac{\Delta V}{V} = (1 - 2 \cdot \nu) \cdot \frac{\Delta L}{L} \quad (20)$$

$$\frac{\Delta V}{V} = (1 - 2 \cdot \nu) \cdot \varepsilon \quad (21)$$

Substituindo a equação acima na equação final, temos:

$$\frac{\Delta R/R}{\varepsilon} = (1 + 2 \cdot \nu) + [m(1 - 2 \cdot \nu)] \quad (22)$$

Toda a parte direita da equação acima representa a sensibilidade de deformação do material metálico, onde é expressa por K_G . Normalmente, busca-se utilizar na construção dos extensômetros materiais que apresentam valores próximos a dois, sendo possível assim desprezar a parcela de variação da resistência elétrica devido as mudanças na resistividade do material condutor. A Figura 23 demonstra os valores de alguns materiais utilizados na construção de extensômetros.

Figura 23 - Valores de K_G

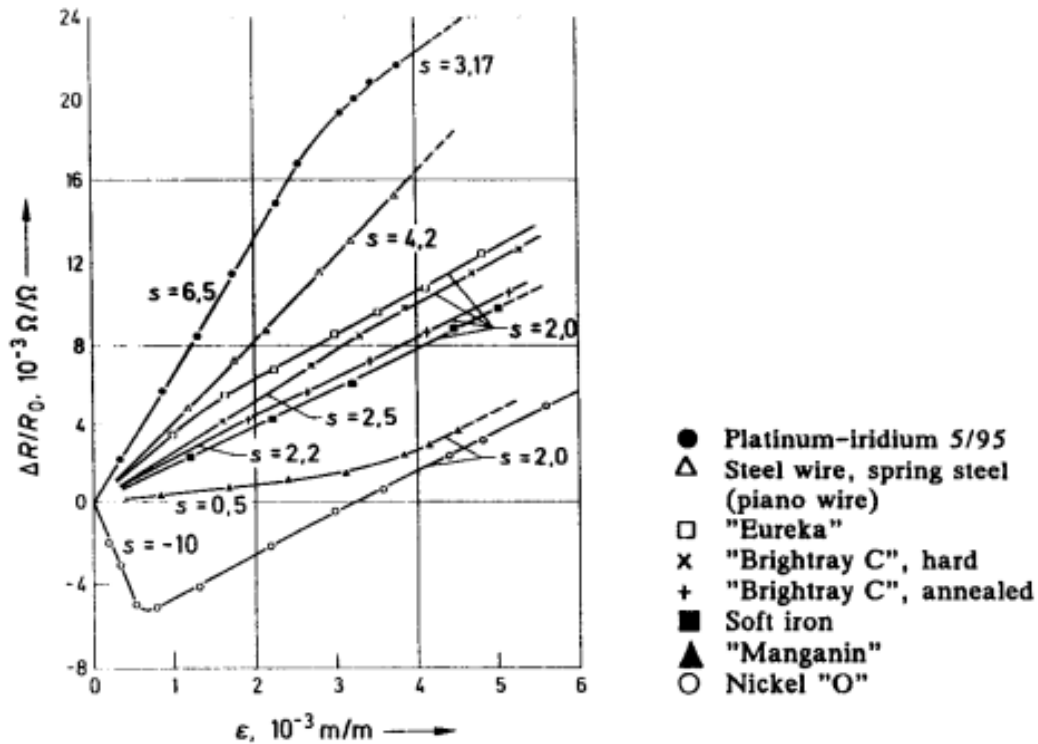
Material	Composição (%)	K_G
Constantan (Advance)	45 Ni, 55 Cu	2,1
Nichrome V	80 Ni, 20 Cr	2,2
Isoelastic	36 Ni, 8 Cr, 0,5 Mo, 55,5 Fe	3,6
Karma	74 Ni, 20 Cr, 3 Al, 3 Fe	2,0
Armour D	70 Fe, 20 Cr, 10 Al	2,0
Liga 479	92 Pt, 8 W	4,1

Fonte: USP, (2012).

A variação relativa da resistência elétrica (ΔR) se relaciona de forma linear com a variação relativa do comprimento (ΔL). A razão entre eles é chamada de fator de sensibilidade do *string gauge*, ou conhecido também como *Fator Gauge*, no qual é representado por K_G .

A Figura 24 representa a curva de sensibilidade dos materiais, juntamente com seus respectivos valores. É possível perceber que materiais com valores próximos a dois mantêm uma proporcionalidade entre as variações da resistência elétrica e da deformação, sendo possível, como citado anteriormente, desprezar.

Figura 24 - Curva de sensibilidade para diferentes materiais



Fonte: UFSC, (2004).

Por fim, podemos descrever a equação final que representa o funcionamento do extensômetro de resistência variável como:

$$K_G \cdot \varepsilon = \frac{\Delta R}{R} \quad (23)$$

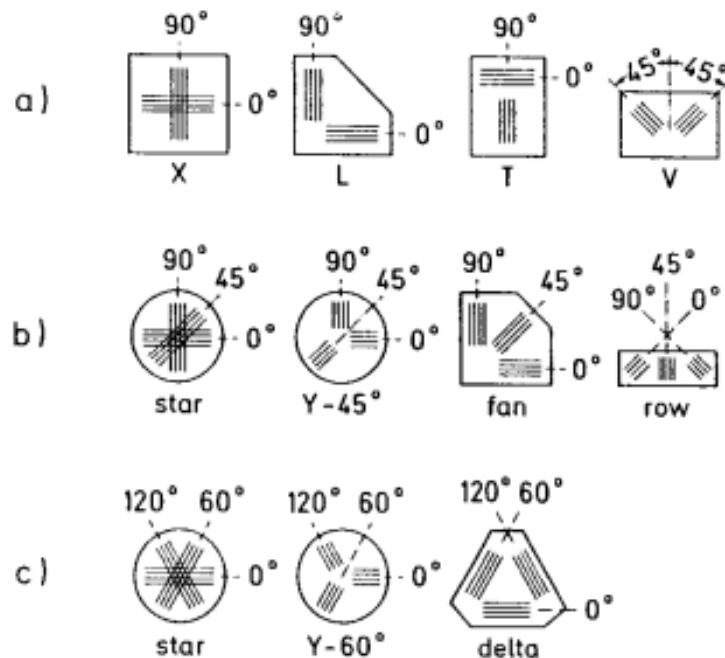
2.8.3 Tipos de extensômetros

Existem diversos tipos de extensômetros no mercado, no qual variam dependendo do propósito de aplicação, material ou dimensão. Normalmente, são classificados como:

- De acordo com o material resistivo: Semicondutor; Lâmina ou Fios resistivos.
- De acordo com o material de base: Base de Poliéster; Base de Poliamida ou Base de Baquelite.
- De acordo com a sua configuração: Uniaxial; Biaxiais; Múltiplos eixos (Roseta) ou especial.

Conforme UFSC (2004), os extensômetros dependem exclusivamente das características de operação, tais como: Faixa de temperatura que o extensômetro estará submetido; Limite máximo de alongamento; Corrente máxima e a Resistência a umidade. A Figura 25 representa alguns tipos de extensômetros com suas respectivas rosetas, que normalmente variam em ângulos de $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ e $0^\circ/60^\circ/120^\circ$.

Figura 25 - Tipos de extensômetros e rosetas



Fonte: UFSC, (2004).

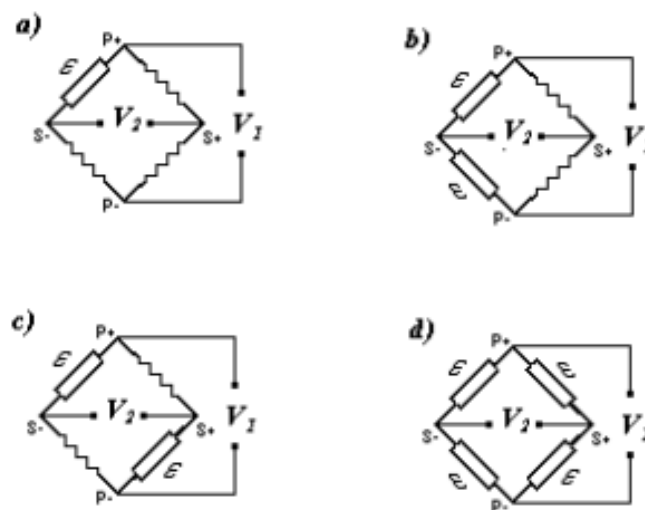
2.8.4 Ponte de *Wheatstone*

A ponte de *Wheatstone*, desenvolvida por Samuel Christie em 1833 e aprimorada por Charles Wheatstone em 1843, tem como função medir pequenas variações de resistência elétrica. Conforme UFSC (2004), sua aplicação é converter as variações resistivas, geradas pelos extensômetros, em sinais de tensão, no qual serão amplificados e interpretados pelo sistema de aquisição de dados.

Callister (2012) comenta que a ponte pode ser montada em diferentes configurações, como $\frac{1}{4}$ de ponte, $\frac{1}{2}$ ponte, duplo $\frac{1}{4}$ de ponte ou ponte completa, dependendo do número de extensômetros utilizados. Uma das principais vantagens da ponte é sua elevada sensibilidade, pois consegue medir deformações onde os sinais gerados são extremamente pequenos (milivolts).

A Figura 26 demonstra os quatro tipos de configurações da ponte de *Wheatstone*, sendo a) $\frac{1}{4}$ de ponte; b) $\frac{1}{2}$ de ponte; c) duplo $\frac{1}{4}$ de ponte e d) ponte completa.

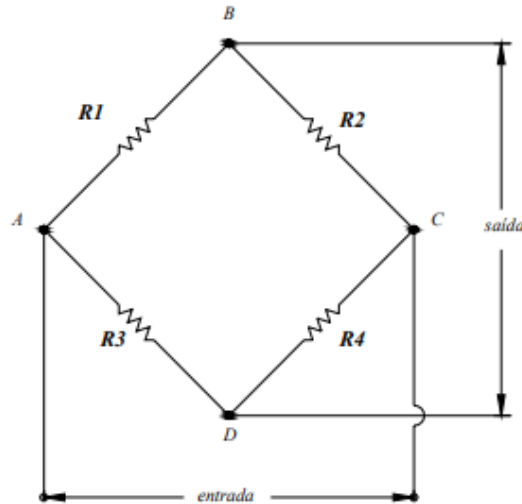
Figura 26 - Tipos de Pontes de *Wheatstone*



Fonte: UFSC, (2004).

O circuito da ponte é composto por quatro resistores interligados, em forma de losango, com um ponto de alimentação e outro de medição. Quando a razão entre os pares de resistores é igual, significa que a ponte está em equilíbrio, ou seja, a tensão de saída é nula.

Entretanto, quando ocorre uma variação da resistência de um dos braços, a ponte sai do equilíbrio, gerando um diferencial de potência (DDP) proporcional a variação resistiva.

Figura 27 - Ponte completa de *Wheatstone*

Fonte: USP, (2012).

A Figura 27 representa o diagrama geral da ponte completa, formada por quatro resistores denominados como R1, R2, R3 e R4, no qual suas respectivas impedâncias são iguais aos resistores, alimentadas por uma tensão de entrada de corrente alternada (V_i). A ponte é energizada pelos terminais “A” e “C”, e o sinal da tensão de saída (V_o) é obtido pelos terminais “B” e “D”.

Quando os valores das resistências obedecem a relação R_1 e $R_3 = R_2$ e R_4 , equação geral é expressa por:

$$V_o = \frac{R_1 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \cdot V_i \quad (24)$$

Quando a ponte sofrer alguma variação, denominada como (ΔV_o), a equação será:

$$V_o = \frac{(R_1 + \Delta R_1) \cdot (R_3 + \Delta R_3) - (R_2 + \Delta R_2) \cdot (R_4 + \Delta R_4)}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2) \cdot (R_4 + \Delta R_4 + R_3 + \Delta R_3)} \cdot V_i \quad (25)$$

Caso a ponte estiver em balanço, ou seja, $R_1=R_2=R_3=R_4$, então:

$$V_o = 0 \quad (26)$$

3 PROJETO

Este capítulo aborda as ferramentas de projeto responsáveis por auxiliar nas tomadas de decisões, como o desenvolvimento do projeto informacional e projeto conceitual, além de descrever os procedimentos técnicos e experimentais que foram aplicados durante o desenvolvimento do dispositivo.

Primeiramente foi realizado uma pesquisa com diversos profissionais da área, buscando entender quais seriam os requisitos fundamentais do projeto, juntamente com o grau de importância.

3.1 PROJETO INFORMACIONAL

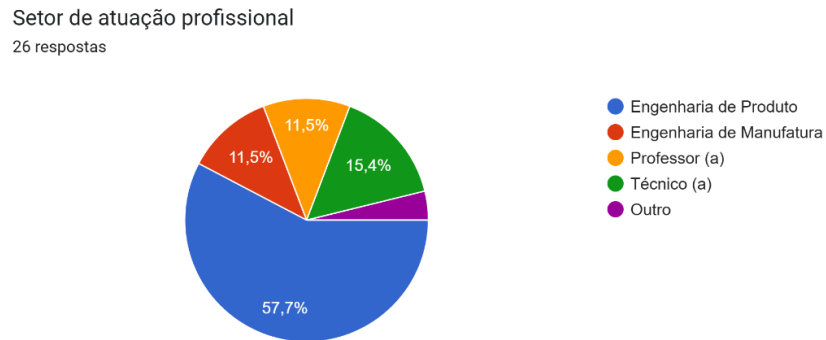
Conforme Pahl et al (2005), o projeto informacional representa a primeira etapa do processo de desenvolvimento de produtos, no qual serve para identificar as necessidades dos clientes, os requisitos técnicos e as restrições do produto. É uma fase crucial para que o produto consiga atender as expectativas do mercado e também de desempenho assim estabelecidas.

Nessa etapa é estabelecido critérios de desempenho, usabilidade, viabilidade econômica e técnica, permitindo que a equipe de desenvolvimento tome as decisões embasadas e alinhadas conforme as expectativas dos clientes. Um projeto informacional bem estruturado irá reduzir trabalho, irá acelerar o desenvolvimento do projeto e aumentará a assertividade das soluções propostas (BAXTER, 2000).

Com o intuito de buscar informações sobre produtos semelhantes no mercado, e também de entender o grau de importância de alguns requisitos de clientes, foi realizado uma pesquisa com profissionais dos setores de engenharia do produto e Engenharia de manufatura, da empresa de Implementos Agrícolas Vence Tudo, os quais possuem Técnicos e Engenheiros. Para complementar na pesquisa, o formulário também foi respondido com professores da área.

Essa pesquisa foi de suma importância para compreender as exigências necessárias para o desenvolvimento de um novo equipamento, e os requisitos que esse novo equipamento necessita para efetuar um bom funcionamento. Para essa pesquisa foram entrevistados 26 profissionais da área, sendo grande maioria profissionais que atuam diretamente com o desenvolvimento de novos produtos. Conforme a Figura 28, podemos analisar o setor de atuação dos respondentes da pesquisa para assim quantificar.

Figura 28 - Setor de atuação dos entrevistados



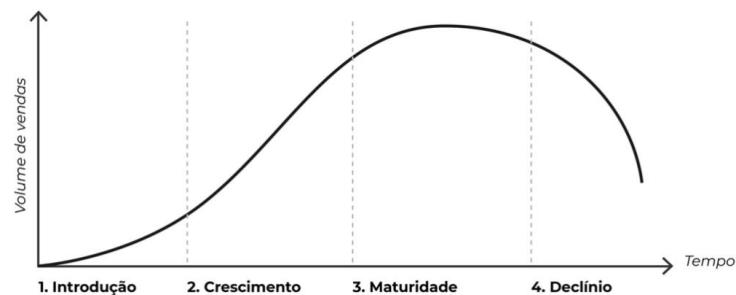
Fonte: O autor (2025).

3.1.1 Ciclo de vida do produto

O ciclo de vida do produto descreve que os produtos passam por diversas fases no mercado: introdução, crescimento, maturidade e declínio. Cada uma dessas fases apresenta diversos desafios distintos, no qual exige de as empresas adotarem estratégias de marketing, produção e gestão diferenciadas para cada fase, maximizando a lucratividade e prolongando a vida útil do produto (KOTLER E KELLER, 2012).

Segundo Kotler e Keller (2012), durante a introdução, os custos são elevados e as vendas ainda estão limitadas; no crescimento, há um aumento na comercialização do produto, mas também na concorrência; na maturidade, o mercado atinge a saturação e é necessário que as empresas façam estratégias diferenciando o produto; por fim, no declínio, as vendas diminuem devido as mudanças de interesses dos consumidores ou pelos avanços tecnológicos. A Figura 29 representa o ciclo de vida do produto.

Figura 29 - Gráfico do ciclo de vida do produto



Fonte: Evolve (2024).

No apêndice I está disponível uma tabela no qual descreve as etapas do ciclo de vida do produto, seguindo dos recursos disponíveis para elaboração do projeto, até o descarte correto do produto.

3.1.2 Requisitos do cliente

A análise dos requisitos do cliente são fundamentais para garantir que o produto consiga atender às necessidades que o mercado exige. Alguns métodos como as entrevistas, observação e análise da concorrência são amplamente usados com o intuito de obter informações precisas, no qual posteriormente serão convertidas em requisitos técnicos e diretrizes para o projeto (ULRICH E EPPINGER, 2012).

Conforme citado anteriormente e vindo de encontro com a informação acima, foi realizado uma pesquisa com o objetivo de obter dados para realizar os levantamentos dos requisitos do cliente. A Figura 30 demonstra o questionário disponibilizado, de forma resumida, respondido por um profissional da equipe de Engenharia do produto da empresa de implementos agrícola Vence Tudo.

Figura 30 - Pesquisa realizada

Pesquisa sobre requisitos do cliente sobre o dispositivo de medição de torque acoplado em máquinas que utilizam transmissão mecânica por eixo cardan

Nome: Lucas Simon
 Graduação: Bacharelado e Mestrado
 Profissão: Engenheiro

<i>Requisitos do cliente</i>	<i>Grau de importância</i>				
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
Valor de aquisição			X		
Precisão dos resultados*			X		
Mão de obra				X	
Proteção contra Poeira e Umidade					X
Robustez				X	
Durabilidade da bateria**		X			
Ser compacto			X		
Ser leve			X		

Caso haja algum requisito importante não citado, favor relatar juntamente com o grau de importância no último campo do questionário.

Para responder o questionário, antes se faz necessário ler o documento enviado em anexo com todas as informações pertinentes ao projeto, onde é explicado o objetivo e a metodologia, além de imagens com o intuito de esclarecer melhor todos os requisitos.

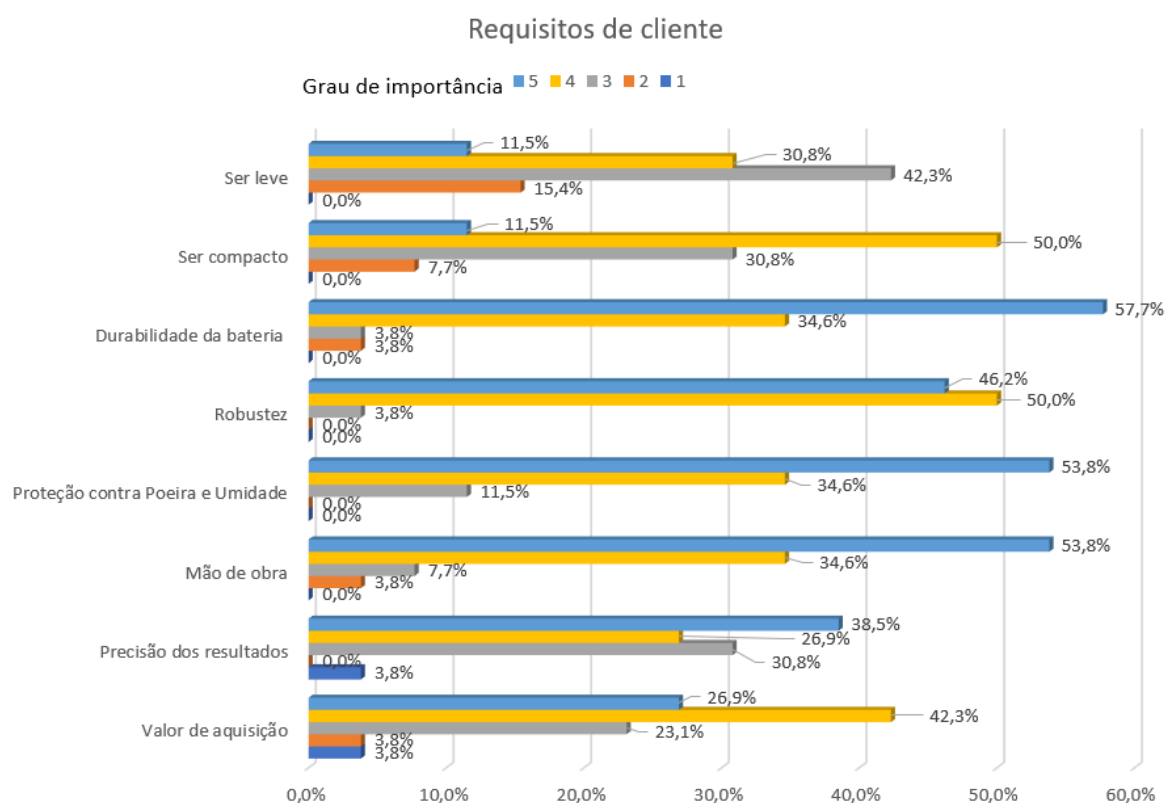
* Sendo que: 1 = $\pm 5\%$ / 3 = $\pm 2,5\%$ / 5 = $\pm 1\%$

** Tendo em vista que pode duraria durar horas, dias ou semanas.

Fonte: Autor (2025)

Com todas as respostas obtidas pelos participantes da pesquisa, foi possível mensurar graficamente a importância relativa de cada um dos requisitos, onde podemos verificar que as respostas coincidiram com a proposta inicial do trabalho.

Figura 31 - Resultados da pesquisa sobre requisitos do cliente



Fonte: Autor (2025).

Conforme representado na Figura 31, podemos analisar que a maioria dos resultados obtidos pela pesquisa teve grau de importância variando entre 4 e 5, com grande diferença comparado aos demais.

Os dados obtidos pela pesquisa são fundamentais, pois assim será possível analisar as principais necessidades que o mercado exige, juntamente com seu grau de importância, tornando um produto mais assertivo e compatível com as exigências impostas pelos clientes.

3.1.3 Requisitos de projeto

Utilizando a pesquisa anterior (requisitos de cliente), no qual obteve-se dados de entrada para o projeto, foi possível estabelecer os requisitos de projeto, conforme o diagrama da Figura 32. Além disso, foi também realizado um estudo em produtos similares, afim de obter as soluções disponíveis.

Figura 32 - Requisitos de cliente x Requisitos de projeto



Fonte: Autor (2025).

Os clientes podem vir expressar suas necessidades de maneiras diferentes, o que torna fundamental que os projetistas e a equipe de marketing consigam entender essas expectativas para requisitos de projeto claros e objetivos. A análise dessas necessidades permite que os produtos tenham um valor real e sejam competitivos no mercado (KOTLER E KELLER, 2012).

Após esse ponto, foi elaborado a casa da qualidade no qual está disponível no apêndice II deste documento. A real intenção da QFD (Desdobramento da Função Qualidade) é gerar o mínimo de alterações no projeto, reduzindo o tempo de desenvolvimento do produto e garantindo assim a qualidade do produto conforme o desejo dos clientes (SLACK, 2009).

Após a construção da matriz QFD, foi possível quantificar o atributo importância relativa dos requisitos e atributos do projeto, hierarquizando a importância de cada item. O quadro abaixo demonstra as metas que o projeto visa atender, juntamente com as suas respectivas formas de avaliação.

Tabela 1 – Requisitos de projeto

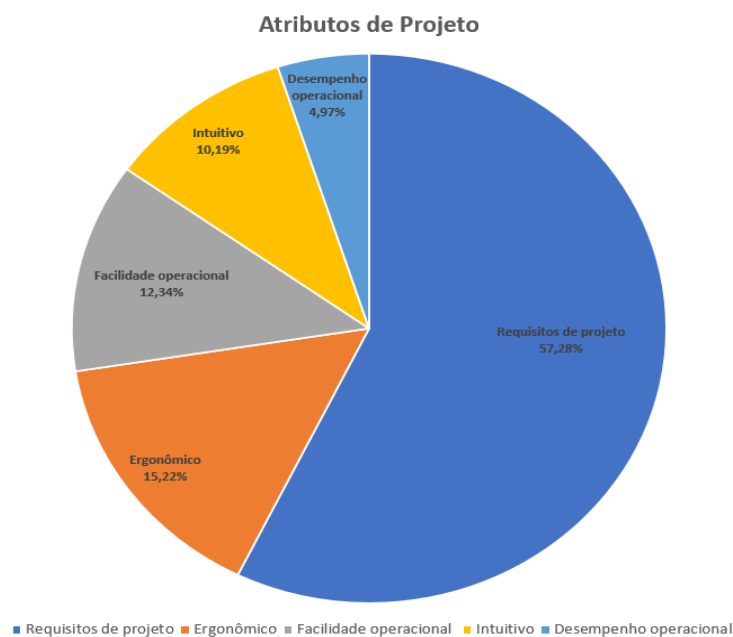
CLASSIFICAÇÃO	IMPORTÂNCIA RELATIVA	DESCRIÇÃO DO REQUISITO	MODO DE VERIFICAÇÃO	UNIDADE DE MEDIDA	POSSÍVEIS RISCOS
1° Requisito	15,84%	Precisão	Análise estatística dos resultados, teste em campo, comparação com resultados conhecidos	% repetibilidade, Nm.	Medições imprecisas, perda da confiança técnica do produto.
2° Requisito	9,0%	Resistência mecânica	Inspeções após testes em capo e ciclos de uso	Força máxima (Nm) e Ciclos	Falha total do dispositivo, aumento de solicitações de garantia do produto
3° Requisito	8,10%	Isolamento interno	Inspeção após testes em condições de poeira e umidade	Classe IP 65	Falhas do dispositivo devido a poeira e umidade, risco de curto-circuito
4° Requisito	8,10%	Resistência química	Avaliação visual e de operação após testes a campo.	Escala avaliativa (pontuação de 1 a 5)	Degradação precoce, falha estrutural dos materiais.

5° Requisito	7,48%	Valor de venda	Pesquisa de mercado, avaliação de aceitação no lançamento	Valor monetário (R\$)	Perda de mercado, falta de competitividade.
6° Requisito	5,63%	Valor de manutenção	Simulação de custo de reposição de componentes e manutenção	Custo da manutenção por ano (R\$)	Alto custo de manutenção, Insatisfação de clientes
7° Requisito	3,13%	Valor de Instalação	Simulação de tempo e custo de instalação	Custo de manutenção hora (R\$/h)	Alto custo da instalação, insatisfação precoce de clientes

Fonte: Autor (2025).

Os atributos do consumidor definidos anteriormente na matriz QFD, são determinados como requisitos não quantitativos, portanto não se enquadram no quadro de especificações do projeto. Na Figura 33 demonstra os atributos de projeto:

Figura 33 - Atributos de projeto



Fonte: Autor (2025).

Ainda na Figura 33, demonstra que o atributo mais importante para o consumidor é a ergonomia, pois além de facilitar no processo de logística do produto, também permite que no momento de instalação e de futuras manutenções seja de fácil operação. O segundo atributo mais importante é a facilidade operacional, demonstrando novamente, como citado no atributo anterior, que o consumidor opta por produtos que sejam de fácil operação, compactos e de fácil manuseio.

3.2 PROJETO CONCEITUAL

Segundo Pahl et al. (2005), o projeto conceitual é uma fase decisiva no desenvolvimento de novos produtos, onde as ideias geradas a partir das necessidades dos clientes serão transformadas em propostas concretas de solução. Ainda segundo os autores, é nessa etapa que é elaborado as soluções de princípios capazes de satisfazer as exigências do projeto, realizando assim a transição entre as necessidades e requisitos para as formas físicas e funcionais.

De acordo com Baxter (2000), o autor destaca que nessa fase é importante equilibrar a inovação com aspectos de viabilidade técnica, econômica e de fabricação, pois todas as decisões tomadas na fase conceitual impactarão diretamente no sucesso do produto.

Rozenfeld et al. (2006) também ressaltam que o projeto conceitual atua como uma ponte entre a definição das necessidades e o correto detalhamento das soluções, sendo indispensável para obtenção de um produto viável, inovador e competitivo no mercado.

O presente capítulo busca o desenvolvimento de concepções para o produto, a partir da aplicação de algumas ferramentas como: Escopo do projeto, desdobramento da função global, matriz morfológica e a síntese das alternativas. Todas as ferramentas utilizadas serão fundamentadas com base nas informações e requisitos obtidos na fase de projeto informacional, garantindo assim a continuidade da lógica do processo de desenvolvimento.

Ao final do capítulo, busca-se a clara definição de uma concepção que esteja alinhada com as necessidades e expectativas dos clientes, para assim prosseguirmos com uma base sólida para as fases subsequentes do projeto.

3.2.1 Escopo do projeto

O presente trabalho visa o desenvolvimento de um dispositivo eletromecânico portátil, destinado à mensuração do torque nominal de equipamentos que utilizem transmissão por eixo rotativo, com ênfase em equipamentos agrícolas. Para o desenvolvimento do sistema eletrônico, será utilizado diversos componentes primários, como extensômetros, módulos e microcontroladores, além de diversos outros componentes secundários. Para o desenvolvimento do sistema mecânico, será projeto uma estrutura soldada, que servirá como base de acomodação de todos os componentes eletrônicos. Além disso, para garantir resultados precisos, será realizado a calibração do dispositivo.

Espera-se que com a aquisição de dados reais de torque, seja possível fornecer informações precisas e relevantes que auxiliam no entendimento dos esforços mecânicos aplicados em um determinado produto, possibilitando um dimensionamento mais assertivo do mesmo, aprimoramento da confiabilidade, aumento da eficiência e uma melhoria contínua na qualidade dos produtos desenvolvidos.

A construção do dispositivo será de acordo com as concepções obtidas no levantamento dos requisitos, além do desenvolvimento do projeto informacional e do projeto conceitual. A validação do dispositivo será realizada em uma plataforma de corte de milho, permitindo assim a análise do desempenho em diferentes condições de operação, variando o tipo de solo, variedade do milho, umidade, região, entre outros.

Estão fora do escopo deste projeto o desenvolvimento de plataformas de telemetria avançadas e outras medições, como vibração, temperatura e velocidade angular. Este trabalho está focado no desenvolvimento e viabilidade técnica e de fabricação na solução proposta, estabelecendo uma base sólida para futuras melhorias e expansões do sistema.

3.2.2 Estrutura funcional

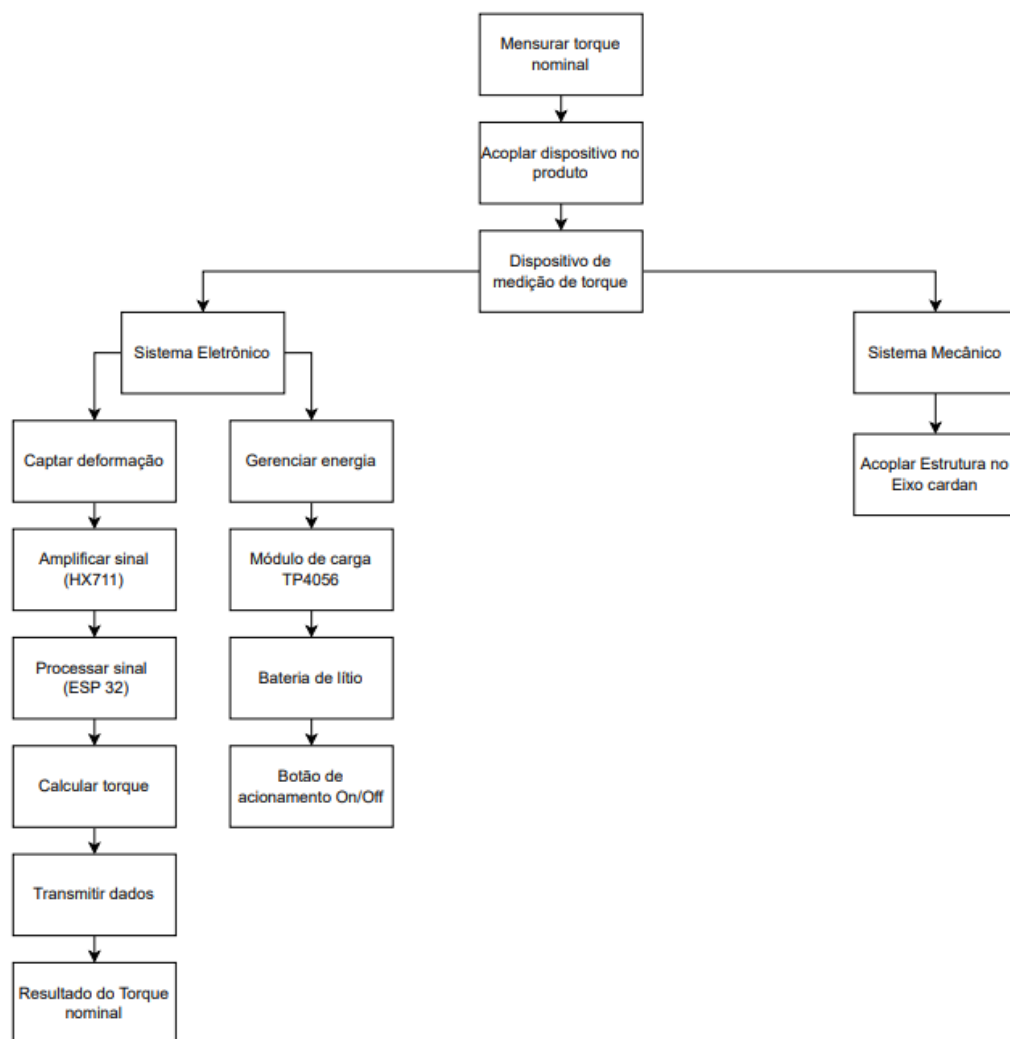
Ao analisar as etapas anteriores, verificou-se que o escopo do problema consiste em mensurar o torque nominal de equipamentos que utilizam transmissão por eixo rotativo, para assim analisar dados obtidos, onde serão utilizados para aperfeiçoamento de produtos e projetos.

3.2.3 Desdobramento estrutural do projeto

A função global do projeto (mensurar torque nominal), orienta e define as subfunções necessárias para que seja alcançado o objetivo proposto, sendo a ponto inicial para o desdobramento das funções parciais que compõem o sistema. (PAHL, 2005).

O desdobramento estrutural do projeto (mensurar o torque) é realizado utilizando o diagrama de blocos, como podemos analisar na Figura 34.

Figura 34 - Desdobramento estrutural



Fonte: Autor (2025).

3.2.4 Matriz morfológica

Segundo Pahl et al. (2005), a matriz morfológica é uma ferramenta que auxilia na decomposição de funções e na geração de alternativas para o projeto. Conforme apontam Kotler e Keller (2012), seu uso permite estruturar o processo de desenvolvimento de novos produtos, alinhando as soluções com as necessidades dos usuários. Além disso, auxilia também em escolhas mais eficientes em termos de produção e operação.

De acordo com Pahl et al. (2005), a matriz morfológica deve contemplar apenas os componentes ou função que sejam principais, priorizando elementos que impactam diretamente no funcionamento do sistema, a solução técnica ou a diferenciação do projeto. Os itens básicos ou apenas de suporte, como parafusos, fios e conectores, não precisam ser representados, a menos que tenham algum papel crítico no projeto.

De forma semelhante, Ulrich e Eppinger (2012), ressaltam que a seleção deve focar em decisões de projeto que influenciam diretamente em funções técnicas, evitando assim sobrecarregar a análise com detalhes que não irão alterar o conceito central do projeto.

Após a realização do desdobramento da função global, foi possível realizar a matriz morfológica do projeto. Conforme visto acima, tem por finalidade listar as principais opções de peças e componentes disponíveis no mercado para cada projeto.

Nesta fase é extremamente importante para a continuidade do projeto, pois é a partir da mesma que teremos a concepção do produto, avaliando qual opção se adequa melhor a necessidade dos clientes.

Esse tópico constituirá em três etapas, a primeira contendo o desenvolvimento da matriz morfológica do sistema eletrônico, e a segunda etapa, do sistema mecânico e por fim, do dispositivo de calibração, no qual foi necessário para garantir resultados mais precisos.

Por fim, será realizado as concepções de cada um, determinando assim mais componentes serão utilizados no projeto, juntamente com as suas respectivas vantagens e desvantagens.

Tabela 2 - Matriz morfológica do sistema elétrico

Matriz morfológica do Sistema Eletrônico						
		1	2	3	4	5
Medição	A Sensor de Deformação	Extensômetro de resistência	Extensômetro óptico	Extensômetro piezoresistivo	Extensômetro capacitivo	Extensômetro MEMS
	B Amplificador e Conversor	ADS1232	NAU7802	MAX11254	HX711	INA125P
Processamento	C Microcontrolador	ESP32	Arduino Uno	STM32	Beagle Bone	Raspberry Pi Pico
Comunicação	D Interface de Carga/Dados	Com cabo	Sem cabo	Indução <i>Bluetooth</i>		
	E Indicador de Bateria	Módulo de LED nível de carga	Display com indicação gráfica	LEDs individuais de status	Módulo voltímetro digital	Programação via <i>Bluetooth</i>
Alimentação	F Gerenciamento de Carga	TP4056	Módulo carregador TP5000	TP5100		
	G Fonte de Energia	Bateria Li-Po plana	Pack 2x 18650 em série - 7.4v	Bateria Li-ion 18650 3.7v	Bateria CR 2032	
Diversos	H Botão de Acionamento	Botão push normal	Interruptor com vedação			
	I Fixação dos componentes	Resina Epóxi	Silicone eletrônico	Parafusos com espessadores	Suportes impressos em 3D	
	J Ligação eletrônica	Soldagem em placa de circuito	Cabos com conectores	Conectores magnéticos		

Fonte: Autor (2025).

Tabela 3 - Matriz morfológica do sistema mecânico

Matriz morfológica do Sistema Mecânico						
		1	2	3	4	5
Estrutural	A Prover estrutura de acoplamento	Aço carbono	Aço Inoxidável	Ferro Fundido	Ligas Especiais	Alumínio
	B Prover estrutura de proteção dos componentes internos	Aço carbono	Polycarbonato	Polietileno de alta densidade	Plástico ABS	Aço Inoxidável
	C Prover união estrutural	Encaixe por pressão	Parafuso de fixação	Solda		
Acabamento	D Prover tratamento superficial	Cromagem	Zincagem	Pintura Industrial a Pó	Oxidação negra	

Fonte: Autor (2025).

Tabela 4 - Matriz morfológica do dispositivo de calibração

Matriz morfológica do Sistema Mecânico						
		1	2	3	4	5
Estrutural	A – Prover estrutura	Aço carbono	Aço Inoxidável	Ferro Fundido	Ligas Especiais	Alumínio
	B Prover união estrutural	Solda	Parafuso de fixação	Encaixe por pressão		
	C Prover união de montagem	Rebite	Parafuso de fixação	Encaixe por pressão	Fixação por abraçadeiras	

Fonte: Autor (2025).

As conclusões obtidas após o desenvolvimento das matrizes morfológicas estão disponíveis no próximo capítulo.

3.2.5 Avaliação das concepções

De acordo com Ulrich e Eppinger (2012), a avaliação das concepções após o processo de desenvolvimento da matriz morfológica é uma etapa fundamental, pois permite que as ideias geradas anteriormente sejam analisadas com base em critérios definidos, como custo, confiabilidade, fabricação e implementação. Através das análises, é possível identificar qual alternativa oferece um melhor equilíbrio entre viabilidade técnica e valor para usuário, promovendo assim decisões conscientes.

3.2.5.1 Concepção do Sistema Eletrônico

Para esse tópico foram considerados os requisitos de clientes e requisitos de projeto para a concepção do sistema eletrônico, tendo em vista alguns critérios, como a confiabilidade, compatibilidade e integração simplificada entre os componentes, além do consumo energético reduzido.

Na tabela 5, citamos as vantagens e desvantagens de cada um dos itens escolhidos, inicialmente do sistema eletrônico, justificando assim o motivo de cada escolha, sempre buscando por soluções que atendessem a construção de um sistema confiável, compacto e de fácil integração, que suportassem todas as características do ambiente agrícola.

Tabela 5 – Concepção do sistema eletrônico

Concepção do produto			
Classe	Escolha	Vantagem	Desvantagem
Sensor de Deformação	Extensômetro de resistência	Alta precisão na medição de deformações mecânicas	sensibilidade a interferências externas (Vibrações, temperatura)
Amplificador e Conversor	HX711	integração de amplificador e conversor analógico-digital no mesmo módulo	sensível a ruídos de alimentação e interferências eletromagnéticas
Microcontrolador	ESP32	Conectividade Wi-Fi e <i>Bluetooth</i> ; Alto processamento; baixo custo	Consumo de energia relativamente alto

Interface de Carga/Dados	Cabo para carregamento e <i>Bluetooth</i> para dados	Comunicação sem fio e dados em tempo real; carregamento mais eficiente	Interferência e limitação de alcance
Indicador de Bateria	Display com indicação gráfica	Exibição de forma clara e em tempo real	Aumento do consumo de energia
Gerenciamento de Carga	TP4056	Integra controle de carga e proteção contra sobrecarga	Baixa corrente de saída (1A)
Fonte de Energia	Bateria Li-ion 18650 3.7v	Alta densidade de energia em um formato compacto	Sensível a sobrecargas
Botão de Acionamento	Interruptor com vedação	Maior durabilidade e vedação	Sensível a interferências eletromagnéticas
Fixação dos componentes	Resina Epóxi e parafusos	Proteção total contra poeira e umidade	Dificuldade para manutenção
Ligação eletrônica	Soldagem em placa de circuito; Cabos com conectores	Conexões elétricas firmes, minimização dos ruídos elétricos	Montagem fixa, dificultando manutenção

Fonte: Autor (2025).

3.2.5.2 Concepção do Sistema Mecânico

Na tabela 6, serão citados os itens escolhidos para o sistema mecânico, citando suas vantagens e desvantagens dos componentes definidos. A concepção do sistema foi definida levando em consideração a utilização de matérias já disponíveis na empresa, inicialmente sem que haja necessidade de desenvolver novos materiais ou processos complexos.

Além disso, outros critérios como robustez estrutural, facilidade de fabricação e confiabilidade em ambientes extremos também são fatores que foram levados em consideração.

Tabela 6 - Concepção do sistema eletrônico

Concepção do produto			
Classe	Escolha	Vantagem	Desvantagem
A Prover estrutura de acoplamento	Aço carbono	Boa resistência mecânica, Boa soldabilidade; fácil usinagem e baixo custo	Baixa resistência a corrosão, exigindo tratamento superficial
B Prover proteção dos componentes internos	Plástico ABS	Boa resistência mecânica, baixo peso	Baixa resistência ao calor intenso, sensível a UV

C Prover união estrutural	Solda	União forte e contínua; Ótima resistência à transmissão de esforços	União permanente, sem possibilidade de desmontagem
D Prover tratamento superficial	Zincagem	Durabilidade contra a corrosão	Aumento dimensional dos componentes

Fonte: Autor (2025).

3.2.5.3 Concepção do dispositivo de calibração

Por fim, para a concepção do dispositivo de calibração, utilizando como base a respectiva matriz morfológica do dispositivo de calibração, a concepção foi de acordo com os materiais disponíveis na empresa.

Sendo assim, para a estrutura do dispositivo foram escolhidos chapas de aço carbono, pois contém excelentes propriedade de conformação, soldabilidade e resistência mecânica, além de ter um custo relativamente baixo, em comparação a outros materiais disponíveis no mercado.

Para a fixação dos componentes, optou-se pelo processo de solda em estruturas fixas, garantindo uma ótima resistência a esforços. Para a união de montagem dos conjuntos, optou-se da fixação com parafusos, porcas e arruelas de pressão, conforme visto na tabela 7.

Tabela 7 – Concepção do dispositivo de calibração

Concepção do produto			
Classe	Escolha	Vantagem	Desvantagem
A Prover estrutura	Aço carbono	Boa resistência mecânica, Boa soldabilidade; fácil usinagem e baixo custo	Baixa resistência a corrosão, exigindo tratamento superficial
B Prover união estrutural	Solda	União forte e contínua; Ótima resistência à transmissão de esforços	União permanente, sem possibilidade de desmontagem
C Prover união de montagem	Parafuso de fixação	Facilidade de desmontagem e manutenção	Suscetível a vibração e problemas relacionado a apertos da juntas

Fonte: Autor (2025).

3.3 PROJETO PRELIMINAR

Conforme Pahl et al. (2005), a etapa de projeto preliminar sucede a concepção e tem como definição o desenvolvimento de uma solução mais definida, ou seja, é realizado decisões iniciais sobre configuração, forma e materiais. Ulrich e Eppinger (2012), complementam que esse é o momento que deve ocorrer as definições, pois possibilitará o detalhamento do sistema com uma maior segurança e assertividade.

Figura 35 - Esboço do projeto – vista isométrica



Fonte: Autor (2025)

Com base nas concepções escolhidas para o sistema eletrônico, mecânico e do dispositivo de calibração, foram definidos os componentes que devem ser produzidos pela empresa e quais componentes seriam adquiridos. A tabela 8 demonstra os componentes eletrônicos e estruturais utilizados no projeto.

Tabela 8 - Componentes e processo de fabricação

	Categoria	Descrição	Aquisição	Processo
Sistema Eletrônico	Sensor de deformação	Extensômetro de resistência - PA-06-125TA-350-L (estilo espinha de peixe)	Comprado	Montagem
	Amplificador e conversor	HX 711 - 24 bit	Comprado	Montagem
	Microcontrolador	ESP32-WROOM-32,	Comprado	Montagem
	Cabo USB	OTG USB tipo C macho x fêmea	Comprado	Montagem
	Carregador	Verificar modelo de carregador compatível	Comprado	Montagem
	Indicador de bateria	Voltímetro Indicador Carga Bateria Lítio 18650 1s 3,7v	Comprado	Montagem
	Gerenciamento de carga	Tp4056 5v - 1a – 18650	Comprado	Montagem
	Fonte de energia	Bateria Li-ion 18650 – 3,7v	Comprado	Montagem
	Botão de acionamento	Interruptor com vedação	Comprado	Montagem
	Placa de ligação	Placa de fenolite	Comprado	Montagem
	Fixação	Parafusos M5 x 20	Comprado	Montagem
	Fixação	Porca autotravante M5	Comprado	Montagem
	Fixação	Resina Epóxi	Comprado	Montagem
	Fixação	Presilhas	Comprado	Montagem
Cabeamento	Cabos com conectores	Comprado	Montagem	
Sistema Mecânico	Estrutura	Eixo Sextavado 1 1/4 “ x 200	Fabricação interna	Corte; Usinagem; Solda
	Estrutura	Flange Fêmea	Fabricação interna	Corte Laser; Usinagem; Solda
	Estrutura	Flange Macho	Fabricação interna	Corte Laser; Usinagem; Solda
	Case de proteção	Protetor Fêmea	Fabricação interna	Impressão 3D
	Case de proteção	Protetor Macho	Fabricação interna	Impressão 3D
C	Estrutura	Braço de alavanca	Fabricação interna	Corte Laser

Estrutura	Suporte	Fabricação interna	Corte Laser; Dobra; Solda
Estrutura	Suporte interno	Fabricação interna	Corte Laser; Solda
Estrutura	Eixo de fixação dos rolamentos	Fabricação interna	Usinagem; Solda
Estrutura	Reforço Interno	Fabricação interna	Corte Laser; Dobra
Estrutura	Base de fixação	Fabricação interna	Corte Laser; Dobra
Fixação	Parafuso sextavado	Estoque Vence Tudo	Montagem
Fixação	Arruela lisa	Estoque Vence Tudo	Montagem
Fixação	Porca Autotravante	Estoque Vence Tudo	Montagem
Fixação	Rolamento Angular	Estoque Vence Tudo	Montagem

Fonte: Autor (2025).

4 FABRICAÇÃO DO PROTÓTIPO

Conforme Ulrich e Eppinger (2012), o projeto detalhado é a definição final da geometria, materiais, tolerâncias e especificações técnicas. É nessa etapa que se desenvolvem os desenhos técnicos, lista de materiais (BOM) e toda a documentação de apoio.

A documentação referente ao projeto, como os desenhos técnicos de fabricação dos componentes produzidos internamente, os datasheet de todos os componentes eletrônicos, esquemas elétricos e o código de programação do ESP32 estão disponíveis no apêndice final.

4.1 MODELAMENTO E DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA MECÂNICO

Para o dimensionamento e modelagem do sistema mecânico, juntamente com o dispositivo de calibração e das proteções em ABS, foram utilizados o *software* NX, da fabricante *Siemens*, amplamente utilizado em ambientes corporativos. A modelagem tridimensional do conjunto foi realizada nesse *software*, no qual oferece recursos avançados de modelamento 3D e desenhos técnicos 2D. Além disso, foi utilizado o *Teamcenter* como sistema de gerenciamento de arquivos e revisões de engenharia, permitindo que haja rastreabilidade dos dados técnicos do projeto.

4.2 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA MECÂNICO

Este capítulo descreve as etapas práticas de desenvolvimento do sistema de medição de torque, no qual será abordado em três etapas: A fabricação mecânica da estrutura de fixação do sistema; o desenvolvimento do circuito eletrônico, responsável pela captação, amplificação e transmissão dos dados; e a programação do microcontrolador, onde será aplicada as equações e lógicas de processamento.

4.2.1 Fabricação Mecânica

A fabricação mecânica dos componentes que integram a estrutura do sistema de medição de torque foi realizada com o uso de equipamentos disponíveis na empresa Vence Tudo. Entre os itens fabricados, destaca-se a flange soldada, responsável por transmitir todo o

torque do equipamento ao qual será acoplado, além de servir como base de todo o sistema eletrônico.

As definições de materiais utilizados, bem como os respectivos processos de fabricação empregados, foram previamente estabelecidas na fase de projeto preliminar, no âmbito de desenvolvimento conceitual do dispositivo.

4.2.2 Processo de soldagem

A união dos componentes estruturais, bem como dos demais elementos de compõem o sistema de calibração, foi realizada por meio do processo de soldagem MIG/MAG. Este método, amplamente utilizados pela Vence Tudo, é reconhecido como uma das técnicas mais recomendadas para aplicações em ambientes agrícolas, devido a sua eficiência, resistência e compatibilidade com diversos materiais em aço carbono.

Segundo Budynas e Nisbett (2011), é possível determinar o dimensionamento mínimo dos cordões de solda em um projeto com base exclusivamente na espessura do metal base. Conforme a tabela 9, estabelece-se a largura apropriada do corão de solda em função da espessura, assegurando assim a integridade estrutural da união. Essa abordagem permite uma padronização no processo de fabricação, evitando superdimensionamentos desnecessários e garantindo uma distribuição adequada dos esforços nas regiões soldadas.

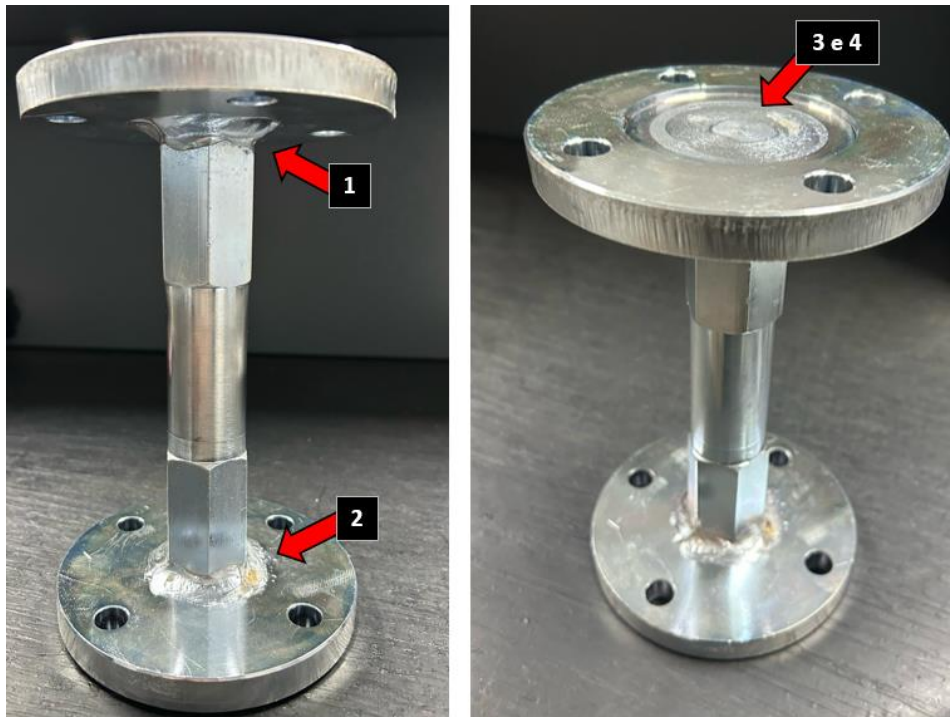
Tabela 9 - Dimensionamento do cordão de solda

<i>Espessura do material (mais espessa, em mm)</i>	<i>Tamanho da solda (mm)</i>
Até 6	3
Acima de 6 até 12	5
Acima de 12 até 20	6
Acima de 20 até 38	8
Acima de 38 até 58	10
Acima de 58 até 150	12
Acima de 150	16

Fonte: Adaptado de Budynas e Nisbett (2011)

Para a execução do processo de soldagem utilizou-se como base a tabela acima. As especificações podem ser vistas nos desenhos técnicos apresentados nos anexos do documento. A Figura 36 demonstra as regiões que foram executadas as soldas, sendo a região 1 e 2 soldas internas em todo o contorno do eixo sextavado; solda 3 e 4 em ambas as extremidades externas do flange, com o acréscimo de acabamento.

Figura 36 - Solda executada no flange estrutural



Fonte: O autor (2025).

4.2.3 Prototipagem Rápida

Segundo Ulrick e Eppinger (2012), a utilização de protótipos ao longo do processo de projeto contribui significativamente para a redução de incertezas, comparação de alternativas e a identificação antecipada de falhas. Dessa forma, a prototipagem rápida torna-se uma ferramenta estratégica para aumentar a confiabilidade do produto final, validando assim aspectos funcionais, dimensionais e de montagem ainda nas fases iniciais do projeto, de forma ágil e de baixo custo.

Neste trabalho, para o desenvolvimento das proteções externas do sistema eletrônico, foi utilizado o plástico ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), amplamente utilizado em processos de prototipagem rápida, especialmente por meio da tecnologia de impressão 3D.

Dentre suas principais vantagens, destaca-se a boa resistência mecânica, elevada tenacidade frente a impactos, estabilidade dimensional sob baixas variações de temperatura, baixo peso e ótimo acabamento e usinabilidade. Conforme GT Max 3D, comparando com outros termoplásticos no mercado, como PLA E PETG, o ABS desempenha vantagens no qual sua escolha é adequada para construção de peças protetivas e estruturais sujeitos a vibração, poeira e frequente manuseio.

A extrusão de material ocorreu através da impressora 3D SNAPMAKER J1, da marca 3D PRINTER, utilizada no setor de prototipagem da empresa Vence Tudo.

Figura 37 - Modelo de impressora 3D

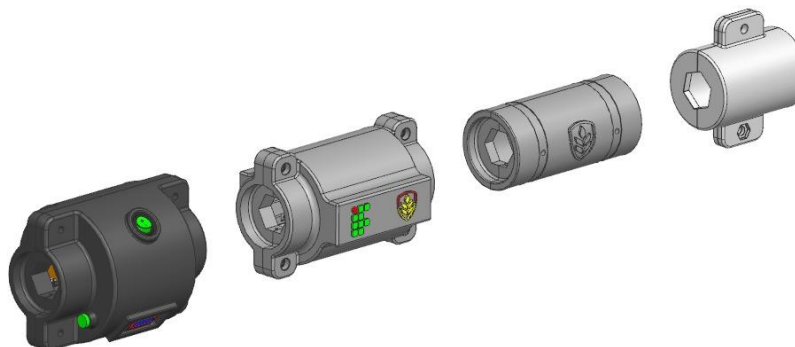


Fonte: SNAPMAKER, (2025).

Esse processo de fabricação foi fundamental para a definição das proteções do dispositivo, uma vez que por meio das peças produzidas via impressão 3D, foi possível alcançar a concepção final dos componentes.

A solução desenvolvida atendeu todos os requisitos de projeto, como proteção externa, baixo peso e dimensões compactas, características essenciais para a proposta. Na Figura 38, apresenta todos os modelos desenvolvidos para as proteções, desde o primeiro protótipo até a concepção final adotada no projeto.

Figura 38 - Versões das Proteções em ABS



Fonte: O autor, (2025).

4.3 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA ELETRÔNICO

Para o dimensionamento do circuito eletrônico, etapa fundamental para garantir um correto funcionamento do sistema de medição do torque, foi analisado os componentes responsáveis por toda a cadeia do circuito, iniciando da aquisição, amplificação, conversão até o processamento do sinal provenientes do extensômetro. Essa análise incluiu desde a escolha do extensômetro até o módulo final, considerando fatores como compatibilidade elétrica, precisão e consumo energético.

A correta seleção dos componentes eletrônicos garante a perfeita integração entre eles, deixando o sistema estável, mantendo a integridade dos dados coletados.

4.3.1 Extensômetro

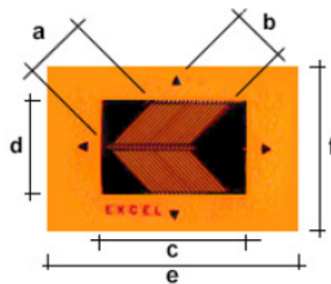
Para o projeto proposto, o extensômetro adotado é do tipo colável de resistência elétrica, modelo duplo tipo espinha de peixe, devido a sua capacidade na detecção de esforços de torção e a facilidade de aplicação em superfícies curvas. Esse modelo, além de oferecer boa sensibilidade, estabilidade e um custo relativamente baixo, se adequa as condições de trabalho no ambiente agrícola.

Os extensômetros coláveis de resistência elétrica funcionam pela variação da resistência que ocorre em um condutor metálico, quando o mesmo for submetido a alguma deformação. Essa variação é proporcional ao esforço aplicado, podendo assim ser convertido mecanicamente em um sinal mensurável.

4.3.1.1 Extensômetro colável de resistência elétrica – modelo espinha de peixe

A configuração do tipo espinha de peixe, utilizada para esse projeto, consiste na aplicação de dois extensômetros colados em direções opostas ou complementares, permitindo a leitura precisa dos esforços de torção, ao mesmo tempo que compensa outros esforços não desejáveis, como flexão ou dilatação térmica.

Figura 39 - Extensômetro duplo espinha de peixe



IDENTIFICAÇÃO				DIMENSÕES						
BASE E METAL	COMPENSAÇÃO DE TEMPERATURA	TAMANHO E FORMA	RESISTÊNCIA ELÉTRICA (OHMS)	OPÇÕES DISPONÍVEIS	ESPAÇO DA GRELHA		ESPAÇO DAS GRELHAS COM SEUS TERMINAIS		ESPAÇO DA BASE	
					comprimento (a)	largura (b)	comprimento (c)	largura (d)	comprimento (e)	largura (f)
PA	06	125 TA	350	B; S; L	3mm	4mm	7mm	4,5mm	11mm	9mm
PA	09	125 TA	350							
PA	13	125 TA	350							

Fonte: Excel, (2025).

A configuração do extensômetro utilizada foi o modelo PA-06-125TA-350-L. A baixo as especificações técnicas do fabricante:

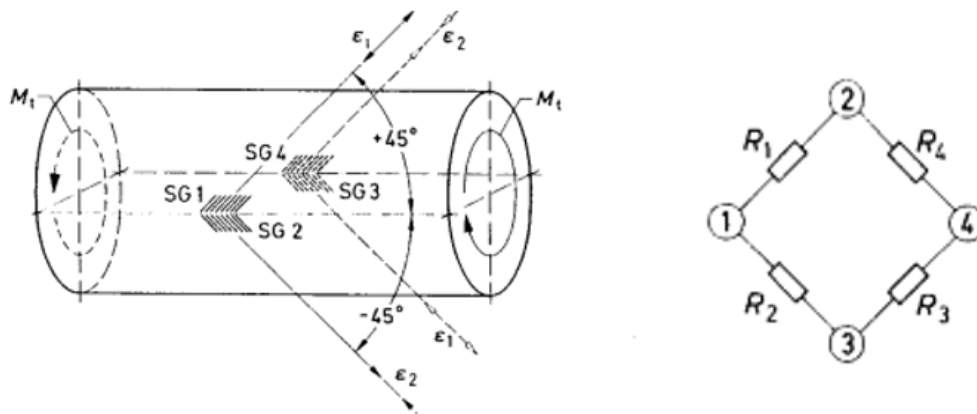
- Material condutor: Constantan ($\pm 60\%$ Cobre e 40% Níquel)
- Resistência: 350Ω
- Tolerância de resistência: $\pm 0,5\%$
- Limite de deformação: $\pm 2\%$
- Temperatura de deformação: 0° até 120°C
- Coeficiente de sensibilidade: 2,1
- Dimensões: 7 mm (comprimento) \times $4,5 \text{ mm}$ (largura)

4.3.1.2 Ligação em ponte completa *Wheatstone*

A ponte *Wheatstone* é utilizado para realizar medições de pequenas variações de resistência, sendo amplamente empregada em diversos sistemas com extensômetros. No sistema de medição de torque, optou-se pela configuração em ponte completa, composta por 2 extensômetros modelo espinha de peixe, ambos a 45° , com o objetivo de maximizar a sensibilidade da deformação e minimizar os efeitos externos.

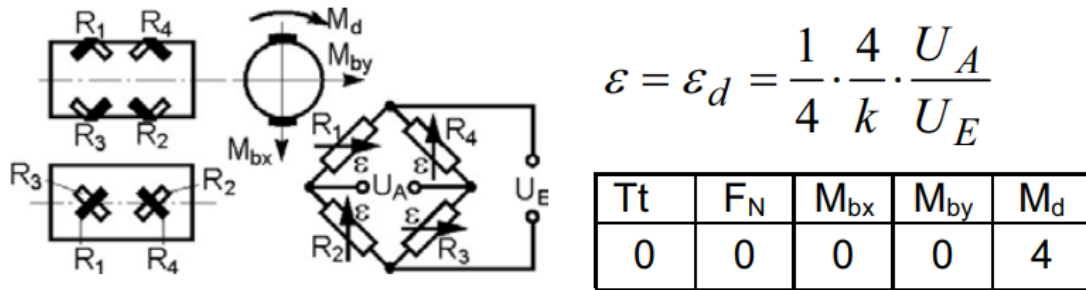
Além disso, com a utilização de ponte completa, permite compensações térmicas automáticas, visto que todas as resistências são afetadas igualmente pela temperatura, anulando no resultado final. Conforme Silva (2015), a ponte completa é ideal para aplicações que exigem elevada precisão, especialmente em ambientes onde ocorre variações térmicas e vibrações

Figura 40 - Modelo de colagem do extensômetro



Fonte: UFSC, (2004).

Contudo, UFSC (2004) relata que outro ponto importante da ponte completa, é a amplificação natural do sinal de saída, visto que todas as resistências sofrem deformações complementares, resultado em uma maior diferença de potencial. A Figura 41 reforça que, dentre as diversas cargas possíveis, apenas o momento de torção gera sinal, validando assim o arranjo em relação a torção pura. O sinal resultante é amplificado pelo módulo HX711, no qual converte a variação resistiva em sinal digital, permitindo assim o processamento pelo microcontrolador ESP32.

Figura 41 - Configuração da ponte *Wheatstone* para torque

Fonte: UFSC, (2025).

Esse arranjo simples, eficiente e de baixo custo está alinhado com os objetivos deste trabalho, que busca um sistema de medição de torque confiável e aplicável em ambientes agrícolas com condições adversas.

4.3.1.3 Tratamento Superficial e Colagem dos Extensômetros

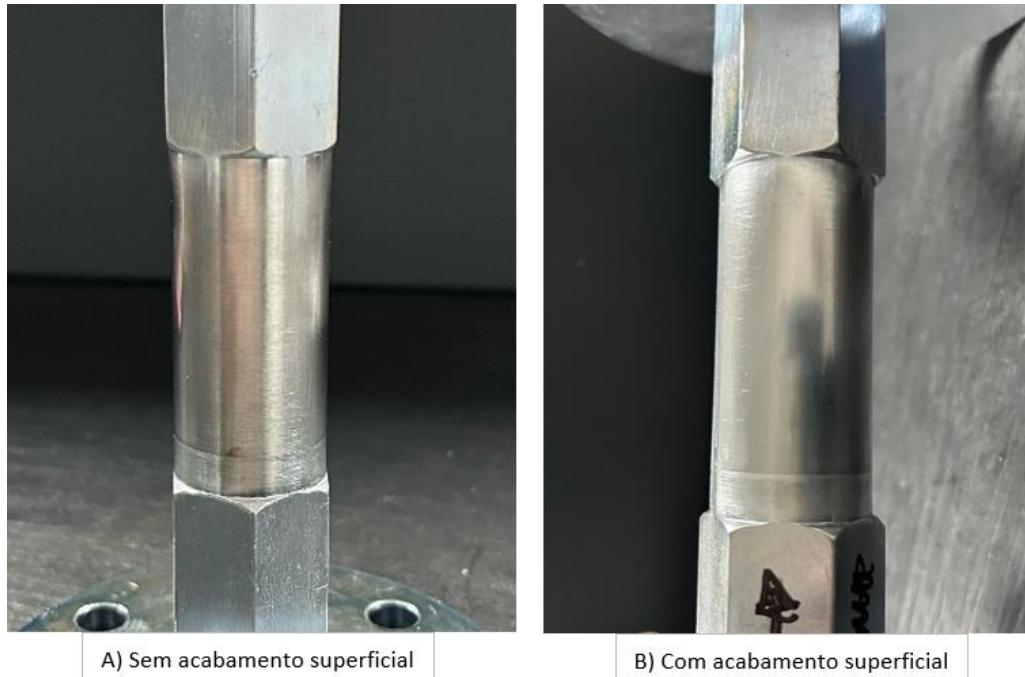
A correta preparação da superfície de colagem dos extensômetros é uma etapa fundamental para garantir a qualidade da medição das deformações. Qualquer imperfeição na área pode comprometer significativamente às respostas elétrica do extensômetro, causando leituras de sinais imprecisas e instáveis. Por esse motivo, com o intuito de diminuir ao máximo esse fato, são necessários alguns cuidados rigorosos no momento de preparação da superfície e de colagem dos extensômetros.

O primeiro passo para garantir a precisão das medições é a realização do acabamento superficial na região de colagem dos extensômetros. Essa etapa tem como objetivo remover qualquer indicio de oxidação, tinta ou rebarba que possam comprometer a aderência ou interferir na resposta elétrica do extensômetro. Para isso, foi realizado um processo de lixamento em três etapas, iniciando-se com uma lixa de granulação 80 (lixa grossa), seguida por uma lixa intermediária de granulação 220 (lixa média), e finalizando com uma lixa de granulação 320 (lixa fina), a fim de uniformizar a superfície.

O lixamento foi realizado em duas direções perpendiculares entre si, formando um ângulo de 45° , criando pequenas ranhuras em direção favorável ao extensômetro, garantindo a melhor remoção de irregularidades e facilitando a adesão da cola na superfície. É importante ressaltar que, ao final do processo, a região deve estar limpa e livre de rebarbas ou resíduos, porém levemente áspera, e não polida, para assim favorecer a correta fixação do extensômetro.

Por fim, foi feita a limpeza na superfície com álcool isopropílico, removendo assim qualquer partícula oleosa ou partícula solta, promovendo assim uma aderência. A Figura 42 demonstra a superfície sem acabamento e com acabamento.

Figura 42 - Superfície de colagem sem acabamento x com acabamento

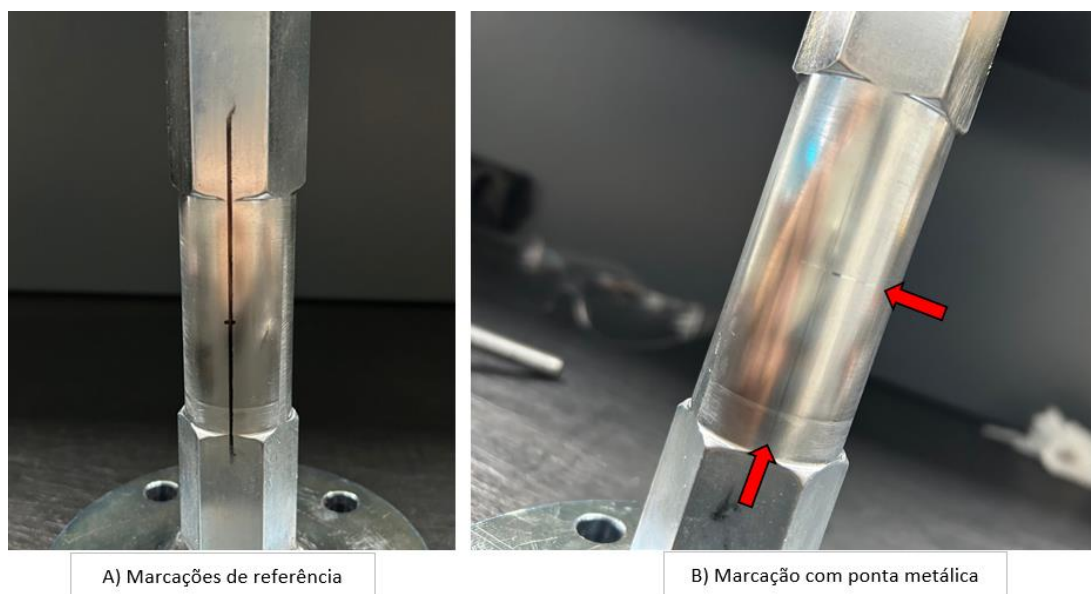


Fonte: O autor, (2025).

O segundo passo é realizar a marcação do posicionamento do extensômetro na área determinada (Figura 43), utilizando uma ponta metálica. Para esse processo, a fim de garantir um melhor posicionamento e alinhamento, foi utilizando equipamentos como régua, paquímetro e esquadros. Para facilitar o posicionamento, utilizou-se da própria geometria do eixo sextavado como referência.

- Realizado a marcação nos planos verticais e horizontais. O extensômetro utilizado apresenta indicações do seu centro em sua base, facilitando assim o posicionamento com as marcações riscadas na superfície.
- A marcação serve somente para guiar o extensômetro na superfície, então teve-se o cuidado de não provocar riscos profundos, podendo vir a interferir nos resultados.

Figura 43 - Marcações de posicionamento do extensômetro



Fonte: O autor, (2025).

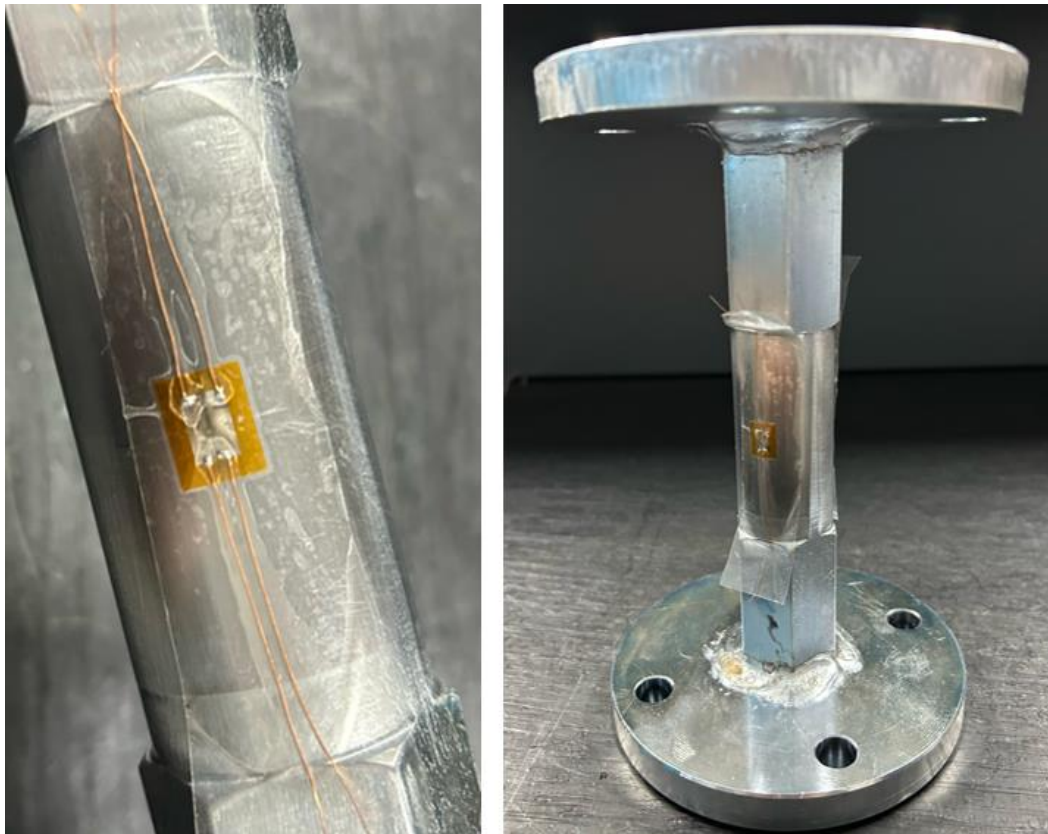
Ao final dessa etapa, é realizado novamente uma limpeza superficial utilizando álcool isopropílico e gaze estéril, aplicada de forma repetida até que a gaze não apresente mais sinais de impurezas. Ressalta-se que a aplicação do extensômetro foi realizada em ambiente controlado, limpo e climatizado, condições que favorecem a adesão e a confiabilidade da medição.

A terceira etapa consiste no posicionamento dos centros dos extensômetros sobre as marcações previamente feitas com a ponta metálica. Para esse procedimento, são utilizadas fitas adesivas fixadas nas extremidades dos extensômetros, as quais auxiliam para posicionamento e alinhamento correto, garantindo assim a manutenção da sua posição durante a manipulação. É fundamental destacar que, até esse processo, o manuseio do extensômetro é realizado somente com as pinças antieletrostáticas e fitas adesivas, evitando qualquer contato direto com os dedos, podendo vir comprometer a integridade da grade.

Com o extensômetro alinhado e fixado, uma das extremidades é cuidadosamente levantada para permitir a aplicação da cola. Para essa etapa, optou-se pela cola cianoacrilato M-bond 200, amplamente utilizada nessas aplicações, devida a sua alta resistência e rápida cura. A cola é espalhada de forma uniforme sobre a superficial metálica e também sobre a face inferior do extensômetro, garantindo cobertura completa e evitando excessos que possam interferir na leitura, como demonstra a Figura 44.

A colagem é finalizada com a aplicação de uma pressão leve e constante com a ponta dos dedos, estimadas entre $0,5 - 3 \text{ kgf/cm}^2$, por cerca de 5 minutos, conforme orientações do fabricante. Após isso, é mantido sob pressão contínua por meio de uma pinça de mola por mais 20 minutos, garantindo assim a cura inicial do adesivo. A cura completa ocorre após aproximadamente 2 horas, sendo assim necessário aguardar esse tempo para prosseguir com as conexões elétricas, assegurando a estabilidade e confiabilidade da colagem.

Figura 44 - Extensômetro após o processo posicionamento e colagem



Fonte: O autor, (2025).

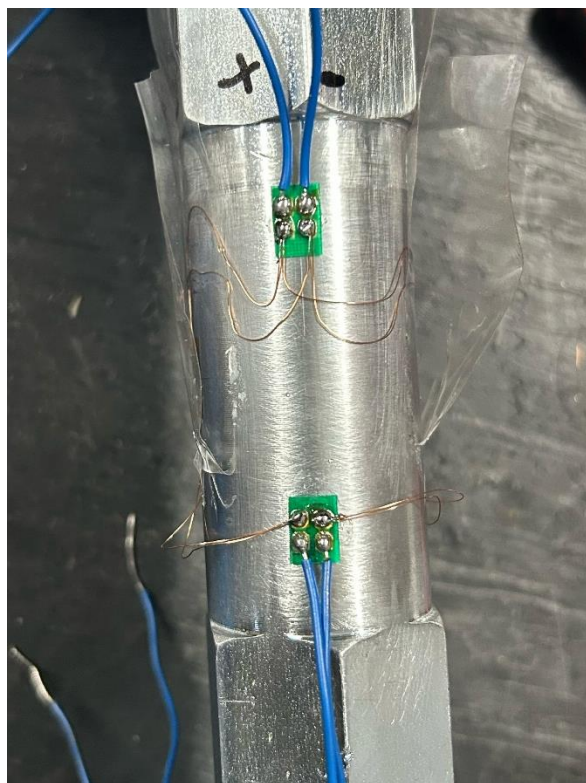
A quarta etapa do processo consiste na fixação das placas de soldagem, realizadas após a cura completa da cola aplicada nos extensômetros. Essas placas são posicionadas entre os sensores, em locais de fácil acesso, possibilitando assim a conexão eficiente dos terminais dos fios condutores provenientes dos extensômetros.

A utilização das placas de solda tem como finalidade evitar a soldagem direta, evitando assim falhas por aquecimento ou movimentação excessivas, visto a alta rotação exigida no conjunto. Com os fios fixados nesses terminais, é possível criar o circuito de interligação para a configuração de ponte completa de *wheatstone*.

Utilizando-se de um ferro de solda, foi realizada a união com liga de estanho, garantindo uma excelente condutividade elétrica e consequentemente uma transmissão eficiente dos sinais oriundos dos extensômetros. Além disso, o baixo ponto de fusão evita danos térmicos aos componentes sensíveis durante o processo de montagem. Por fim, a boa aderência garante conexões firmes e duráveis, proporcionando resistência mecânica a vibrações e impactos leves.

Após o processo de soldagem, os fios são isolados e protegidos com resina epóxi, assegurando resistência a vibrações e umidade durante a operação em campo.

Figura 45 - Placas de soldagem

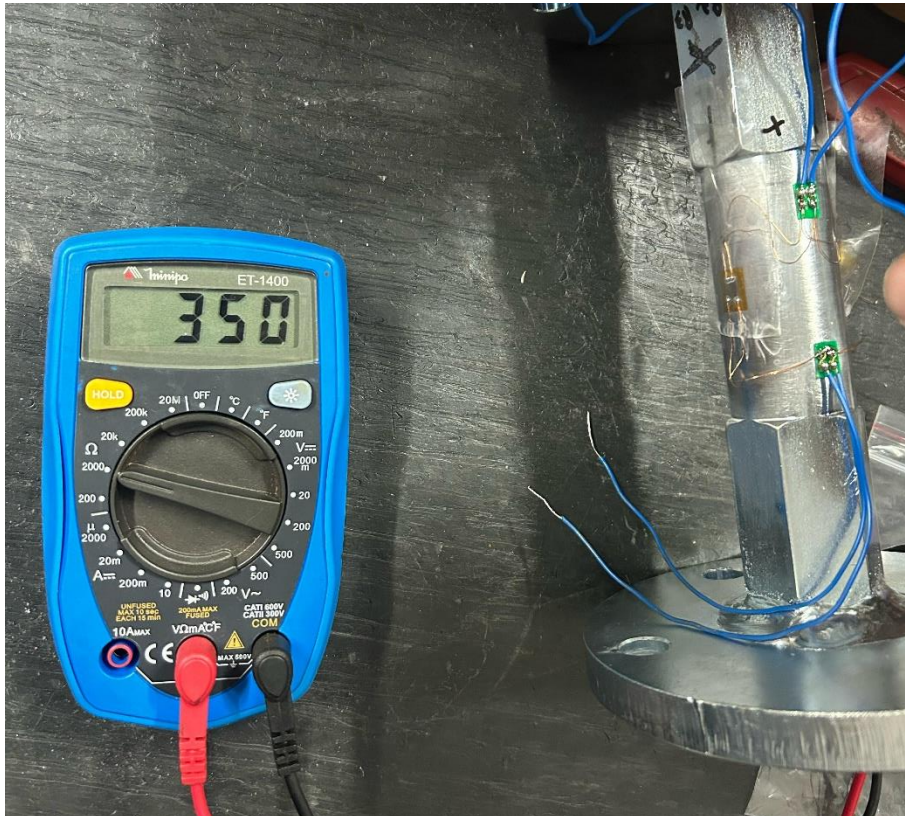


Fonte: O autor, (2025).

Por fim, a última etapa consiste na verificação da resistência elétrica dos extensômetros, procedimento essencial para validar a integridade dos sensores após todos os processos de posicionamento, colagem e soldagem que antecedem. Essa prática consiste em conferir o valor da resistência do extensômetro se encontra dentro da faixa especificada pelo fabricante, o que indica se sofreram algum dano mecânico ou térmico durante os processos. O teste conta com o auxílio de um multímetro, medindo a resistência nos terminais conectados à ponte de *wheatsone*.

A Figura 46 demonstra que, conforme especificado no datasheet do modelo PA-06-125TA-350-L, a resistência nominal manteve-se dentro da faixa esperada. Esses resultados comprovam que ambos os sensores foram devidamente aplicados, sem indícios de problemas na colagem, danos mecânicos ou térmicos.

Figura 46 - Verificação da corrente do Extensômetro



Fonte: O autor, (2025).

4.3.2 HX 711 – AMPLIFICADOR E CONVERSOR

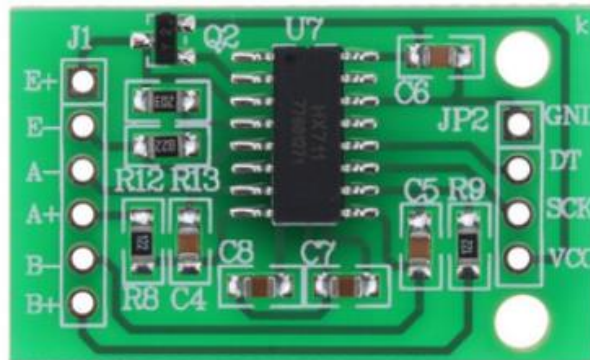
O módulo HX711 é um circuito integrado amplamente utilizado no mercado, em situações que necessitam leituras de sinais oriundas dos extensômetros de ponte resistiva. Nesse contexto, o HX711 desempenha um papel extremamente importante para o sistema, pois garante uma aquisição confiável das variações de resistência elétrica geradas pelos extensômetros. Esse módulo conta com dois blocos funcionais, sendo eles:

- **Amplificador de ganho programável (PGA):** Permite amplificar ganhos de 32x, 64x ou 128x. Para sistemas que utilizam extensômetros de baixa amplitude de sinal, é mais usual utilizar ganhos de 128x.
- **Conversor analógico-digital (ADC):** Conversor de 24 bits de alta resolução, possibilitando a leitura das variações com extrema precisão e alta sensibilidade, mesmo em condições que contém ruídos ou ambientes agressivos.

A comunicação entre o HX711 e o microcontrolador é realizada por meio de uma interface digital de dois fios: DT (*Data*) e SCK (*Clock*). Essa comunicação é eficiente, ocupando poucas portas do microcontrolador e garante leituras estáveis. O módulo opera com tensão de alimentação que varia de 2,7V até 5,5V, sendo assim compatível com os 3,3V do microcontrolador utilizado para o sistema (ESP32). Além disso, consome uma corrente extremamente baixa (aproximadamente 1,5 mA quando em operação e de 60 μ A em *standby*), favorecendo sistemas alimentados com baterias de lítio.

Sendo assim, a alta confiabilidade dos sinais, baixo consumo energético e o custo acessível, torna o HX711 um componente atrativo para o sistema proposto.

Figura 47 - Módulo HX 711



Fonte: Usina Info (2025).

4.3.3 ESP32 - Microcontrolador

O microcontrolador utilizado para o sistema é o ESP32, conforme dados do *datasheet* do fabricante, é altamente integrado e de consumo energético baixo, amplamente utilizado em sistemas que exigem conectividade sem fio e alto desempenho. Para o sistema proposto, o ESP32 desempenha o papel de processar os dados obtidos pelo módulo HX711, aplicar as

equações de programação necessárias e transmitir os resultados em tempo real para outro dispositivo móvel (celular ou *tablet*).

O modelo utilizado é o ESP32-WROOM, no qual contém um processador dual-core Xtensa de 32 bits, que opera com frequências de 80 MHz até 240 MHz. Além disso, o microcontrolador conta com um espaço livre de 520 KB de memória interna, oferecendo espaço suficiente para operar com múltiplas leituras, equações matemáticas e programação diversa.

Outro diferencial do ESP32 é a presença nativa do *Wi-Fi* (802.11 b/g/n para 150 Mbps) e *Bluetooth* 4.2 (BLE e *Classic*), recursos fundamentais para o sistema, no qual permitem enviar os dados diretamente para dispositivos móveis sem que haja necessidade de pontos de cabeamento ou servidores de internet. Além disso, o ESP32 opera com tensão de 3,3V, sendo compatível com os demais componentes eletrônicos do circuito, além de possuir configurações que permitem otimização de bateria, sendo ideal para sistemas que contemplam bateria de lítio recarregáveis.

O microcontrolador (Figura 48) possui diversas portas (GPIO, ADC, PWM, barramentos I²c e SPI), além de ser acessíveis para diversos outros periféricos como interruptores e *timers*, que garante grande flexibilidade de integração com diversos componentes, como sensores, *displays*, botões e módulos. Por fim, o ESP32 é compatível com diversas plataformas, como IDE do Arduino, PlatformIO e MicroPython, facilitando o desenvolvimento de diversas aplicações.

Figura 48 - Microcontrolador ESP32



Fonte: Usina Info (2025).

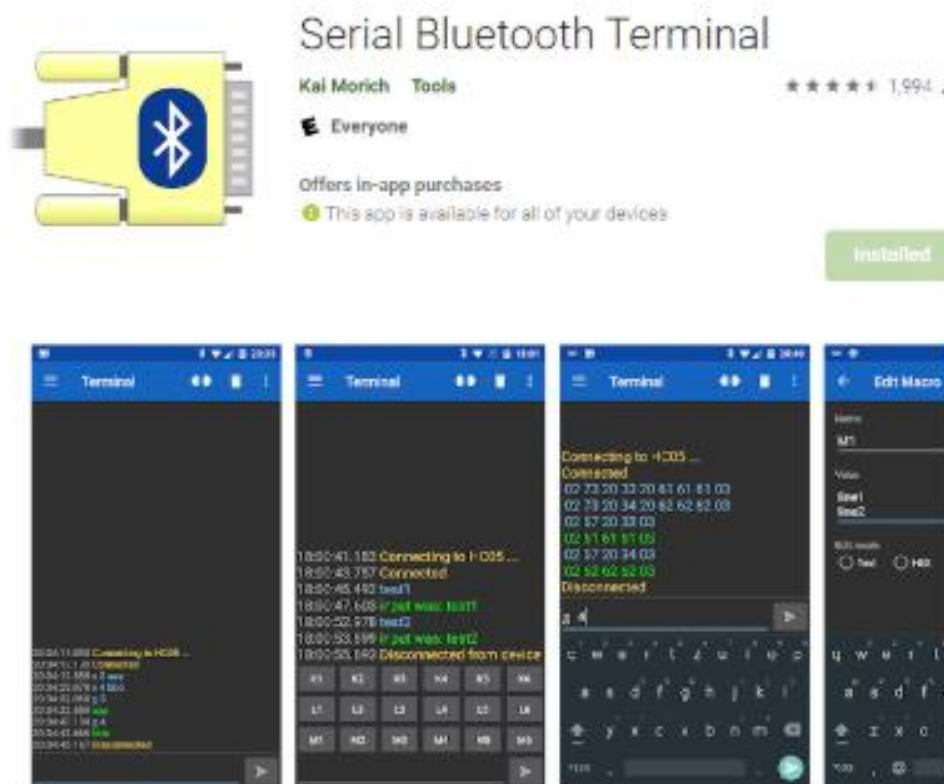
4.3.4 Dispositivo móvel – Interface de exibição

Com o auxílio de um dispositivo móvel, como um celular ou tablet, é possível transformar em interface de exibição em tempo real dos dados processados pelo ESP32. A comunicação ocorre via *Bluetooth* clássico, utilizando um aplicativo denominado “*Serial Bluetooth Terminal*”, disponível gratuitamente para Android. Esse aplicativo permite a leitura dos dados transmitidos pelo ESP32 por meio da porta UART.

Além disso, o aplicativo possibilita também o salvamento dos dados em arquivos de texto (.txt), permitindo assim o uso posterior para construção de gráficos, *dashboards* e análises técnicas. Em termos técnicos, o dispositivo móvel deve possuir compatibilidade com *bluetooth* 2.0 ou superior, e ter um sistema operacional com capacidade mínima de processamento, para garantir a fluidez da leitura em tempo real.

A escolha por essa solução se deve à simplicidade de uso e independência de conexão com a internet ou sistemas externos, permitindo o monitoramento direto no campo, em tempo real, sendo ideal para ajustes e testes rápidos em equipamentos agrícolas.

Figura 49 - Aplicativo *Serial Bluetooth Terminal*



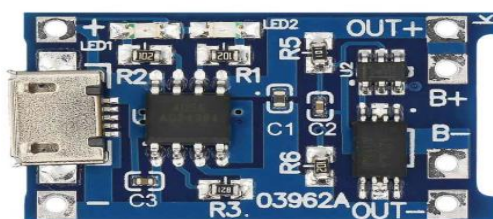
Fonte: O autor, (2025).

4.3.5 TP 4056 – Módulo de carregamento

O módulo TP4056 é um carregador compacto, amplamente utilizado em aplicações em conjunto com baterias de íon de lítio de 3,7V, como a utilizada para o sistema deste projeto. Sua principal função é controlar de forma segura e eficiente o carregamento da bateria que alimenta todo o circuito, além de possibilitar o recarregamento da bateria de forma prática e segura, sem a necessidade de desconectar o circuito. Além disso, é de fácil integração com fontes externas de carregamento,

Esse módulo gerencia a corrente e a tensão de carregamento, fornecendo uma saída de tensão de 4,2V e corrente ajustável de até 1A. Além disso, integra proteção contra sobrecarga, descarga excessiva e curto circuito, garantindo assim uma segurança e maior vida útil da bateria e dos demais componentes.

Figura 50 - Módulo TP4056



Fonte: Usina Info (2025).

4.3.6 Bateria de íon de lítio 3,7 v - 18650

Para fornecer a alimentação de todo o sistema eletrônico embarcado, optou-se pela bateria de íon de lítio 3,7V, devido a sua alta densidade energética, fácil compatibilidade com outros dispositivos, ser compacto e de fornecer corrente de forma estável e contínua.

Em termos técnicos, a bateria apresenta tensão nominal de 3,7 V e tensão de carga de 4,2V, além de uma capacidade de 2200 mAh. Conforme dados do *datasheet* do fabricante, modelo de bateria suporta ciclos de carga e descarga superiores a 500 ciclos, contribuindo com a durabilidade do dispositivo, além de suportar temperaturas de operação na faixa de -20°C até 60°C.

Por fim, o uso da bateria de lítio no sistema contribui diretamente para uma boa autonomia, atendendo a proposta de ser um dispositivo robusto, portátil e prático, sem comprometer o desempenho e a confiabilidade das medições.

Figura 51 - Bateria de lítio



Fonte: Usina Info (2025).

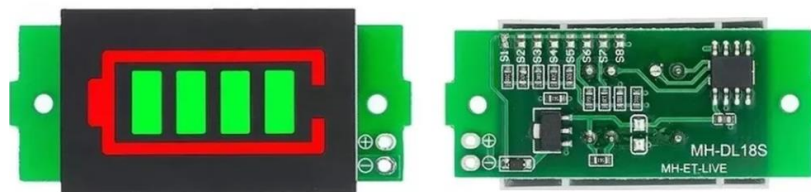
4.3.7 Medidor de bateria com barra gráfica – 1S

Para garantir uma maior praticidade, foi incorporado ao circuito um medidor de bateria com barra gráfica 1S, responsável por indicar visualmente o nível de carga da bateria de íon. Esses componentes apresentam barras de *LED's* que acendem de forma progressiva conforme a tensão da bateria, indicando de forma prática o nível e evitando assim o desligamento inesperado do sistema. Além disso, esse componente é de baixo custo, fácil instalação no circuito e consumo energético relativamente baixo.

Visando minimizar esse consumo energético do sistema, especialmente durante o uso em períodos prolongados no qual o indicador não está sendo utilizado, foi incorporado um interruptor pulsante entre a alimentação da bateria e o módulo, permitindo assim ativar a leitura da carga apenas quando necessário, evitando o consumo energético do componente, aumentando a autonomia do dispositivo.

Tecnicamente, esse modelo é compatível com células 1S, que operam em faixas de tensão entre 3,0V e 4,2V, indicando o percentual de carga conforme acende o *LED* (1 *LED* aceso significa aproximadamente 25% de bateria, 4 *LED's* aceso, aproximadamente 100%). Esse circuito dispensa a necessidade de programação, deixando a programação e o processamento mais simples.

Figura 52 - Medidor de bateria de barra gráfica



Fonte: Usina Info, (2025).

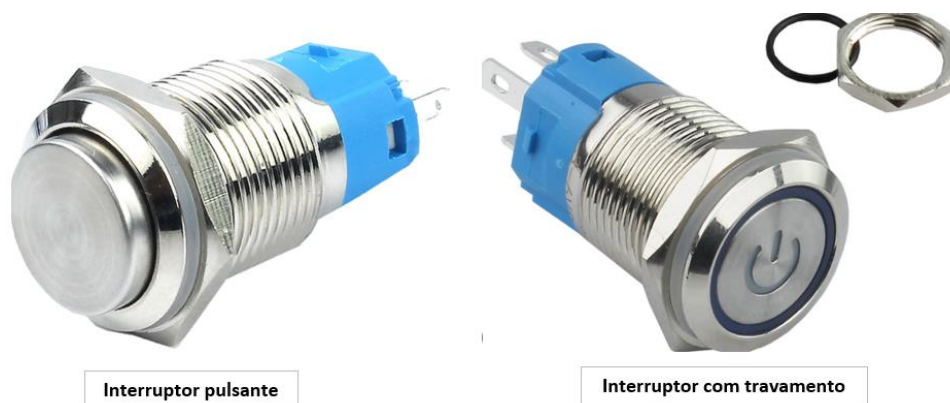
4.3.8 Interruptor ON/OFF

Por fim, para finalizar os componentes utilizados no circuito, foi introduzido dois botões: um botão pulsante para minimizar o consumo quando não necessário, e o botão com trava que será responsável por ligar e desligar o sistema todo. Importante ressaltar que ambos os botões são impermeáveis, impedindo a ação da umidade e poeira.

O botão pulsante é utilizado exclusivamente para acionar um componente de forma temporária, ou seja, o circuito é fechado somente quando o botão tiver pressionado. No caso do sistema proposto, conforme já citado acima, esse botão será responsável por ligar e desligar o indicador de bateria gráfico, reduzindo o consumo energético em situações não necessárias.

O botão com trava será responsável por ligar e desligar o sistema todo. Após pressionado, ele mantém o circuito energizado até que ocorra alguma nova atuação. Sua aplicação se faz necessária para preservar a bateria em situações de transporte ou inatividade.

Figura 53 - Interruptor Pulsante e Interruptor com travamento



Interruptor pulsante

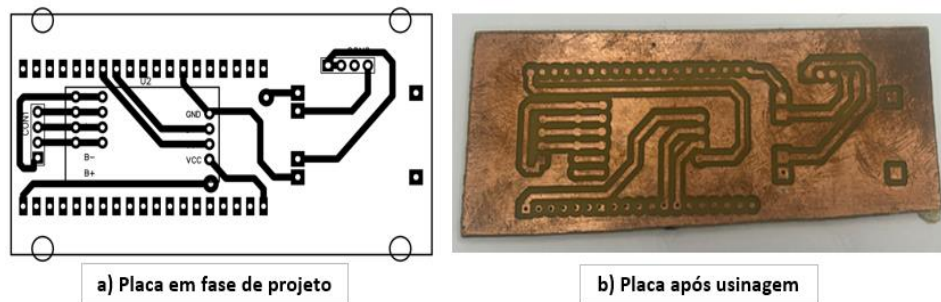
Interruptor com travamento

Fonte: Adaptado de Usina Info, (2025).

4.3.9 Placa de Fenolite

Utilizando placa de fenolite, um dos materiais mais comuns e econômicos para a fabricação de placas de circuito impresso (PCI), buscou-se criar um circuito compacto e organizado, substituindo fios e conexões por trilhas soldadas, com o intuito de diminuir as falhas, interferências e ruídos, aumentando assim a integridade elétrica do sistema. A Figura 54 representa a placa de fenolite em fase de projeto (a) e após usinagem (b).

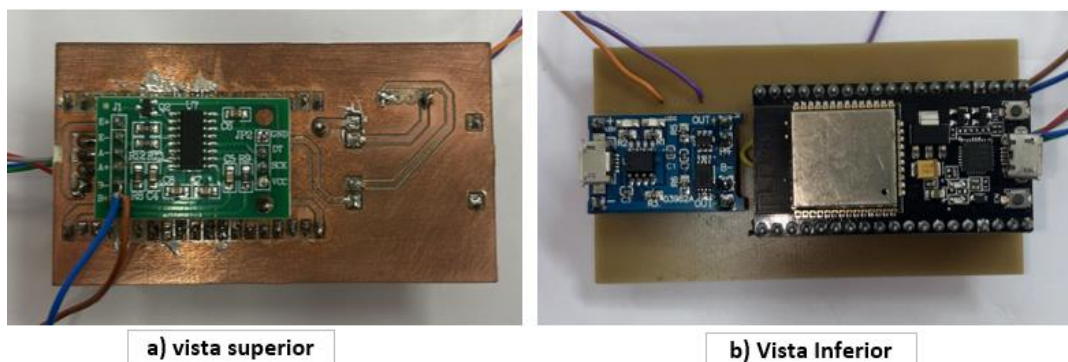
Figura 54 - Placa de fenolite – a) Placa em fase de projeto; b) placa após usinagem



Fonte: O autor, (2025).

Além disso, com a PCI é possível reduzir o espaço físico, aumentar a durabilidade e resistência das ligações contra vibrações e movimentos intensos e replicar em larga escala, pois é um material de fácil usinagem. Utilizando a placa de fenolite, foi possível interligar os componentes HX711, ESP32 E TP4056 na mesma placa.

Figura 55 - Placa de fenolite interligando demais componentes



Fonte: O autor, (2025).

4.3.10 Componentes auxiliares

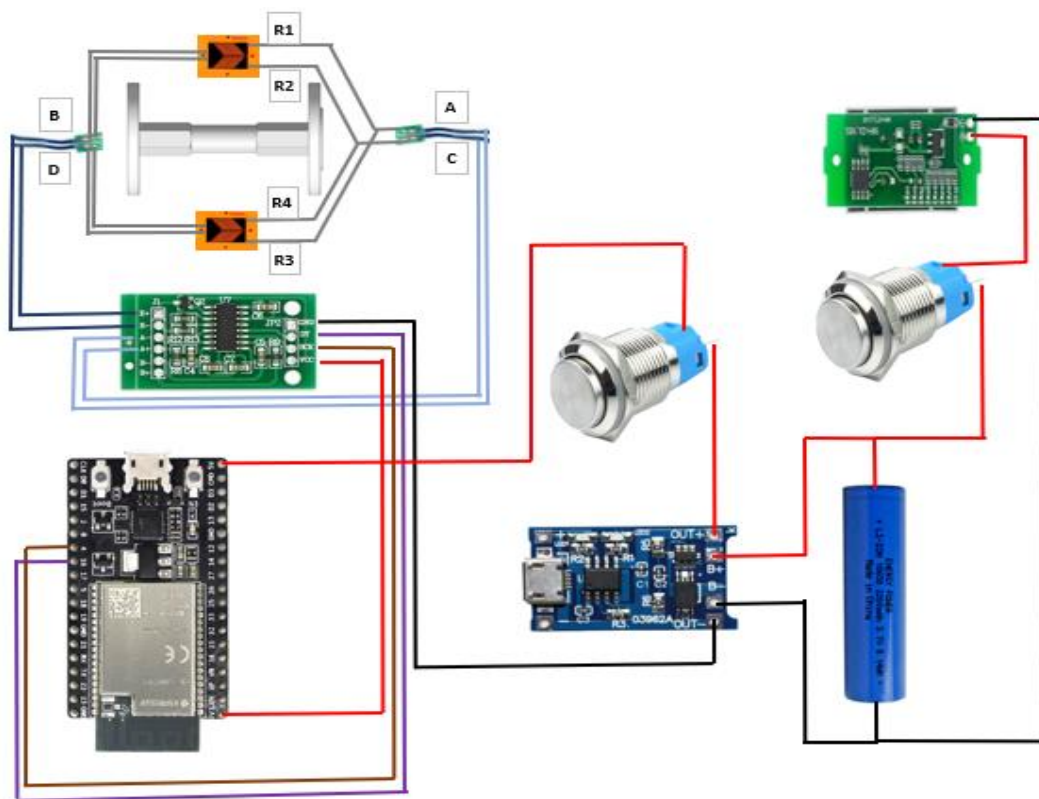
Alguns componentes auxiliares, como fios, cabos, conectores, terminais e isolantes foram utilizados com a intenção de organizar e interligar os componentes eletrônicos. Foram usados alguns fios flexíveis com isolamento eletromagnéticas, conectores modulares para facilitar a montagem e manutenção, além de tubos termo retráteis e fitas isolantes.

Esses componentes, mesmo sendo secundários, são fundamentais para assegurar a robustez, confiabilidade e desempenho do sistema em ambientes agressivos.

4.3.11 Diagrama Elétrico

Para garantir o correto funcionamento e o entendimento de todo o circuito eletrônico desenvolvido, é necessário apresentar o diagrama elétrico, responsável por representar graficamente as interligações entre os componentes, indicando conexões, alimentação, sinais de comunicação, entre outros. O diagrama elétrico auxilia de referência técnica para montagem de novos dispositivos, futuras manutenções ou melhorias no sistema.

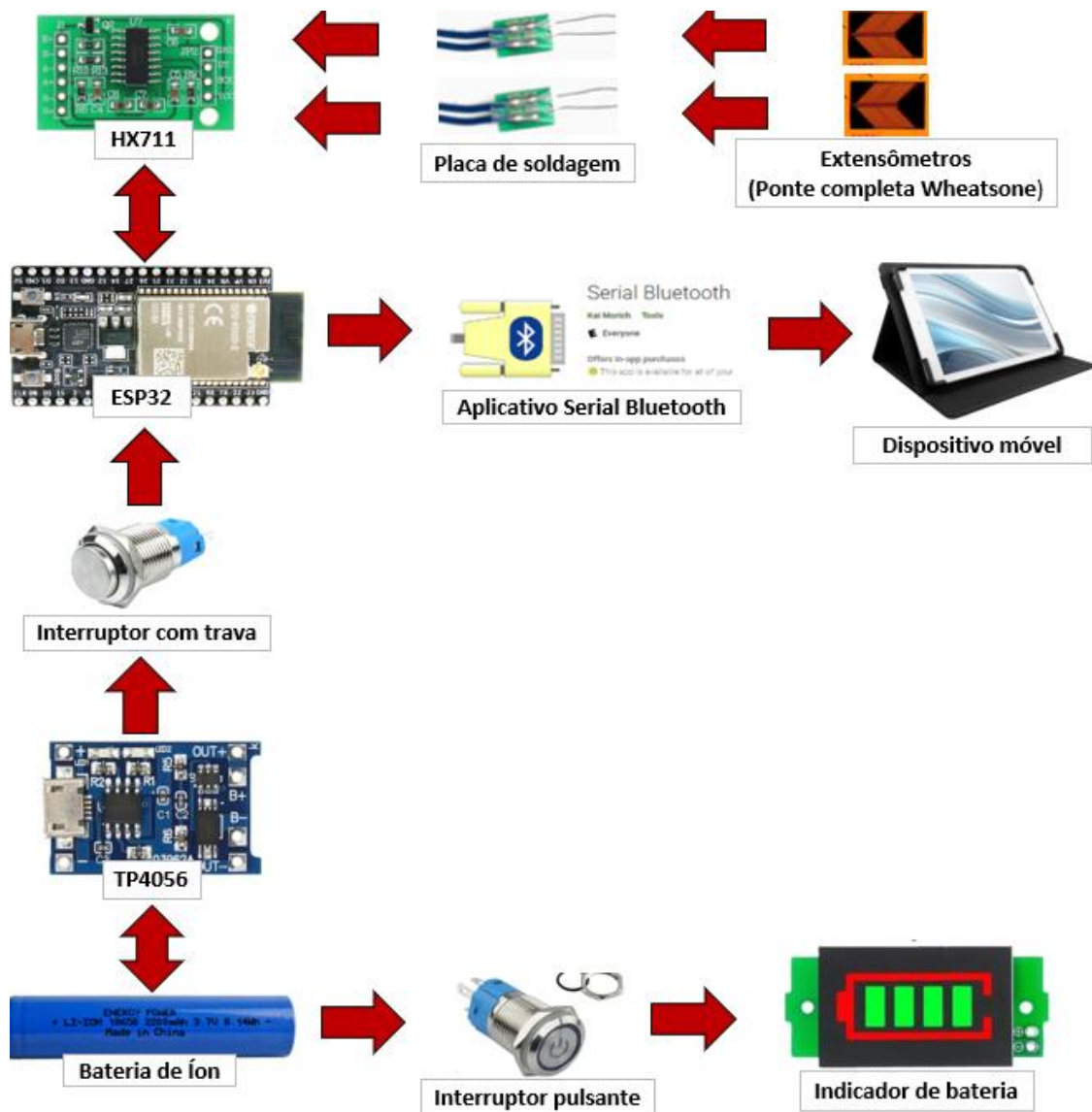
Figura 56 - Diagrama elétrico do sistema



Fonte: O autor, (2025).

A Figura 57, representa o diagrama de comunicação entre os componentes do sistema eletrônico.

Figura 57 - Diagrama de comunicação



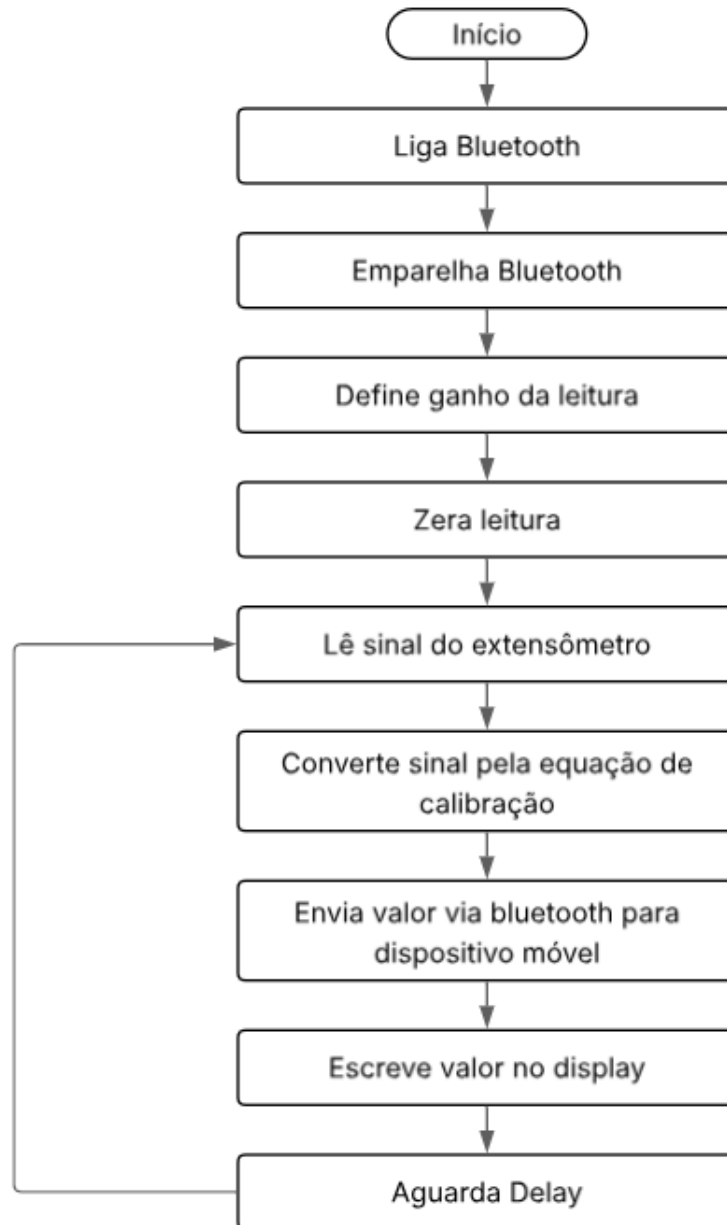
Fonte: O autor, (2025).

4.3.12 Código para programação

O sistema de medição de torque foi programado utilizando linguagem C/ C++ na plataforma Arduino IDE utilizando bibliotecas específicas dos componentes, como do módulo HX711, responsável pela leitura dos extensômetros; do ESP32, microcontrolador responsável pelo processamento e envio dos dados até o dispositivo móvel via *bluetooth serial*. O código foi desenvolvido com pequenas modificações, com o intuito de diminuir a complexidade do código, deixando assim mais intuitiva e rápida.

Com a intenção de facilitar o entendimento da programação, foi realizado um fluxograma (Figura 58) das tarefas envolvidas na programação.

Figura 58 - Fluxograma da programação do código do Arduino



Fonte: O autor, (2025).

O código final da programação do sistema está representado na Figura 59.

Figura 59 - Código de programação do sistema eletrônico

```

#include <Arduino.h> // Funções básicas do Arduino
#include "HX711.h" // Biblioteca do conversor HX711
#include "soc/rtc.h" // Biblioteca para acesso a funções de sistema do ESP32
#include "BluetoothSerial.h" // Comunicação Bluetooth Serial no
ESP32

const char *pin = "1234"; // PIN para pareamento Bluetooth (opcional)

String device_name = "MEDIDORDETORQUE"; // Nome do dispositivo Bluetooth

#if !defined(CONFIG_BT_ENABLED) ||
!defined(CONFIG_BLUEDROID_ENABLED) // Garante que o bluetooth esteja
habilitado
#error Bluetooth is not enabled! Please run make menuconfig to and enable
it // Garante que o bluetooth esteja habilitado
#endif
// Garante que o bluetooth esteja habilitado

#if
!defined(CONFIG_BT_SPP_ENABLED)
// Garante que o bluetooth esteja habilitado
#error Serial Bluetooth not available or not enabled. It is only available for
the ESP32 chip. // Garante que o bluetooth esteja habilitado
#endif
// Garante que o bluetooth esteja habilitado

BluetoothSerial SerialBT; // Cria o objeto
Bluetooth Serial

unsigned long lastPrintTime = 0; // Guarda o tempo da
última leitura
const unsigned long printInterval = 100; // Intervalo entre
leituras (100 milissegundos)

// HX711 circuit wiring
const int LOADCELL_DOUT_PIN = 16; // Pino de dados do
HX711
const int LOADCELL_SCK_PIN = 4; // Pino de clock do HX711

HX711 scale; // Objeto do tipo HX711

void setup() {

```

```

Serial.begin(115200);
                // Inicia comunicação USB (monitor serial)
SerialBT.begin(device_name);
                // Inicia Bluetooth com o nome definido
Serial.printf("The device with name \"%s\" is started.\nNow you can pair it
with Bluetooth!\n", device_name.c_str());
#ifdef USE_PIN
    SerialBT.setPin(pin);
    Serial.println("Using PIN");
#endif

//
Serial.println("Initializing the scale");

scale.begin(LOADCELL_DOUT_PIN, LOADCELL_SCK_PIN);    // Conecta os pinos

scale.set_gain(128); // ganho 128 e 64 canal A ---- ganho 32 canal B

scale.set_scale(4389.85);                            // ALTERAR ESSE FATOR
CONFORME TORQUE CONHECIDO E REAL

scale.tare();                // Zera o valor da balança (sem carga)

Serial.println("After setting up the scale:");

Serial.print("read: \t\t");
Serial.println(scale.read());    // Imprime o valor bruto sem calibração

Serial.println("Readings:");
}

void loop() {

    unsigned long now = millis();    // Pega o tempo atual em milissegundos
    if (now - lastPrintTime >= printInterval) {
        lastPrintTime = now;        // Atualiza o tempo da última leitura

        SerialBT.print(millis()); // printa o tempo em milissegundos
        SerialBT.print(" "); // printa espaço
        SerialBT.println(scale.get_units()); //printa o valor de torque NO BT

        Serial.println(scale.get_units()); // Mostra o torque no monitor serial
        delay (10);                // Pequeno atraso para estabilidade
    }
}

```

Fonte: O autor, (2025).

4.4 CALIBRAÇÃO

Nesse tópico será abordado todo o processo de calibração do dispositivo, com o objetivo de demonstrar uma relação correta entre os valores obtidos pelos extensômetros com as grandezas físicas reais, deste caso, aplicado ao torque. Além disso, busca-se garantir a confiabilidade e precisão dos resultados obtidos.

Inicialmente, será apresentado o dispositivo de calibração, no qual foi desenvolvido com o intuito de obter torques controlados e diminuir outros esforços que podem impactar na análise, como flexão, por exemplo.

Em seguida, descreve-se toda a metodologia adotada para execução dos testes experimentais. Na sequência, é determinada a curva de calibração e, por fim, obtém-se o coeficiente de calibração, no qual será utilizado na equação de programação do sistema.

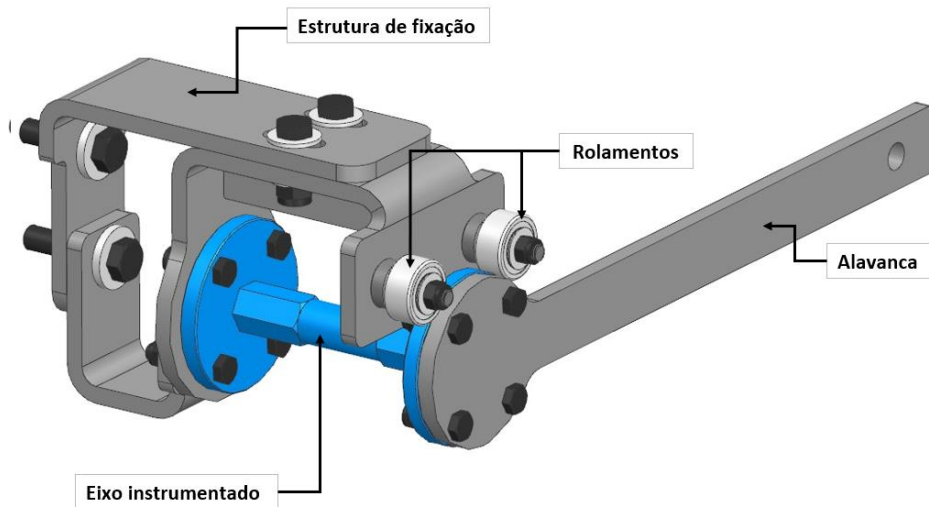
4.4.1 Dispositivo de calibração

Com o objetivo de validar e calibrar o sistema de medição de forma mais assertiva, foi projetado e construído um dispositivo de calibração experimental, onde foi capaz de aplicar torque ao eixo instrumentado com extensômetros. O dispositivo foi desenvolvido com base em princípios do braço de alavanca, oferecendo uma solução prática, de baixo custo e com uma boa repetibilidade para ensaios.

O dispositivo de calibração (Figura 60) é dividido em duas partes, sendo a primeira parte denominada como estrutura de fixação, responsável por manter o eixo instrumentado fixo. A segunda parte é o braço da alavanca, dimensionado com comprimento controlado de 0,5 metros com uma tolerância de $\pm 0,3$ milímetros. Foi constatado via medição laboratorial da empresa que a respectiva dimensão variou + 0,08 milímetros, dentro da tolerância exigida no projeto e podendo assim ser desprezada para eventuais cálculos.

Importante ressaltar que o dispositivo contém dois rolamentos de esferas em sua montagem, localizadas na extremidade superior do braço da alavanca, em contato direto com o eixo instrumentado. A intenção de utilizar rolamentos na concepção do projeto tem o intuito de diminuir os deslocamentos verticais, ou seja, diminuir a flexão do eixo instrumentado no momento que for aplicado força na extremidade da alavanca, buscando obter um valor mais assertivo do torque.

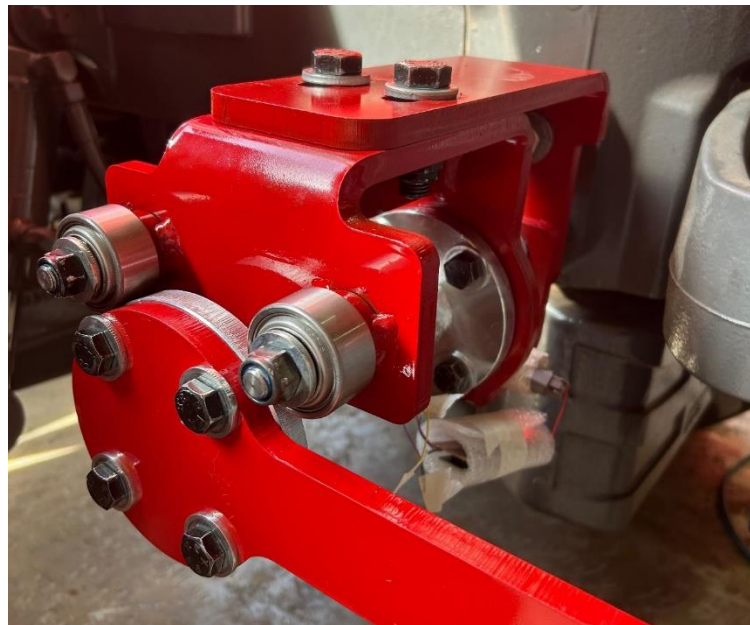
Figura 60 - Dispositivo de calibração 3D



Fonte: Autor (2025).

Para a fabricação mecânica referente ao dispositivo de calibração, efetuou-se por meio de equipamentos e materiais disponíveis na empresa. Os materiais utilizados bem como o processo de fabricação estão alocados no projeto preliminar. Na imagem abaixo, demonstra o dispositivo final.

Figura 61 - Dispositivo de calibração



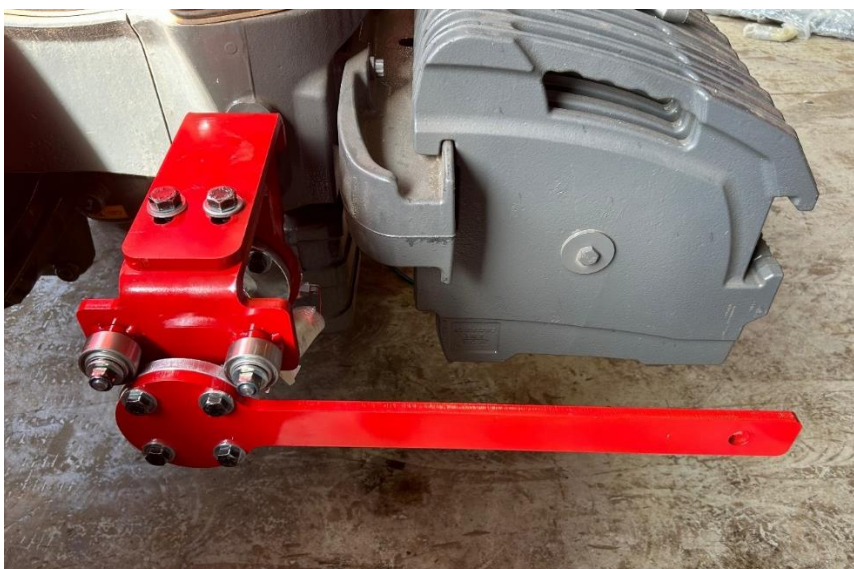
Fonte: Autor (2025).

4.4.2 Metodologia de calibração

Para a calibração do sistema adotou-se uma abordagem experimental, fundamentada em princípios clássicos da física, especialmente no conceito de geração de torque aplicado a um braço de alavanca.

Inicialmente, o eixo instrumentado com extensômetros foi acoplado no dispositivo de calibração (Figura 62), conseqüentemente fixado em uma estrutura de suporte rígida, a fim de garantir estabilidade durante todo o processo de calibração. Com o eixo devidamente posicionado, procedeu-se a montagem dos demais componentes de ensaio.

Figura 62 - Fixação do eixo instrumentado junto ao dispositivo de calibração



Fonte: Autor (2025).

Para a aplicação controlada de carga, utilizou-se um guincho hidráulico, responsável por exercer força na extremidade da alavanca de 0,5 metros de comprimento, fixada diretamente ao eixo. A alavanca foi posicionada a 45° em relação ao plano horizontal, garantindo assim que as forças aplicadas gerassem torque uniforme ao eixo, respeitando a condição de perpendicularidade entre força e a alavanca.

Entre o guincho hidráulico e a extremidade da alavanca, foi acoplado uma célula de carga, responsável por medir com precisão a força aplicada em cada ponto da calibração. Antes do início das medições, o sistema eletrônico juntamente com a célula de carga foi zerado, eliminando assim o erro de zero. A Figura 63 representa a montagem final do sistema de calibração

Figura 63 - Montagem final do dispositivo de calibração



Fonte: Autor (2025).

As cargas foram aplicadas com incrementos de 40 kgf, abrangendo uma faixa determinada de 0 a 240 kgf, resultando em seis diferentes níveis de carga aplicados ao sistema. Para cada nível de medição, foram realizadas três medições consecutivas, com o intuito de calcular a média em cada incremento de força.

Esse procedimento foi repetido em três ensaios independentes, conduzido em dias alternados, com objetivo de analisar a repetitividade do sistema e avaliar as influências externas que possam afetar a estabilidade do sistema. A repetição do ensaio permite identificar as oscilações vindas de fatores como vibrações, variações de temperatura, interferências eletrônicas e humanas.

As medições obtidas referem-se às respostas, em microvolts (μV), captadas pelo extensômetro instalados no corpo de prova, em cada um dos ensaios. A tabela 9 apresenta, de forma detalhada, os valores das três medições (ensaios), em cada incremento de força, para os três ciclos de calibração, chamados de L01 (onde 01 é referente a primeira leitura, L02 referente a leitura número dois, e assim foi diante).

Tabela 10 – Dados obtidos pelo extensômetro

	Ensaio 01			Ensaio 02			Ensaio 03		
Força (kgf)	L01 (μV)	L02 (μV)	L03 (μV)	L01 (μV)	L02 (μV)	L03 (μV)	L01 (μV)	L02 (μV)	L03 (μV)
40	0,04489	0,04488	0,04487	0,04494	0,04475	0,04497	0,04476	0,04502	0,04482
80	0,08994	0,08992	0,08990	0,08986	0,08970	0,08993	0,08972	0,09023	0,09011
120	0,13485	0,13485	0,13483	0,13535	0,13535	0,13471	0,13515	0,13525	0,13522
160	0,17996	0,17992	0,17988	0,18044	0,18025	0,17937	0,18044	0,18050	0,17993
200	0,22396	0,22386	0,22378	0,22299	0,22380	0,22401	0,22406	0,22435	0,22416
240	0,26814	0,26805	0,26793	0,26750	0,26786	0,26770	0,26728	0,26760	0,26855

Fonte: Autor (2025).

Optou-se por calcular, inicialmente, a média das três leituras realizadas em cada incremento de força, para cada um dos ensaios. Posteriormente, foi realizado a média geral entre os três ensaios, para cada incremento. Esse procedimento visa analisar o comportamento do sistema conforme o aumento progressivo da carga.

Tabela 11 - Médias finais das leituras dos extensômetros

Força (kgf)	Média Ensaio 01 (μV)	Média Ensaio 02 (μV)	Média Ensaio 03 (μV)	Média geral (μV)
40	0,04488	0,04489	0,04487	0,04488
80	0,08992	0,08983	0,09002	0,08992
120	0,13484	0,13514	0,13521	0,13506
160	0,17992	0,18002	0,18029	0,18008
200	0,22387	0,22360	0,22419	0,22389
240	0,26804	0,26769	0,26781	0,26785

Fonte: Autor (2025).

Após a obtenção das médias gerais das leituras para cada incremento de força, foi possível calcular os valores teóricos do torque, com a finalidade de estabelecer uma base comparativa para a avaliação do desempenho, precisão e parâmetro para calibração.

Para isso, utilizou-se a equação fundamental da física, no qual relaciona a força aplicada ao braço da alavanca com a distância entre os centros de aplicação da carga e o eixo de rotação.

$$Tt = (P \cdot g) \cdot D \quad (27)$$

Sendo:

Tt= Torque teórico (Newton-metro);

P= Peso (kg);

g= Gravidade (9,80665 m/s²);

d= Distância (0,5 metros).

Tabela 12 - Dados obtidos pela fórmula fundamental

<i>Força aplicada (kgf)</i>	<i>Torque teórico (N.m)</i>
40	196,13300
80	392,26600
120	588,39900
160	784,53200
200	980,66500
240	1176,79800

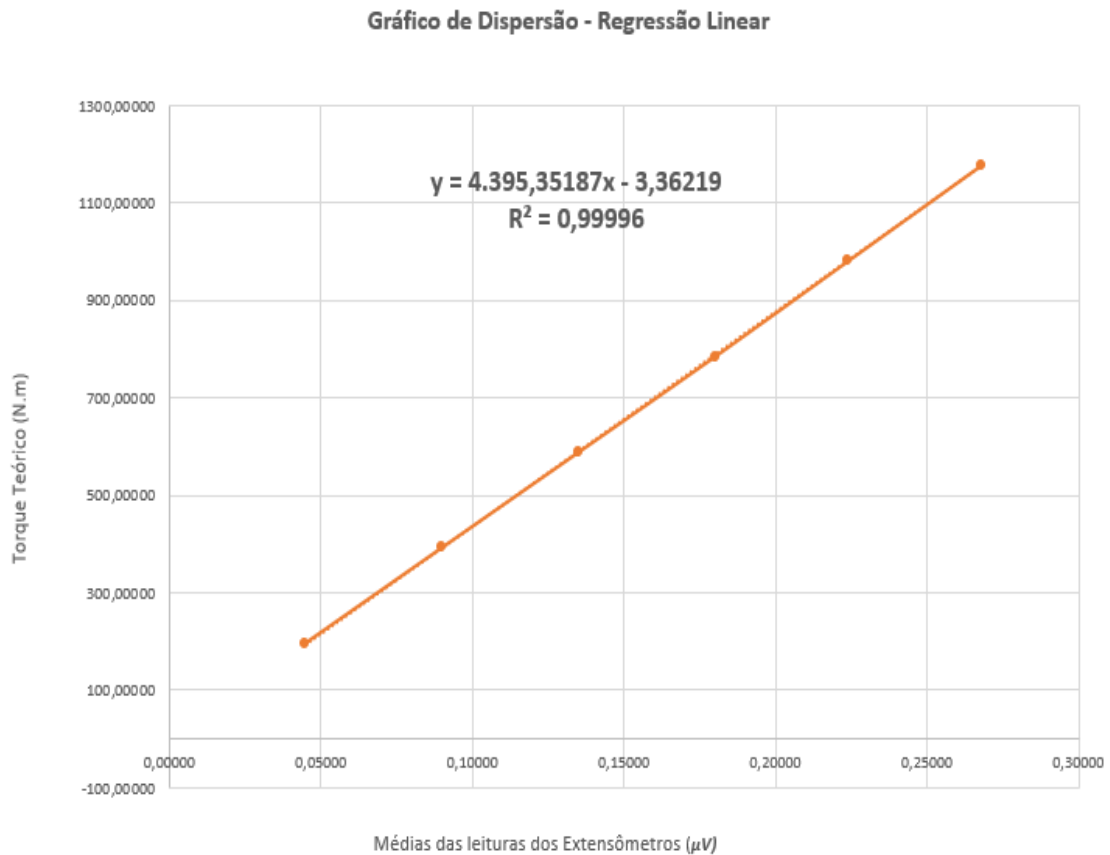
Fonte: Autor (2025).

Na etapa seguinte, com o auxílio do *software Excel*, foi realizado uma regressão linear simples, permitindo que seja visualizado a curva de calibração e sua equação representativa. Conforme Asimov Academy (2024), regressão linear é uma ferramenta estatística utilizada para modelar a relação entre uma variável dependente e uma variável independente, com base em dados experimentais.

Essa ferramenta estabelece uma reta que melhor se ajusta aos pontos amostrados, que para o presente estudo, a variável dependente é o torque teórico calculado (N.m) e a variável independente é as médias das leituras obtidas pelos extensômetros (μV).

A regressão linear foi realizada por meio do gráfico de dispersão, aplicada uma linha de tendência linear. A equação da reta foi calculada automaticamente, juntamente com o coeficiente de determinação (R^2), no qual representa a qualidade do ajuste entre os dados. A Figura 64 representa a relação entre os dados, no qual o torque teórico foi representado no eixo Y e as médias das leituras no eixo X, acompanhados da reta de regressão e sua respectiva equação.

Figura 64 - Gráfico de dispersão



Fonte: Autor (2025).

Com base na equação obtida por meio de regressão linear, é possível mensurar os valores do coeficiente angular e do coeficiente linear da reta, no qual será utilizado na equação final de calibração. Com isso, determinamos que:

- Y – Valor buscado;
- 4.395,35187 - Coeficiente Angular da reta;
- -3,36219 - Coeficiente Linear da reta (fator de correção);
- x - Valor da variável independente.

Após determinarmos a equação representativa para a calibração do dispositivo, foi possível adapta-la ao modelo geral da equação da reta, resultando na equação de calibração do sistema, conforme abaixo:

$$Ts = (k \cdot x) + b \quad (28)$$

Onde:

- T_s - Torque sistema (N.m);
- $k = 4.395,35187$;
- x - Valor da leitura (ou a média) do extensômetro
- $b = -3,36219$.

4.5 ERROS DE MEDIÇÃO

Com o objetivo de assegurar a confiabilidade dos dados obtidos pelo sistema, é necessário realizar uma análise criteriosa dos possíveis erros que podem ocorrer durante todo o processo de fabricação, instalação e funcionamento do produto. A seguir será discutido as principais categorias de erros, bem como todas as métricas adotadas para avaliar o desempenho e a precisão do sistema.

4.5.1 Erro sistemático

Ribeiro et al. (2012) cita que o erro sistemático corresponde ao valor médio do erro de medição, ou seja, o valor tende a se manter constante caso as condições de medições sejam mantidas iguais. Para estimar o erro sistemático, é necessário efetuar medições repetitivas de um mensurando cujo o valor verdadeira seja conhecido. Na prática, é normalmente utilizado uma estimativa aproximada do erro sistemático, denominado como tendência, conforme a equação abaixo:

$$Td = I - VVC \quad (29)$$

Sendo:

- T_d – Tendência;
- I – Média de um número finito de indicações;
- VVC – Valor verdadeiro convencional do mensurando.

Com base na equação acima, conseguimos mensurar o respectivo valor da tendência do sistema de medição, para cada incremento de força, substituindo I pelo torque obtido pelo sistema e VVC pelo torque teórico obtido pela equação fundamental. Ou seja, a correção aplicada aos dados é a tendência.

$$Td = \text{Torque do sistema} - \text{Torque teórico} \quad (30)$$

Tabela 13 - Tendência do sistema de medição

TENDÊNCIA DO SISTEMA DE MEDIÇÃO			
Força aplicada (kgf)	Valor do sistema (N.m)	Valor teórico (N.m)	Tendência (N.m)
40	193,89143	196,13300	-2,24157
80	391,88250	392,26600	-0,38350
120	590,28380	588,39900	1,88480
160	788,13812	784,53200	3,60612
200	980,69361	980,66500	0,02861
240	1173,91327	1176,79800	-2,88473

Fonte: Autor (2025).

4.5.2 Erro aleatório

Conforme Ribeiro et al. (2012), o erro aleatório é a parcela imprevisível do erro, ou seja, é o responsável que faz com que as repetições levem a resultados diferentes. Na prática, o valor do erro aleatório tem pouco interesse, então busca-se determinar a repetitividade, ou seja, determinar a faixa de valores dentro da qual o erro aleatório é esperado.

Ainda Ribeiro et al. (2012), a repetitividade é a faixa de valores simétricos em torno de um valor médio, dentro da qual o erro aleatório de um sistema de medição é esperado, com uma certa probabilidade.

O erro aleatório resulta na ação combinada de diversos fatores aleatórios durante o processo de medição, desde fatores internos até influências externas, como condições ambientais, operacional e do mensurando.

A tabela 13 apresenta os valores do torque do sistema para cada medição realizada anteriormente, convertendo as medições através da equação de calibração, expressas em (μV) para valores de torque (N.m), com a intenção de padronizar as unidades dos erros de medições.

Tabela 14 - Leituras convertidas pela equação de calibração

<i>Força (kgf)</i>	Ensaio 01			Ensaio 02			Ensaio 03		
	<i>L01 (N.m)</i>	<i>L02 (N.m)</i>	<i>L03 (N.m)</i>	<i>L01 (N.m)</i>	<i>L02 (N.m)</i>	<i>L03 (N.m)</i>	<i>L01 (N.m)</i>	<i>L02 (N.m)</i>	<i>L03 (N.m)</i>
40	193,94516	193,90120	193,85725	194,16492	193,32981	194,29678	193,37376	194,51655	193,63748
80	391,95576	391,86785	391,77994	391,60413	390,90087	391,91180	390,98878	393,23041	392,70297
120	589,35101	589,35101	589,26310	591,54869	591,54869	588,73566	590,66962	591,10915	590,97729
160	787,62533	787,44952	787,27370	789,73510	788,89998	785,03207	789,73510	793,36101	787,49347
200	981,02081	980,58128	980,22965	976,75732	980,31756	981,24058	981,46035	982,73500	981,89989
240	1175,20746	1174,81188	1174,28444	1172,39444	1173,97676	1173,27351	1171,42746	1172,83397	1177,00955

Fonte: Autor (2025).

Da mesma forma realizada anteriormente, a tabela 14 representa as respectivas médias para cada ensaio realizado, obtendo uma média geral para cada incremento de força.

Tabela 15 - Médias finais das leituras dos extensômetros

<i>Força (kgf)</i>	<i>Média Ensaio 01 (N.m)</i>	<i>Média Ensaio 02 (N.m)</i>	<i>Média Ensaio 03 (N.m)</i>	<i>Média geral (N.m)</i>
40	193,90120	193,93050	193,84260	193,89143
80	391,86785	391,47227	392,30739	391,88250
120	589,32171	590,61101	590,91869	590,28380
160	787,44952	787,88905	790,19653	788,51170
200	980,61058	979,43849	982,03175	980,69361
240	1174,76793	1173,21490	1173,75699	1173,91327

Fonte: Autor (2025).

4.5.2.1 Desvio padrão

O desvio padrão é uma medida estatística que representa o grau de dispersão dos dados em relação à média, sendo que quanto menor for o desvio padrão, maior a consistência das medições. Já o desvio padrão amostral, calculado a partir de um número finito de repetições, estima o desvio padrão da amostra.

Utilizando a equação abaixo, é possível determinar o desvio padrão amostral.

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1} \quad (31)$$

Sendo que:

- S - Desvio Padrão amostral;
- Xi – Valor individual medido;
- \bar{x} – Média dos valores medidos (cada ensaio);
- n – Número de medições.

Tabela 16 - Gráfico da tendência do sistema de medição

<i>Força aplicada (kgf)</i>	<i>Desvio Padrão Amostral (N.m)</i>
40	0,04476
80	0,41775
120	0,84728
160	1,47556
200	1,29862
240	0,78822

Fonte: Autor (2025).

4.5.2.2 Incerteza Padrão

Ribeiro et al. (2012) cita que a incerteza padrão é uma medida estatística que representa a dispersão dos valores obtidos em torno da média, sendo essencial para avaliar os resultados experimentais. No presente trabalho, a incerteza padrão foi calculada com base no desvio padrão amostral calculado anteriormente e no número de repetições realizadas (três). Os valores encontrados estão disponíveis na tabela 16.

$$\sigma = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (32)$$

Onde:

- σ - Incerteza padrão obtida da amostra;
- S – Desvio padrão;
- n – Número de medições efetuadas;

Tabela 17 - Incerteza padrão

<i>Força aplicada (kgf)</i>	<i>Incerteza padrão (N.m)</i>
40	0,02584
80	0,24119
120	0,48918
160	0,85192
200	0,74976
240	0,45508

Fonte: Autor (2025).

4.5.2.3 Repetitividade

A repetitividade pode ser compreendida como a faixa dentro da qual se espera a ocorrência do erro aleatório. Essa faixa deve estar associada a uma probabilidade estatística, indicando assim que os valores do erro se encontrem nesse intervalo. Quanto mais dados utilizados para a estimativa do desvio padrão, maior será a confiabilidade da medição.

Por outro lado, quando utilizado poucos dados, a estimativa torna-se menos precisa, então é necessário aplicar um fator de correção, superior a dois. Esse fator é conhecido como um coeficiente de segurança, denominado *t* de *student*. A equação abaixo representa a repetitividade do sistema:

$$Re = t \cdot \sigma \quad (33)$$

Sendo:

- *Re* – Repetitividade;
- *t* – *Student*;
- σ – Incerteza padrão.

A Figura 65 abaixo representa os valores dos coeficientes *t* de *Student*, para diferentes probabilidades. Nota-se que o valor do coeficiente reduz quando os graus de liberdade aumentam, compensando assim o aumento da confiabilidade da estimativa do desvio padrão.

Figura 65 – Tabela T de *student*

Graus de liberdade	68,27% (σ)	95% (1,96 σ)	95,45% (2,00 σ)	99,00% (2,58 σ)	99,73% (3,00 σ)
1	1,837	12,706	13,968	63,656	235,811
2	1,321	4,303	4,527	9,925	19,206
3	1,197	3,182	3,307	5,841	9,219
4	1,142	2,776	2,869	4,604	6,620
5	1,111	2,571	2,649	4,032	5,507
6	1,091	2,447	2,517	3,707	4,904
7	1,077	2,365	2,429	3,499	4,530

Fonte: Adaptado Albertazzi (2008).

Para o cálculo da repetitividade, será usado uma probabilidade de 95,45% e grau de liberdade 2, obtendo um valor de 4,527. A tabela 17 demonstra os valores da repetitividade para cada força aplicada.

Tabela 18 - Repetitividade

<i>Força aplicada (kgf)</i>	<i>Repetitividade (N.m)</i>
40	0,11699
80	1,09186
120	2,21451
160	3,85662
200	3,39416
240	2,06014

Fonte: O Autor (2025).

4.5.3 Erro máximo

O erro máximo do sistema de medição é definido como o valor absoluto do maior erro que pode ocorrer durante a faixa operacional do instrumento, considerando as condições reais de uso. A partir dos dados obtidos, o erro máximo do sistema foi determinado como sendo 7,46275 N.m, valor que corresponde à soma da tendência com a repetitividade no ponto mais crítico da curva de erros. Esse valor foi identificado no ponto de carga correspondente ao incremento 160 kgf.

5 RESULTADOS

Esta seção apresenta os principais resultados obtidos durante o desenvolvimento do sistema de medição de torque. É abordado desde a montagem final do equipamento, resultado da calibração, desempenho do equipamento, análise do custo e por fim, análise crítica do equipamento, no qual apresenta os benefícios e limitações observadas durante o desenvolvimento. Os resultados obtidos permitiram avaliar a eficácia da solução desenvolvida.

5.1 RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO EXPERIMENTAL

A etapa de calibração experimental teve como objetivo estabelecer uma relação matemática entre os sinais obtidos pelos extensômetros (μV) com os valores teóricos de torque obtidos através da fórmula fundamental (N.m).

Com o auxílio do *software Microsoft Excel*, foi possível construir a curva de calibração e sua respectiva equação, utilizando o método de regressão linear. A regressão linear consiste em modelar uma relação entre uma variável dependente e outra variável independente, no caso do estudo, seriam os sinais obtidos dos extensômetros com os valores teóricos de torque.

A tabela 18 abaixo reúne os valores do torque obtidos pelo sistema e, os comprada com os respectivos valores teóricos de torque proveniente da equação fundamental da física. Essa comparação serve para mensurar superficialmente a precisão do sistema.

Tabela 19 - Comparativo entre valor do sistema x valor teórico

Força aplicada (kgf)	Valor do sistema (N.m)	Valor teórico (N.m)	Diferença (%)
40	193,89143	196,13300	1,15609
80	391,88250	392,26600	0,09786
120	590,28380	588,39900	0,31930
160	788,13812	784,53200	0,45755
200	980,69361	980,66500	0,00292
240	1173,91327	1176,79800	0,24574

Fonte: Autor (2025).

Observa-se que a variação percentual máxima entre os valores do torque do sistema e do torque teórico foi minimamente superior a 1%, sendo que os demais resultados se

mantiveram inferior a 0,5%. Os valores de comparação demonstram a confiabilidade da equação desenvolvida para a calibração do sistema, no qual seu coeficiente de determinação (R^2), que demonstra o grau de correlação entre as variáveis, está muito próximo a 1, ou seja, o grau de correlação é extremamente forte.

De acordo com a norma ASTM E2624-09, que trata da calibração de transdutores de torque, para calibrações que utilizem braços de alavancas com pesos, variações de até $\pm 2,5\%$ entre os valores medidos e os valores de referência são aceitos. Conforme os dados obtidos no estudo, o máximo de variação obtida durante a calibração foi de 1,15% no incremento inicial de 40kgf, os incrementos posteriores tiveram variações inferiores a 0,5%, o que demonstra que o sistema está dentro dos limites normativos estabelecidos internacionalmente, assegurando uma alta confiabilidade do sistema mesmo em um contexto de baixo custo e montagem simplificada.

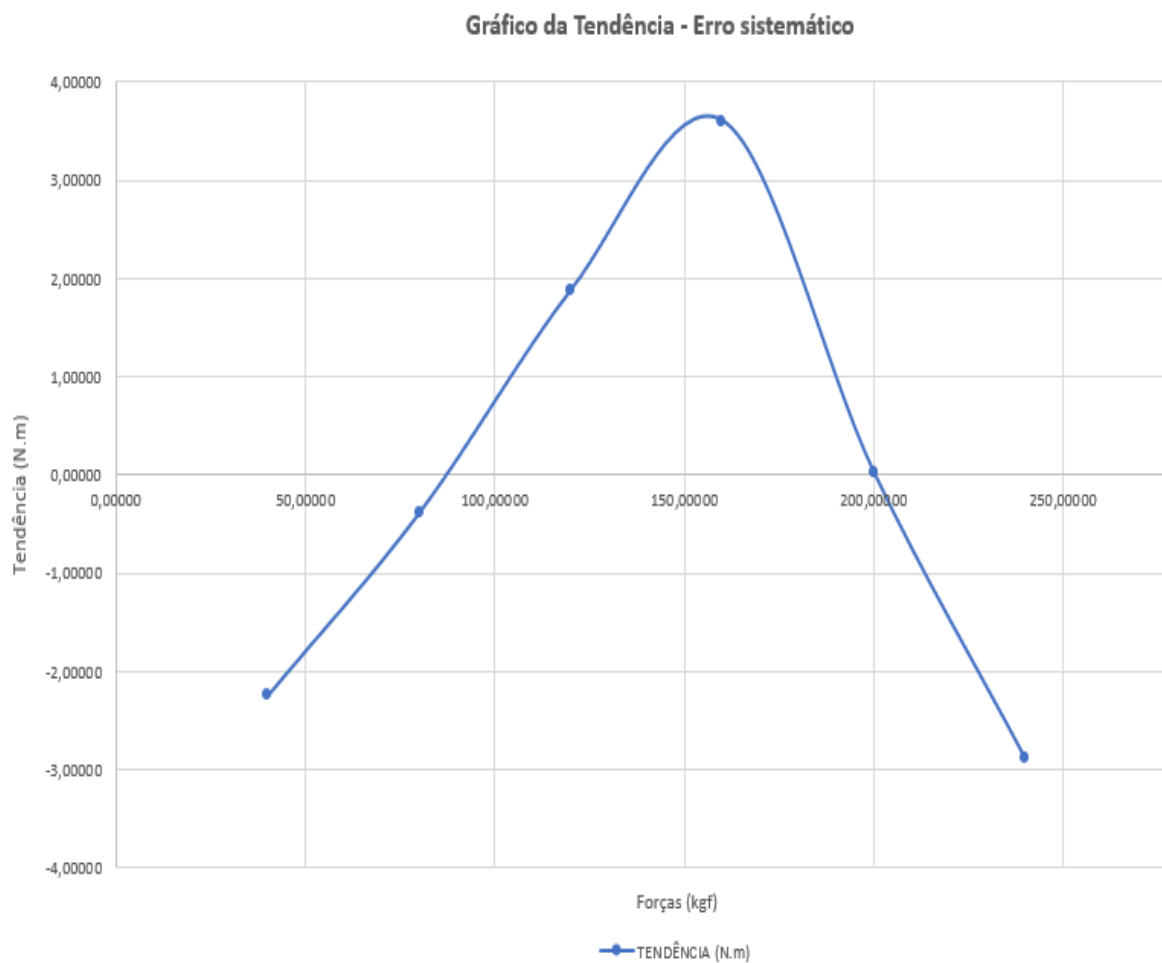
5.2 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA

A seguir, apresenta-se a avaliação do desempenho do sistema de medição, no qual foi considerado critérios técnicos para avaliar sua eficácia, como precisão do sistema, incluindo erro aleatório, erro máximo e repetitividade, resolução de leitura do sistema, estabilidade do sistema, usabilidade prática e impacto ambiental.

5.2.1 Erro sistemático

Conforme abordado na seção de metodologia, a avaliação do erro sistemático é fundamental para estimar a tendência do sistema. Utilizando a equação da tendência e os dados obtidos na tabela, é possível verificar graficamente o comportamento da linha de tendência durante os incrementos de forças (Figura 66), evidenciando assim os valores estimados pelo sistema com os valores teóricos.

Figura 66 - Gráfico da tendência do sistema de medição



Observa-se que a tendência não se mantém linear ao longo da aplicação das forças, indicando assim que o sistema não contém um padrão constante, pois a linha de tendência se altera entre o eixo positivo e negativo ao longo do acréscimo de forças. Essa alternância é benéfica para o sistema, pois assim percebe-se que o sistema não tende a superestimar nem subestimar os valores de forma constante, ou de forma unidirecional. Além disso, a alternância entre valores positivos e negativos da tendência contribui para a compensação dos erros, visto que podem se anular.

Analisando o gráfico, é visto que entre 0 até 80 kgf o sistema subestimou o torque com valores negativos da tendência. A partir de 80 até 160 o sistema superestimou os valores, tornando a tendência positiva. Entre 160 até 200 kgf, a tendência volta a se aproximar de zero, ficando novamente negativa com 240 kgf.

A maior variação constatada positivamente foi de 3,60612 N.m, e negativamente foi de -2,88473 N.m, no incremento de força 40 kgf. Essa diferença, comparando com seu respectivo incremento, resulta em uma diferença de 0,46%. Já comparando com o incremento máximo admissível (240 kgf), a resultante é de 0,3%.

5.2.2 Erro aleatório

Além do erro sistemático, a avaliação do erro aleatório do sistema de medição é necessária, pois associa às pequenas variações que ocorrem entre as medições repetidas. Como visto anteriormente, esse tipo de erro pode ser influenciado por diversos fatores, como ruídos eletrônicos, variação de temperatura, estabilidade da fonte de alimentação, entre outros.

A tabela 19 representa o comportamento dos erros do sistema, apresentando os valores obtidos da tendência (erro sistemático), repetitividade (erro aleatório) e os limites superiores e inferiores da tendência combinada com a repetitividade. Essa prática permite a análise detalhada da faixa de variação dos erros de medição.

Tabela 20 - Tabela de erros sistemático e erro aleatório

<i>Força aplicada (kgf)</i>	<i>Tendência (N.m)</i>	<i>Repetitividade (N.m)</i>	<i>Tendência + Repetitividade</i>	<i>Tendência - Repetitividade</i>
40	-2,24157	0,11699	-2,12458	-2,35855
80	-0,38350	1,09186	0,70836	-1,47536
120	1,88480	2,21451	4,09931	-0,32971
160	3,60612	3,85662	7,46275	-0,25050
200	0,02861	3,39416	3,42276	-3,36555
240	-2,88473	2,06014	-0,82459	-4,94487

Fonte: Autor (2025).

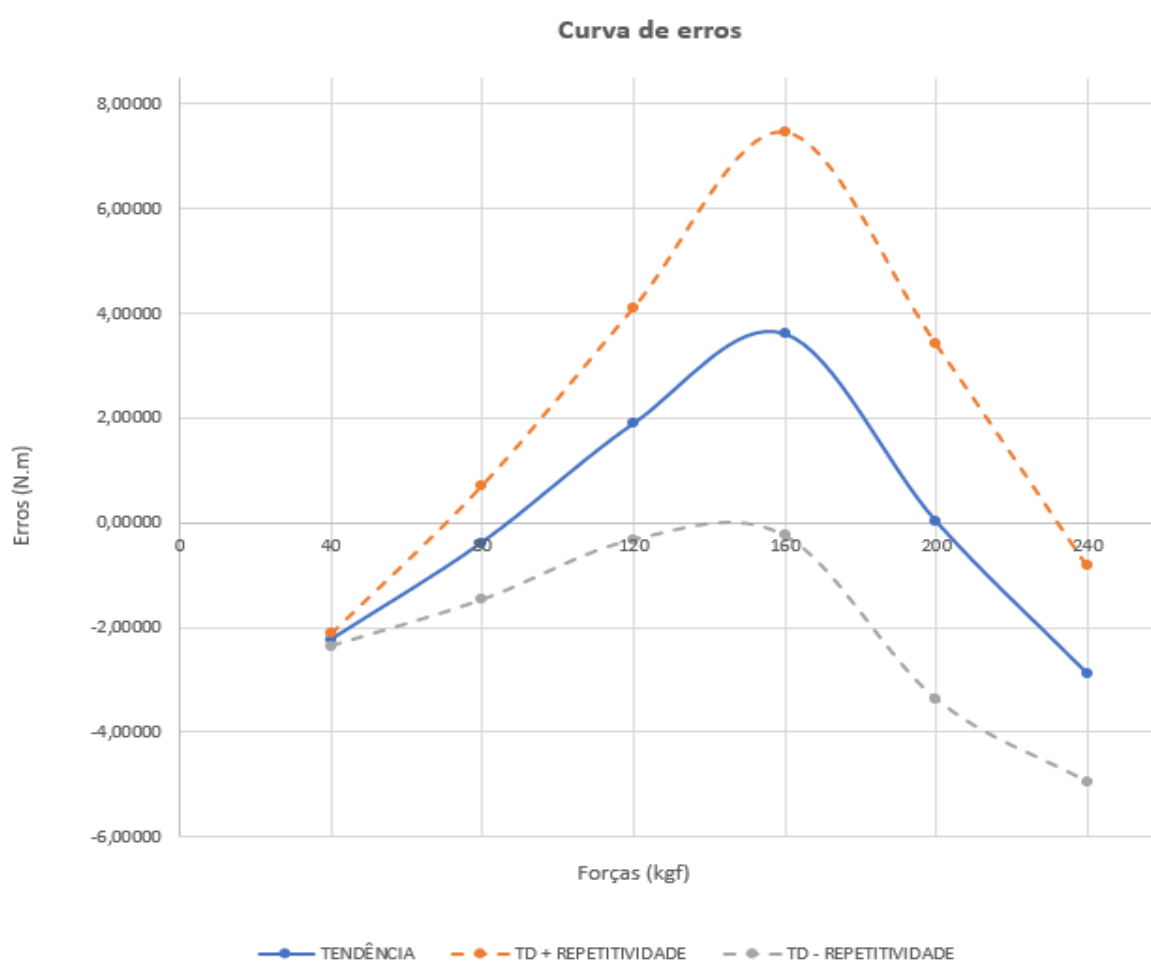
A análise do erro aleatório foi realizada por meio da avaliação da repetitividade das medições, em cada incremento de força. Conforme os dados da tabela acima, a amplitude máxima da repetitividade registrada durante as medições foi de 3,85662 N.m, no incremento de 160 kgf, resultando em uma diferença de 0,99%.

Com base na norma ISO 5725-2, que trata sobre repetitividade de sistemas de medição, erros inferiores a 1% são plenamente aceitos, demonstrando assim que a repetitividade

apresentada pelo sistema de medição está dentro dos limites aceitáveis da norma, para sistemas experimentais.

A Figura 67 ilustra a curva de erros do sistema, contemplando a tendência (erro sistemático), a repetitividade (erro aleatório) e os limites superiores e inferiores, formados pela combinação da tendência com a repetitividade. Essa representação permite visualizar a variação total do sistema, fornecendo uma análise clara da precisão e da estabilidade do sistema em diferentes níveis de carga.

Figura 67 – Curva de erros



Fonte: Autor (2025).

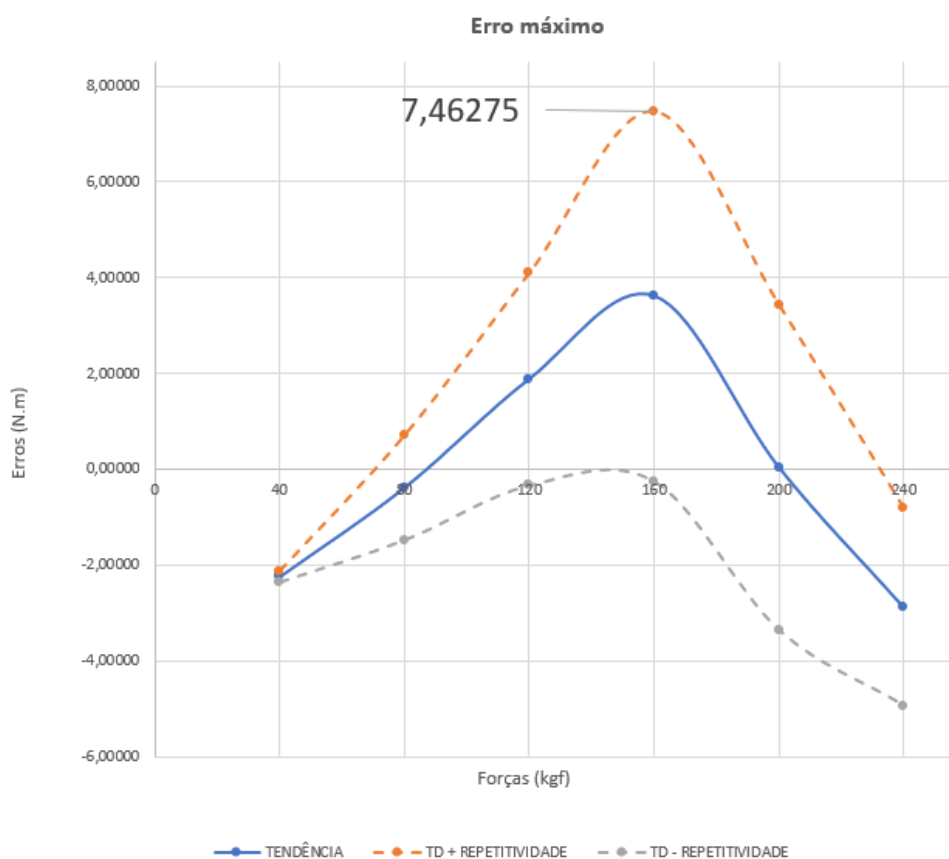
Conforme o gráfico acima, podemos evidenciar que os limites superior e inferior da tendência acompanham a mesma variação ao longo da faixa de força, demonstrando a correta utilização dos cálculos e a ausência de anomalias, como ruídos eletrônicos. Observa-se também

que os valores oscilam em torno de zero, como visto anteriormente no gráfico da tendência, no qual a alternância de positivo e negativo demonstram que o sistema não tem um padrão unidirecional. Além disso, o aumento gradual das margens de erro, proporcional ao aumento da carga, reforça o comportamento esperado em sensores baseados na deformação de componentes. Todos esses fatos, com a ausência de picos ou rupturas nas curvas demonstram a alta confiabilidade do sistema, validando toda a metodologia aplicada durante a calibração.

5.2.3 Erro máximo

O erro máximo relativo do sistema, no qual representa a razão percentual entre o erro máximo absoluto (7,46275 N.m) e o valor teórico no respectivo ponto (784,52300 N.m) para o sistema foi de aproximadamente 0,95%. Levando em consideração o erro máximo com a faixa máxima do sistema, a razão percentual foi menor, aproximadamente de 0,6%.

Figura 68 - Erro máximo



Fonte: Autor (2025).

5.2.4 Precisão

A precisão de um sistema de medição está associada a dispersão dos resultados obtidos em condições repetidas de medição. Para esse trabalho, a precisão foi avaliada por meio da repetitividade, no qual representa o grau de variação aleatória entre mediações no mesmo ponto.

A repetitividade mais elevada que foi observada no sistema foi de 3,85662 N.m, correspondente ao incremento de 160 kgf. Esse valor representa o maior grau de dispersão identificado durante as medições. Desse modo, considera-se que o sistema apresenta uma precisão mínima de $\pm 3,85662$ N.m.

Com base na norma ISO 5725-2, a mesma reforça que um sistema de medição deve ser validado por meio da sua repetitividade, ou seja, pela consistência entre suas repetições. A norma exige que a repetitividade seja quantificada e mantida dentro de um limite aceitável, definido pelo usuário ou pela aplicação. Como proposto na etapa de projeto informacional, mais precisamente nos requisitos de cliente, no qual o requisito denominado “precisão dos resultados” obteve maior número de votos, conseqüentemente determinando que o sistema deveria ter uma precisão entre $\pm 1\%$.

Desta forma, sabendo que a precisão do sistema é de $\pm 3,85662$ N.m no incremento 160 kgf, em termos de porcentagem a precisão é de 0,49%. Da mesma forma, realizando ao longo da ampla faixa de medição, a precisão é de aproximadamente 0,3%. Com isso, podemos afirmar que o sistema de medição de torque tem uma precisão maior que o determinado nos requisitos de cliente.

5.2.5 Resolução

A resolução do sistema de medição representa a menor variação de torque que pode ser detectada e registrada pelo conjunto inteiro. Para determinar a resolução do sistema proposto, foram utilizadas as características técnicas do conversor analógico-digital HX711, responsável por captar os sinais dos extensômetros. Conforme dados retirados do datasheet do componente, o mesmo possui resolução de 24 bits, faixa de entrada de $\pm 0,5$ V e ganho de 128 vezes.

A primeira etapa é determinar a resolução do conversor HX711, com base nos dados acima. A equação a seguir, citada pelo fornecedor, determina a amplitude máxima que o componente é capaz de medir corretamente:

$$Ft = \pm \frac{AVDD}{GAIN} \quad (34)$$

Sendo que:

- Ft – Faixa total (mV);
- AVDD - Tensão de alimentação (V)
- GAIN – Ganho (128).

Com isso, determinamos que a faixa total corresponde:

$$Ft = \pm \frac{3,7 V}{128} \quad (35)$$

$$Ft = \pm 0,02890 V = \pm 28,90625 mV$$

Após determinar a faixa total, é possível determinar a faixa por bit (Fb), dividindo o fator total (Ft) pela quantidade de bits do componente ($24 \text{ bits} = 2^{24} = 16.777.216$)

$$Fb = \pm \frac{28,9062 mV}{16.777.216} \quad (36)$$

$$Fb = 1,72295 \mu V$$

O segundo passo consiste em determinar o torque mínimo no qual o sistema consegue determinar, multiplicando o Fb pelo fator de calibração determinado anteriormente, conforme abaixo:

$$Tmin = 4.395,35187 x Fb \quad (37)$$

$$Tmin = 4.395,35187 x 1,72295 \mu V \quad (38)$$

$$Tmin = 0,00757 N.m$$

Portando, com base na configuração do sistema e na sensibilidade obtida durante a calibração, estima-se que o sistema seja capaz de detectar variações na ordem de 0,00757 N.m. Esse valor representa a capacidade de resposta mínima do sistema. No contexto agrícola, visto que será utilizado em equipamentos que produzem grande torque, a resolução é satisfatória.

5.2.6 Estabilidade da bateria

Durante a realização dos testes, o sistema foi alimentado tanto por meio da conexão USB quanto pela bateria de lítio, conectada ao módulo de carregamento. Observou-se que a estabilidade da tensão fornecida pela bateria foi satisfatória, não comprometendo a operação dos demais componentes. Embora pequenas variações nas leituras tenham sido registradas ao alternar os meios de alimentação, algo que já era esperado, as variações foram mínimas, não ultrapassando os limites de erro admissíveis definidos no início da calibração.

O sistema manteve-se seu funcionamento contínuo, sem reinicializações inesperadas por cerca de 5 horas, indicando uma boa estabilidade. A duração de aproximadamente 5 horas é condizente com o propósito do sistema, visto que será utilizado em várias ocasiões durante a colheita, porém não de forma contínua, sendo suficiente para durar um dia de testes no campo.

5.3 VIABILIDADE ECONÔMICA

O sistema de medição de torque tem como objetivo a viabilidade econômica, buscando uma alternativa de baixo custo, acessível e funcional para aplicações em ambientes agrícolas. A proposta envolve a utilização de componentes de fácil aquisição, custo relativamente baixo e montagem simplificada, mas sem comprometer o desempenho e a confiabilidade das medições. Com base nisso, a tabela 20 representa os relativos custos diretos envolvidos no desenvolvimento e produção do sistema.

Para fins de organização e análise detalhada, o custo do projeto total será dividido do seguinte modo.

1. Componentes eletrônicos: Inclui de forma unitária todos os componentes utilizados, além dos acessórios de fixação e acessórios de preparação;
2. Estrutura de fixação: Conjunto soldado flange e capas de proteção em ABS;
3. Estrutura de calibração: Conjunto montado completo do calibrador.

Importante ressaltar que os valores podem variar por marca ou produtos similares disponíveis no mercado. Além disso, os valores calculados na fabricação dos componentes mecânicos foram retirados do ERP (*Enterprise Resource Planning*) da empresa, onde já está contabilizado os valores de matéria prima, hora homem, hora máquina, logística, entre outros.

Tabela 21 - Composição de custos do sistema de medição

COMPONENTES ELETRÔNICOS			
DESCRIÇÃO	VALOR UNIT.	QUANT.	VALOR TOTAL
EXTENSÔMETRO	R\$ 56,10	2	R\$ 112,20
PLACAS DE SOLDAGEM	R\$ 4,30	2	R\$ 8,60
MÓDULO HX 711	R\$ 8,67	1	R\$ 8,67
MICROPROCESSADOR ESP 32	R\$ 53,96	1	R\$ 53,96
DISPOSITIVO MÓVEL*	R\$ 1.142,10	1	R\$ 1.142,10
INTERRUPTOR COM TRAVA	R\$ 15,15	1	R\$ 15,15
PLACA USINADA DE FENOLITE	R\$ 22,00	1	R\$ 22,00
INTERRUPTOR PULSANTE	R\$ 15,24	1	R\$ 15,24
MÓDULO TP 4056	R\$ 4,31	1	R\$ 4,31
BATERIA DE LÍTIO	R\$ 11,76	1	R\$ 11,76
INDICADOR DE BATERIA	R\$ 19,80	1	R\$ 19,80
ACESSÓRIOS DE FIXAÇÃO**	R\$ 8,60	1	R\$ 8,60
ACESS. DE PREPARAÇÃO***	R\$ 4,50	1	R\$ 4,50
RESINA EPÓXI	R\$ 57,53	0,25	R\$ 14,38
CUSTO DIRETO C/ DISPOSITIVO = R\$ 1.441,27			
CUSTO DIRETO S/ DISPOSITIVO = R\$ 299,17			
* Somente quando cliente optar, fácil integração com Android			
** Parafusos, porcas, espaguete termo retrátil, fixadores, protetor de cabo, solda			
*** Lixas, álcool etílico...			
ESTRUTURA DE FIXAÇÃO			
DESCRIÇÃO	VALOR UNIT.	QUANT.	VALOR TOTAL
CONJUNTO SOLDADO FLANGE	R\$ 136,68	1	R\$ 136,68
CAPAS ABS (MACHO E FÊMEA) *	R\$ 92,61	0,6	R\$ 55,56
CUSTO DIRETO = R\$ 192,24			
* O custo estimado para a produção das capas de produção leva em consideração o custo do filamento + quantidade de horas para impressão vezes o valor do kWh			

<u>ESTRUTURA DE CALIBRAÇÃO</u>			
DESCRIÇÃO	VALOR UNIT.	QUANT.	VALOR TOTAL
CONJ. MONTADO CALIBRADOR*	R\$ 371,64	1	R\$ 371,64
CUSTO DIRETO = R\$ 371,64			
* Conjunto completo, incluindo componentes, parafusos, porcas, arruelas, rolamentos...			

Fonte: Autor (2025).

A tabela 20 apresenta a estimativa de custos diretos do sistema de medição, separadas em três categorias principais: Componentes eletrônicos, estrutura de fixação e estrutura de calibração. Segue abaixo algumas considerações:

- I. O sistema eletrônico é de fácil conectividade com celulares e tablets Android, onde abre a possibilidade de venda somente do circuito eletrônico, sem necessidade que seja incluído o dispositivo móvel (tablet) no custo final. Fica a critério do cliente a compra do dispositivo móvel.
- II. O custo final da estrutura de calibração pode ser dissolvido ao longo da produção do sistema, visto que será utilizado o mesmo dispositivo para realizar a calibração de outros medidores de torque.

O custo total do primeiro protótipo desenvolvido foi de R\$ 863,05, incluindo os valores dos componentes eletrônicos, estrutura de fixação e da estrutura de calibração. O segundo protótipo desenvolvido, desconsiderando o valor da estrutura de calibração, o valor por unidade foi de R\$ 491,41. Os valores podem ser vistos na tabela 21.

Tabela 22 - Custo de fabricação por unidade produzida

CUSTO DE FABRICAÇÃO POR UNIDADE PRODUZIDA		
Nº de Série	Custo de produção	Observação
1º Protótipo	R\$ 863,05	Incluso valor do calibrador
2º Protótipo	R\$ 491,41	Sem calibrador

Fonte: Autor (2025).

Por fim, será comparado o custo direto do sistema desenvolvido com dois concorrentes. O primeiro concorrente, oferece dois produtos que cumprem com o objetivo proposto, medir o

torque de eixos rotativos. Sendo o primeiro produto um sensor de torque rotativo e o outro denominado como sensor de torque de referência.

O segundo concorrente, utiliza um conceito diferente, no qual a medição do torque é proveniente do próprio sistema de transmissão, nesse caso, o sistema está acoplado no cardan do fabricante. Importante ressaltar que os valores são estimados, podendo ocorrer variação conforme importação do fabricante. A tabela 22 compara os respectivos valores de ambos os concorrentes:

Tabela 23 - Análise de preços de equipamentos concorrentes

CONCORRENTE 01		
SISTEMAS / COMPONENTES	PRODUTO 01	PRODUTO 02
SENSOR DE TORQUE (TRANSDUTOR)	R\$ 16.000,00	R\$ 50.000,00
AMPLIFICADOR DE SINAL	R\$ 5.480,43	R\$ 5.480,43
INTERFACE DE COMUNICAÇÃO	R\$ 1.200,00**	R\$ 1.200,00**
SOFTWARE DE VISUALIZAÇÃO	R\$ 3.000,00**	R\$ 3.000,00**
LICENÇA DE USO	R\$ 1.600,00*	R\$ 1.600,00*
CABOS DE INTERLIGAÇÃO	R\$ 700,00	R\$ 700,00
CUSTO FINAL	R\$ 27.980,43	R\$ 61.980,43
* Valores anuais, sendo necessário renovação.		
* Valores estimados, pode ocorrer pequenas variações.		
CONCORRENTE 02		
SISTEMAS / COMPONENTES	CUSTO FINAL	
SISTEMA COMPLETO SEM MONITORAMENTO	R\$ 36.640,00*	
SISTEMA COMPLETO COM MONITORAMENTO	R\$ 92.000,00*	
* Os valores são referentes ao sistema completo, alterando somente o monitoramento assistido.		

Fonte: Autor (2025).

A fim de avaliar, de forma preliminar, a viabilidade comercial do sistema desenvolvido, realizou-se uma análise comparativa com os demais concorrentes disponíveis no mercado, que apresentam produtos com funcionalidade semelhantes. A comparação tem como objetivo demonstrar a diferença de investimento entre o sistema desenvolvido com os concorrentes.

Vale ressaltar que essa comparação considera apenas os custos diretos do sistema desenvolvido. Ressalta-se que os preços praticados por fabricantes concorrentes incluem diversos custos indiretos, tais como mão de obra, logística, suporte técnico, garantia, tributos,

margem de lucro, entre outros. Portanto, a comparação entre valores serve como referência de mercado, para contextualizar um potencial de aplicação da solução desenvolvida.

Tabela 24 - Análise comparativa de custos finais

ANÁLISE COMPARATIVA DE CUSTOS				
SISTEMA DESENVOLVIDO	CONCORRENTE 01		CONCORRENTE 02	
	PRODUTO 01	PRODUTO 02	SISTEMA SEM MONITORAMENTO	SISTEMA COM MONITORAMENTO
R\$ 863,05 – Prot. 01 e R\$ 491,41 – Prot. 02	R\$ 27.980,43	R\$ 61.980,43	R\$ 36.640,00	R\$ 92.000,00
ECONOMIA (R\$)	R\$ 27.117,38 R\$ 27.489,02	R\$ 61.117,38 R\$ 61.489,02	R\$ 35.776,95 R\$ 36.148,59	R\$ 91.136,95 R\$ 91.508,59
ECONOMIA (X)	≈ 32 vezes ≈ 57 vezes	≈ 72 vezes ≈ 126 vezes	≈ 42 vezes ≈ 74 vezes	≈ 107 vezes ≈ 187 vezes

Fonte: Autor (2025).

A análise comparativa realizada evidencia de forma clara a viabilidade econômica do sistema desenvolvido frente as concorrentes disponíveis no mercado. Enquanto outros concorrentes apresentam valores que variam de R\$ 27.117,38 até R\$ 91.136,95, o primeiro protótipo foi construído com R\$ 863,05, que demonstra que o sistema abre margens de lucro que podem variar de 32 até 107 vezes que outras alternativas comerciais, mantendo um ótimo nível de confiabilidade e precisão. Se compararmos com o segundo protótipo desenvolvido, com o valor de R\$ 491,41, a margem pode ser superior a 180 vezes.

5.4 ANÁLISE CRÍTICA: PONTOS FORTES E OPORTUNIDADES DE MELHORIAS

A avaliação crítica do sistema desenvolvido permite identificar os benefícios associados à sua aplicação, bem como as restrições que necessitam de atenção em futuras versões. Entre os benefícios, destaca-se a viabilidade econômica, custo significativamente inferior aos demais concorrentes, onde abre precedentes para margens de venda. Além disso, os resultados obtidos apresentaram uma ótima estabilidade e precisão, visto que, todos os erros cálculos mantiveram-se dentro dos limites que normas da área exigem. Outro ponto positivo é a fácil integração do sistema com o dispositivo móvel, no qual oferece rápida conectividade do *bluetooth*, sem a necessidade de adquirir licenças ou *softwares* específicos.

No entanto, algumas oportunidades de melhorias que pode ser levada em consideração para novas atualizações do sistema, é referente a durabilidade da bateria, que mesmo sendo suficiente para períodos de trabalho típicos, poderia ter uma durabilidade maior para aplicações de longa duração, além da utilização de componentes de durabilidade superiores.

5.5 CONCEPÇÃO FINAL DO PROJETO

A concepção final do sistema consolidou-se em uma solução funcional, compacto e visualmente limpo. A estrutura foi projetada de forma robusta e integrada, abrigando todos os componentes eletrônicos – incluindo extensômetro e todo o circuito. Dessa forma, a versão final do protótipo alia um sistema com facilidade operacional, instalação e manuseio, atendendo os requisitos definidos nas etapas iniciais do projeto. A Figura 69 representa o sistema eletrônico fixada na flange soldada.

Figura 69 - Sistema eletrônico interno



Fonte: Autor (2025).

Por fim, a Figura 70 apresenta a montagem final do sistema, contemplando todos os sistemas e componentes do conjunto.

Figura 70 - Montagem completa do sistema (isométrica)



Fonte: Autor (2025).

6 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do sistema eletrônico para medição de torque em equipamento de eixos rotativos atingiu com êxito os objetivos propostos inicialmente, além de atender também os requisitos solicitados na pesquisa do projeto informacional. Por meio de uma abordagem focada em baixo custo, foi possível desenvolver, construir e validar um equipamento funcional, capaz de realizar medições em tempo real com ótima precisão e confiabilidade.

Primeiramente, os resultados obtidos na fase de calibração demonstraram que o sistema apresenta erro máximo dentro dos limites estabelecidos por normas técnicas, como a ASTM E2624-09, que trata como satisfatórios variações de até $\pm 2,5\%$, sendo que o erro máximo encontrado, em termos de porcentagem, foi inferior a 1%.

Com base na norma ISO 5725-2, a mesma cita que um sistema de medição deve ser valido por meio dos dados obtidos na repetitividade, e que os limites aceitáveis devem ser definidos pelo usuário, ou pela aplicação. Com base na pesquisa realizada na fase de projeto informacional, determinou-se que o sistema deveria ter uma precisão ótima, avaliada em $\pm 1\%$. Através dos resultados obtidos na repetitividade, determinou-se a precisão do sistema em $\pm 3,85662$ N.m, valor correspondente ao ponto de medição com força aplicada de 160 kgf. Em termos de porcentagem, observou-se que a precisão do sistema é inferior a 0,5%, condizente com os requisitos do projeto informacional.

Outro ponto relevante é a resolução do sistema encontrado, estimado em 0,00757 N.m, no qual evidencia que o sistema tem uma excelente sensibilidade e capacidade de resposta. Essa resolução torna o sistema plenamente adequado para utilização em equipamentos agrícolas, onde os torques são, em sua maioria, elevados. Porém, com o desempenho alcançado, abre precedentes para sua aplicação em utilização em outros contextos, como no ambiente industrial e laboratorial, onde são exigidas medições mais refinadas e de torques de magnitudes inferiores.

A estabilidade do sistema, aliada à sua alimentação, foi avaliada experimentalmente, constatando-se que o sistema teve seu funcionamento contínuo e de forma adequada por cerca de 5 horas, não sendo evidenciado instabilidade ou reinicializações inesperadas. Embora esse tempo de operação possa parecer limitado, é importante ressaltar que o sistema de medição foi desenvolvido no âmbito experimental e coleta de dados, ou seja, seu funcionamento não será de forma contínua. Ainda assim, compreende-se que a ampliação da capacidade de autonomia

da bateria proporciona uma oportunidade de melhoria em futuras versões, especialmente para aplicações que demandam períodos mais prolongados de monitoramento.

Em relação ao custo benefício, um dos principais objetivos do sistema, verificou-se que o custo de fabricação do primeiro protótipo, incluindo sistema eletrônico, estrutura de fixação e estrutura de calibração, foi de aproximadamente R\$ 863,05. Para o segundo protótipo, desconsiderando o dispositivo de calibração, visto que poderá ser utilizado novamente para produção de novas unidades, o valor final foi reduzido para R\$ 491,41. Considerando outros equipamentos comercializados com finalidade semelhante, no qual apresentam preços variando entre R\$ 27.000,00 até valores próximos a R\$ 90.000,00, conclui-se que o sistema desenvolvido possui margem de lucro extremamente altas, onde será possível inserir todos os custos indiretos não calculados nesse estudo. A depender do modelo de comparação, a margem de lucro do sistema pode variar de 32 vezes até 180 vezes mais econômico em relação às soluções disponíveis no mercado.

Do ponto de vista funcional, o sistema apresenta um corpo compacto e de fácil manuseio, projetado para ser fixado entre a fonte de potência (colhedora automotriz) e o implemento agrícola - no caso deste estudo, uma plataforma para corte de milho. Embora a estrutura física tenha sido desenvolvida especialmente para essa aplicação, o sistema eletrônico apresenta caráter versátil, podendo ser facilmente adaptado para diversas outras aplicações, tanto no setor agrícola quanto em processos industriais, por exemplo, que demandam de monitoramento de torque.

A comunicação do sistema é realizada via *bluetooth*, permitindo a conexão para qualquer dispositivo Android, sendo necessário apenas o *download* de um aplicativo de monitoramento, no qual está disponível de forma gratuita. A interface de comunicação é simples, intuitiva e de fácil com o dispositivo móvel. Além disso, permite trabalhar com dois modos de operação: visualizando em tempo real os valores de torque ou, coletando dados e posteriormente exportando via extensão .csv, permitindo assim uma análise mais abrangente.

Por fim, este estudo se mostra fundamental para o aprimoramento de projetos dentro da empresa, visto que, além de possibilitar a medição do torque de equipamentos, os dados obtidos permitirão o aprimorar diversos aspectos construtivos, aumentando diretamente a eficiência e qualidade dos produtos. Além disso, o sistema viabiliza a formação de um banco de dados abrangente, possibilitando a análise do torque em diferentes condições de trabalho e operação, como variedade do milho, tipo de solo, região geográficas, níveis de umidade, entre outros.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

É de suma importância a continuidade do projeto, tendo em vista as possíveis melhorias vistas durante a validação do sistema. Em novos estudos, é possível embarcar mais tecnologia para sistema, como monitoramento de vibração, velocidade e tempo de trabalho, por exemplo. Além disso, diversos outros estudos podem ser feitos para versões futuras, buscando qualificar o produto. Podemos citar como sugestões de trabalhos futuros:

- Avaliar a repetitividade de forma ascendente e descendente, analisando a histerese e assim, podendo melhorar a precisão do sistema;
- Avaliar o tempo de duração da bateria e sua respectiva interferência com os dados;
- Avaliar o comportamento do sistema sob condições térmicas adversas, mensurando o impacto nos dados;
- Realizar o cálculo dos custos indiretos do sistema.

Os resultados obtidos atestam o potencial do projeto como uma alternativa promissora para medições de torque em aplicações práticas, além de abrir caminhos para futuras melhorias e ampliações, tanto em termos de desempenho quanto de aplicabilidade em outros setores. Dado seu viés tecnológico, o sistema apresenta como base para novos estudos e inovações, como telemetria dos equipamentos, automação de diagnósticos e aprimoramento da agricultura de precisão.

REFERÊNCIAS

ALBERTAZZI, ARMANDO G. JR.; SOUSA, ANDRÉ R. DE. **Fundamentos de metrologia científica e industrial**. São Paulo: Edgard Blücher, 2008.

ANZILIERO, DARLEI. **Histórico de semeadoras no Brasil: Ênfase em inovação**. Rio de Janeiro: Editora Epitaya, 2021.

BALASTREIRE, LUIZ ANTÔNIO. **Máquinas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987.

BAXTER, M. **Projeto de produto: guia prático para o design de novos produtos**. São Paulo: Edgard Blücher, 2000.

BECKWITH, T. G.; MARANGONI, R. D.; LIENHARD, J. H. **Mechanical measurements**. 6th ed. Pearson, 2007.

BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R. **Resistência dos materiais**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2017.

BEER, FERDINAND P. et al. **Mecânica dos materiais**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2010.

BUDYNAS, RICHARD G.; NISBETT, J. KEITH. **Elementos de máquinas de Shigley: projeto de engenharia mecânica**. Porto Alegre: AMGH Editora LTDA, 2011.

CALLISTER, WILLIAM D. JR. **Fundamentos da ciência e engenharia dos materiais**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira 2018/2019**. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos 2018/2019, p. 1–29, 2019.

CONAB. **Perspectivas para a agropecuária – safra 2022/23**. Companhia Nacional de Abastecimento. Brasília: CONAB, 2022. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>. Acesso em: 20 jun. 2025.

DERRY, T. K.; WILLIAMS, T. I. **A short history of technology: from earliest times to A.D. 1900**. New York: Dover Publications, 1977.

EVOLVE MVP. **O que é ciclo de vida do produto?** Evolve MVP, 2024. Disponível em: <https://evolvemvp.com/o-que-e-ciclo-de-vida-do-produto/>. Acesso em: 21 fev. 2025.

EXCEL SENSORES. **Excel Sensores – Extensômetros e Transdutores Extensométricos**. Disponível em: <https://excelsensor.com.br/>. Acesso em: 12 jun. 2025.

FORNASIERI FILHO, D. **Manual da cultura do milho**. Jaboticabal – SP: Funep, 2007. 576 p.

FORZA J. MALUCELLI. **Conheça mais sobre o sistema de colheita axial**. Disponível em: <https://www.forzajmalucelli.com.br/conheza-mais-sobre-o-sistema-de-colheita-axial>. Acesso em: 20 set. 2024.

FUTURO AGRO NEGÓCIOS. **Futuro Agronegócios: notícias, análises e novidades do setor agro**. Disponível em: <https://www.futuroagronegocios.com.br/>. Acesso em: 3 mar. 2025.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. v. 1.

HERTZBERG, RICHARD W. **Deformation and fracture mechanics of engineering materials**. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, 1995.

HIBBELER, R. C. **Estática e dinâmica**. 13. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2016.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2015.

HUB ASIMOV ACADEMY (2024, dezembro). **Regressão Linear: conceitos fundamentais e aplicações práticas**. Recuperado em 18 de julho de 2025, de hub.asimov.academy/blog/regressao-linear/

KOTLER, PHILIP; KELLER, KEVIN LANE. **Administração de marketing**. 14. ed. São Paulo: Pearson, 2012.

MANTOVANI, E. C. **Cultivo do milho**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária: Sistemas de Produção, 4. ed., set. 2008. ISSN 1676-012X.

MAZOYER, MARCEL; ROUDART, LAURENCE. **A history of world agriculture: from the Neolithic Age to the current crisis**. London: Earthscan; New York: Monthly Review Press, 2006.

PAHL, G.; BEITZ, W. **Engineering design: a systematic approach**. 3. ed. London: Springer, 2005.

PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H. **Projeto na engenharia: fundamentos do desenvolvimento eficaz de produtos, métodos e aplicações**. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

PEREIRA, J. **Eficiência e produtividade no uso de maquinário agrícola**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola, v. 27, n. 1, p. 45–52, 2020.

QUEIROZ, D. M.; SOUZA, C. M. A.; PINTO, F. A. C.; MANTOVANI, E. C. **Simulação dos processos de trilha e separação em colhedoras de grãos**. Revista Engenharia na Agricultura, Viçosa, v. 12, n. 2, p. 105-117, 2004.

RIBEIRO, PAULO R. et al. **Fundamentos da metrologia científica e industrial**. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

ROZENFELD, HENRIQUE et al. **Gestão do processo de desenvolvimento de produtos: referência técnica em PD&P**. São Paulo: Edusp, 2006.

RUDENKO, N. **Elementos de máquinas**. 6. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1999.

SANTOS, A.; COSTA, L. **Agricultura de precisão e o papel dos equipamentos agrícolas**. Campinas: Editora Agronômica, 2017.

SANTOS, J. P. DOS; MANTOVANI, E. C. **Perdas de grãos na cultura do milho: pré-colheita, colheita, transporte e armazenamento**. Sete Lagoas: EMBRAPA-CNPMS, 1997. 40 p. (Circular técnica, 24).

SILVA, D. M. **Instrumentação e medidas**. São Paulo: Érica, 2015.

SLACK, NIGEL et al. **Administração da produção**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

SNAPMAKER. **Snapmaker – Modular 3-in-1 3D Printers**. Disponível em: <https://www.snapmaker.com/en-US/>. Acesso em: 13 abr. 2025.

SRISVASTAVA, A. K.; GOERING, C. E.; ROHRBACH, R. P.; BUCKMASTER, D. R. **Grain harvesting**. In: *Engineering of Agriculture Machines*. St. Joseph, Michigan: ASABE, 1996. p. 403-436.

ULRICH, K. T.; EPPINGER, S. D. **Product design and development**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2012.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP. **Extensômetros elétricos**. Escola de Engenharia de Lorena – EEL/USP. Disponível em: https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5840793/LOM3086/Extensometros_eletricos.pdf. Acesso em: 23 jun. 2025.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP. **Apostila de resistência dos materiais – FIS1059**. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Disponível em: https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/fisicaequimica/relacaodocentes973/fis1059_arquivo-02.pdf. Acesso em: 21 jun. 2025.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP. **Extensometria básica**. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Departamento de Engenharia Civil. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariacivil/nepae/extensometria-basica.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2025.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – UFSC. **Apostila de extensometria – strain gages**. Laboratório GRANTE – Grupo de Análise e Projeto Mecânico. Disponível em: <https://grante.ufsc.br/download/Extensometria/SG-Apostila.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2025.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ – UFPR. **Strain gauge – extensometria**. Departamento de Engenharia Mecânica – DEMEC/UFPR. Disponível em: http://servidor.demec.ufpr.br/disciplinas/TM117/Arquivos%20H%E9lio/Strain_gauge%20extensometria.pdf. Acesso em: 23 jun. 2025.

USINA IND. COMÉRCIO E IMPORTAÇÃO – USINAINFO. **UsinaInfo: Arduino, Robótica, Componentes Eletrônicos e ...**. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/>. Acesso em: 15 jun. 2025.

VENCETUDO. **Vencetudo Indústria e Comércio Ltda**. Disponível em: <https://vencetudo.ind.br/pt-br>. Acesso em: 5 fev. 2025.

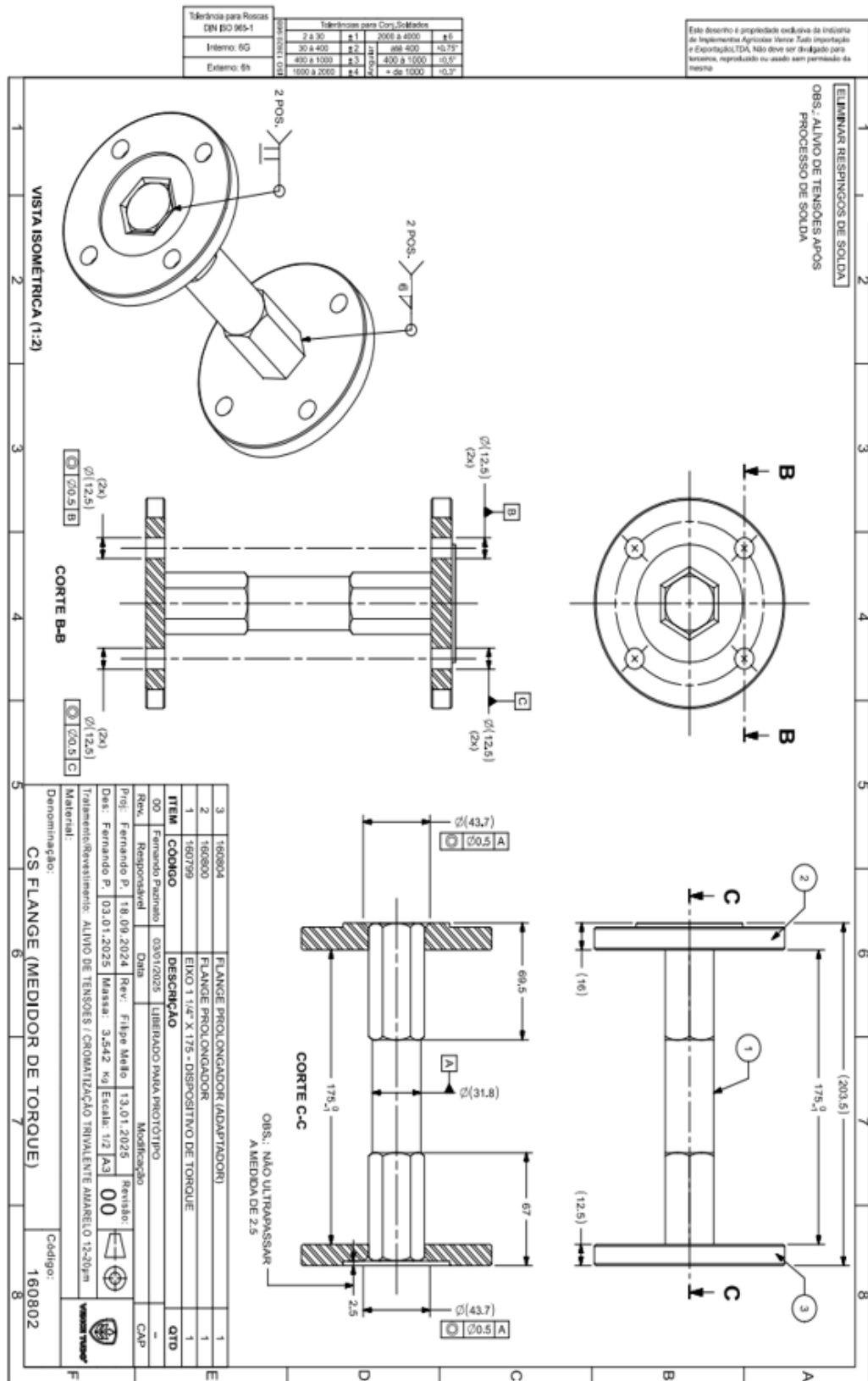
APÊNDICE

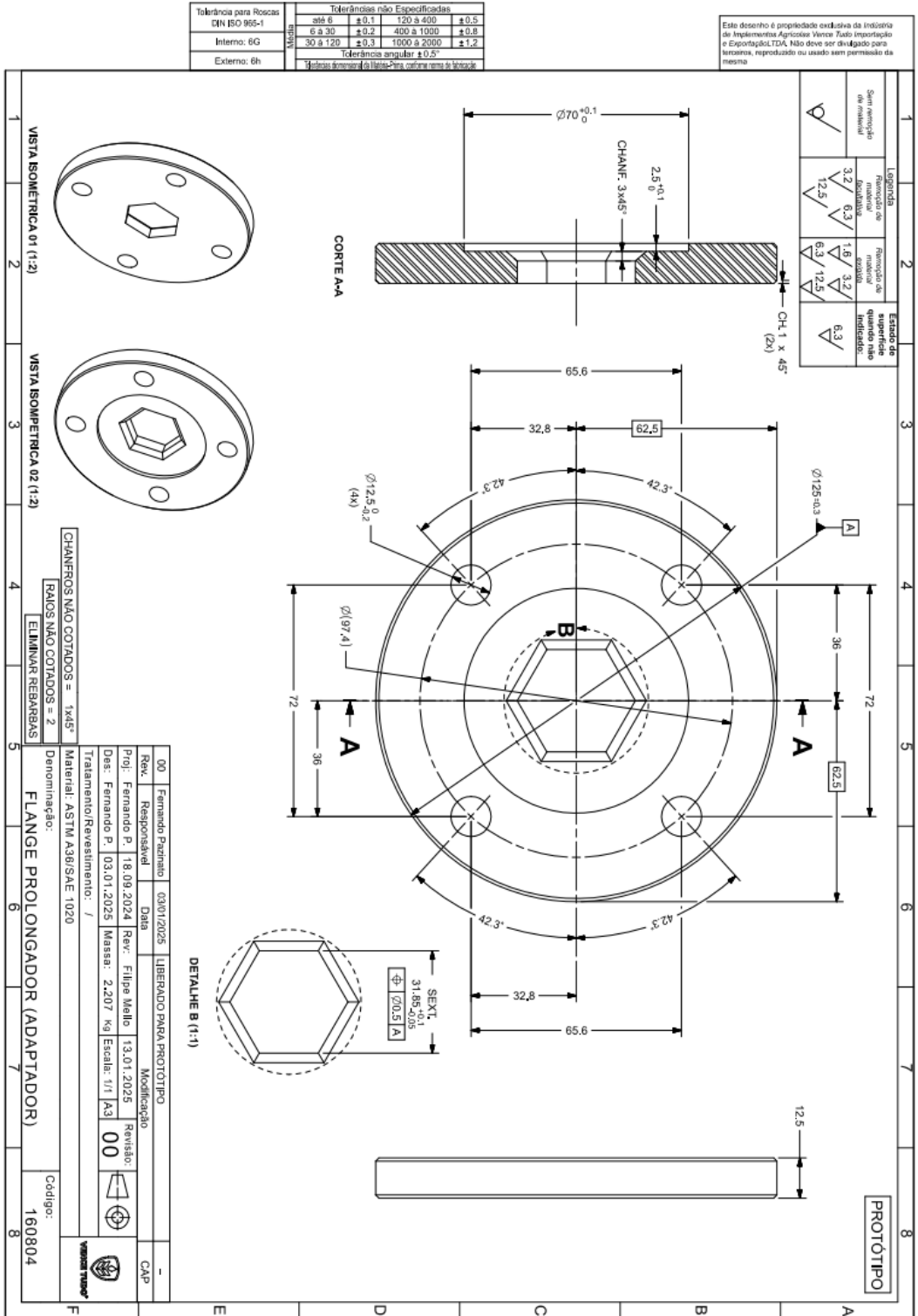
Apêndice I – Ciclo de vida do produto

Fases do ciclo de vida do produto	Entradas		Saídas	
	<i>Planejamento estratégico</i>	<i>Meio ambiente e recursos</i>	<i>Desejadas</i>	<i>Indesejadas</i>
<i>Projeto e produção</i>	Desenvolvimento do projeto e detalhamento do produto, produção dos componentes, montagem do equipamento na linha de produção, prever reposição de peças.	Empresa de médio porte, onde possui computadores para realizar o projeto, além dos equipamentos e ferramentas necessário como impressora 3D, ferro de solda, aparelho de solda, fresa, torno CNC e corte Laser, além de mão de obra técnica para realização da produção e montagem.	Elaboração e construção do projeto corretamente, com o mínimo de não conformidades.	Não conformidades quanto ao desenvolvimento do projeto e na produção e montagem de peças e componentes.
<i>Distribuição</i>	Disponibilizar ao consumidor contatos via	Recurso financeiro para terceirização da	Transporte adequado ao consumidor	Danos ao produto devido ao transporte

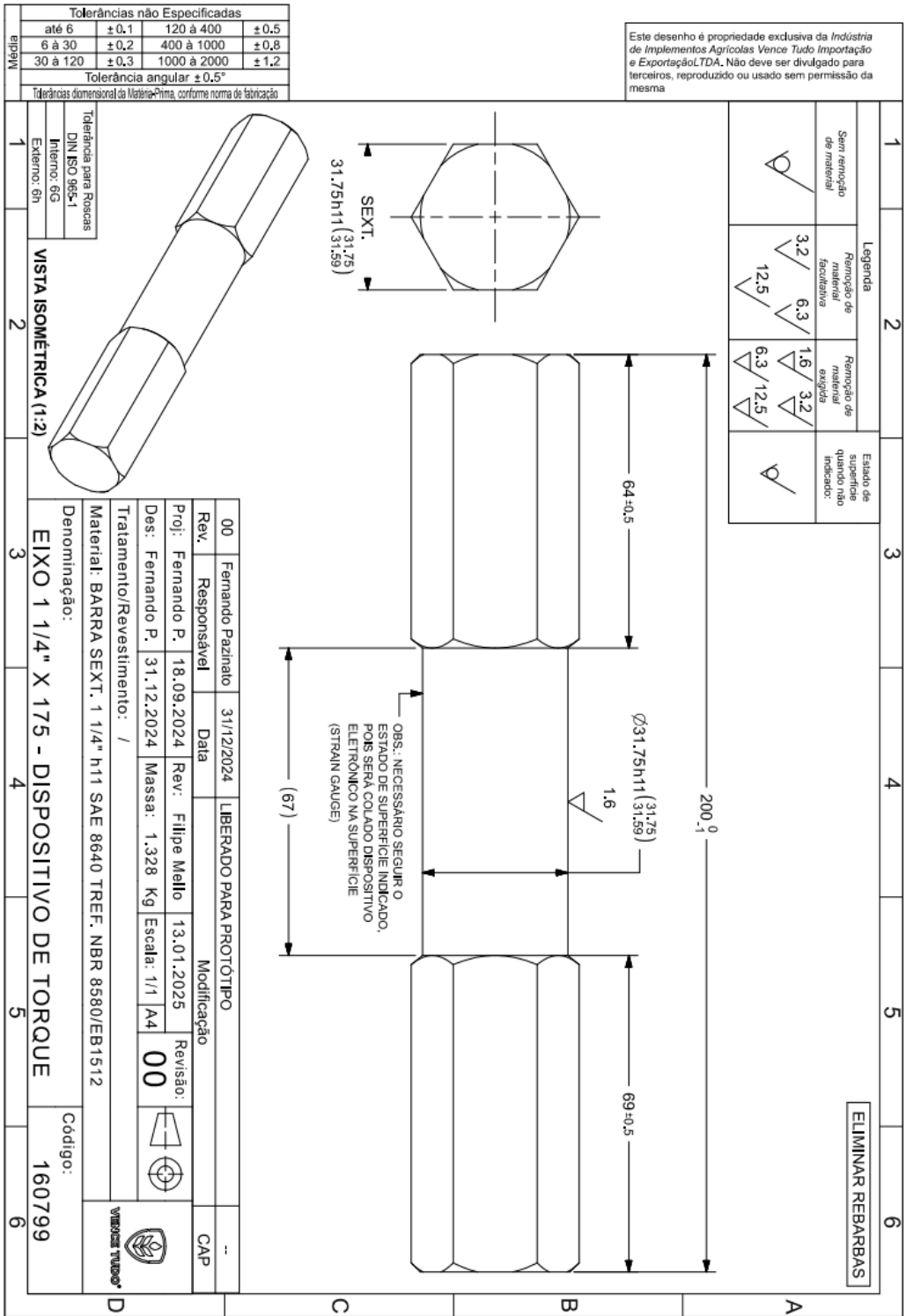
	<p>Whasapp e e-mail.</p> <p>Terceirização da empresa de transporte</p>	<p>empresa de transporte, juntamente com equipe de atendimento ao cliente final.</p>	<p>final, com embalagem segura para não causar danos ao produto.</p>	<p>inadequado ou embalagem do produto realizada de forma errada.</p>
<p><i>Uso e/ ou operação</i></p>	<p>O equipamento deve ser acoplado diretamente ao eixo cardan do equipamento, de forma direta.</p>	<p>Disponibilidade do trator e de um equipamento que contém transmissão por eixo cardan.</p>	<p>Equipamento de fácil instalação e operação, sem que haja necessidade de uma grande quantidade de ferramentas e pessoas. Tempo de instalação relativamente baixo. Sem necessidade de mão de obra especializada.</p>	<p>Produtos com problemas de instalação ou de operação. Problema de comunicação ou perda de dados.</p>
<p><i>Descarte</i></p>	<p>O produto deve ser desenvolvido utilizando ao máximo de componentes e peças já existentes no mercado.</p>	<p>Será utilizado diversos componentes eletrônicos e polímeros, produtos que agredem ao meio ambiente.</p>	<p>Reciclagem correta do equipamento, afim de reduzir os impactos ambientais.</p>	<p>Danos ao meio ambiente devido ao descarte incorreto do produto e componentes.</p>

Apêndice III – Desenhos Técnicos da estrutura de fixação

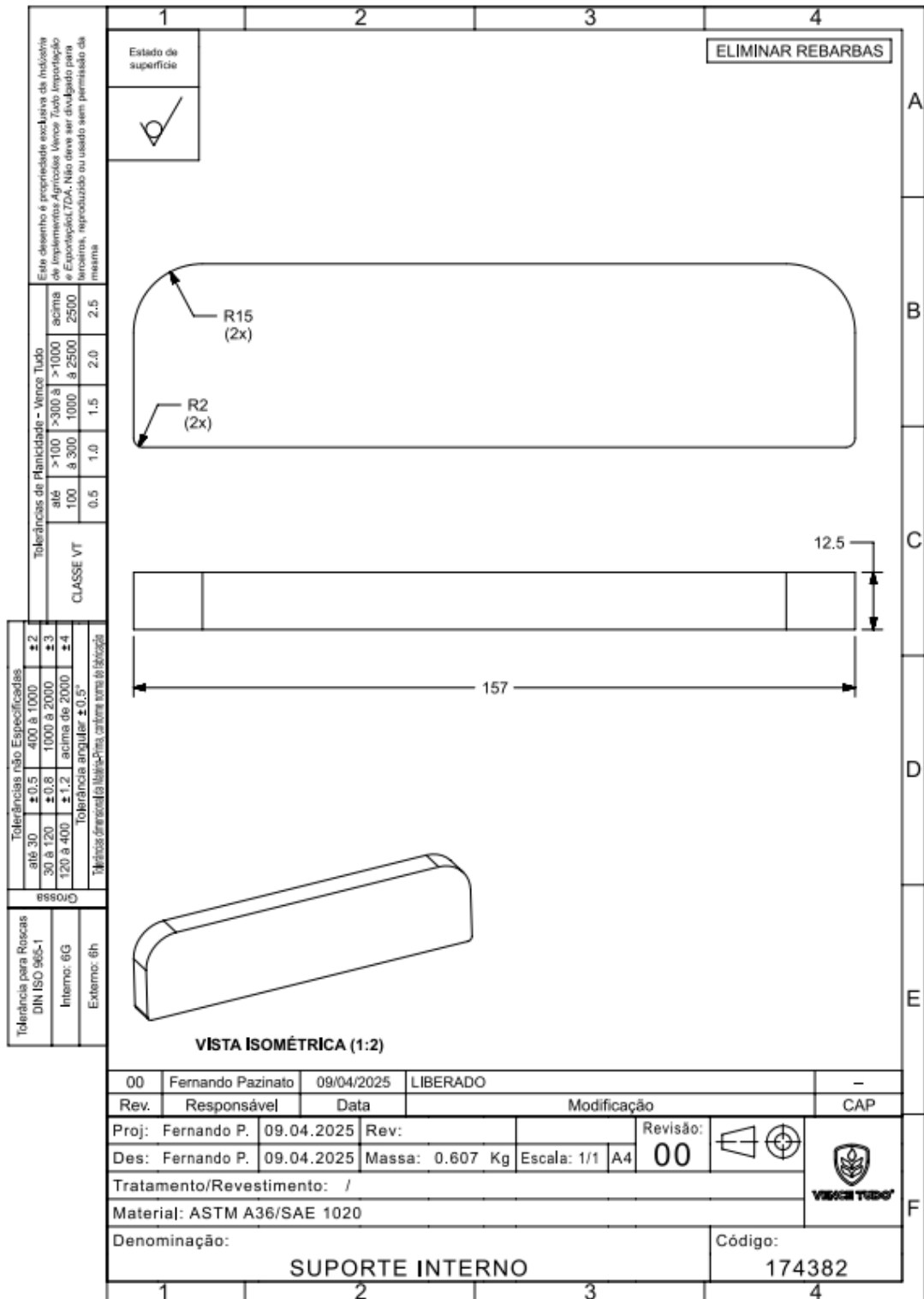




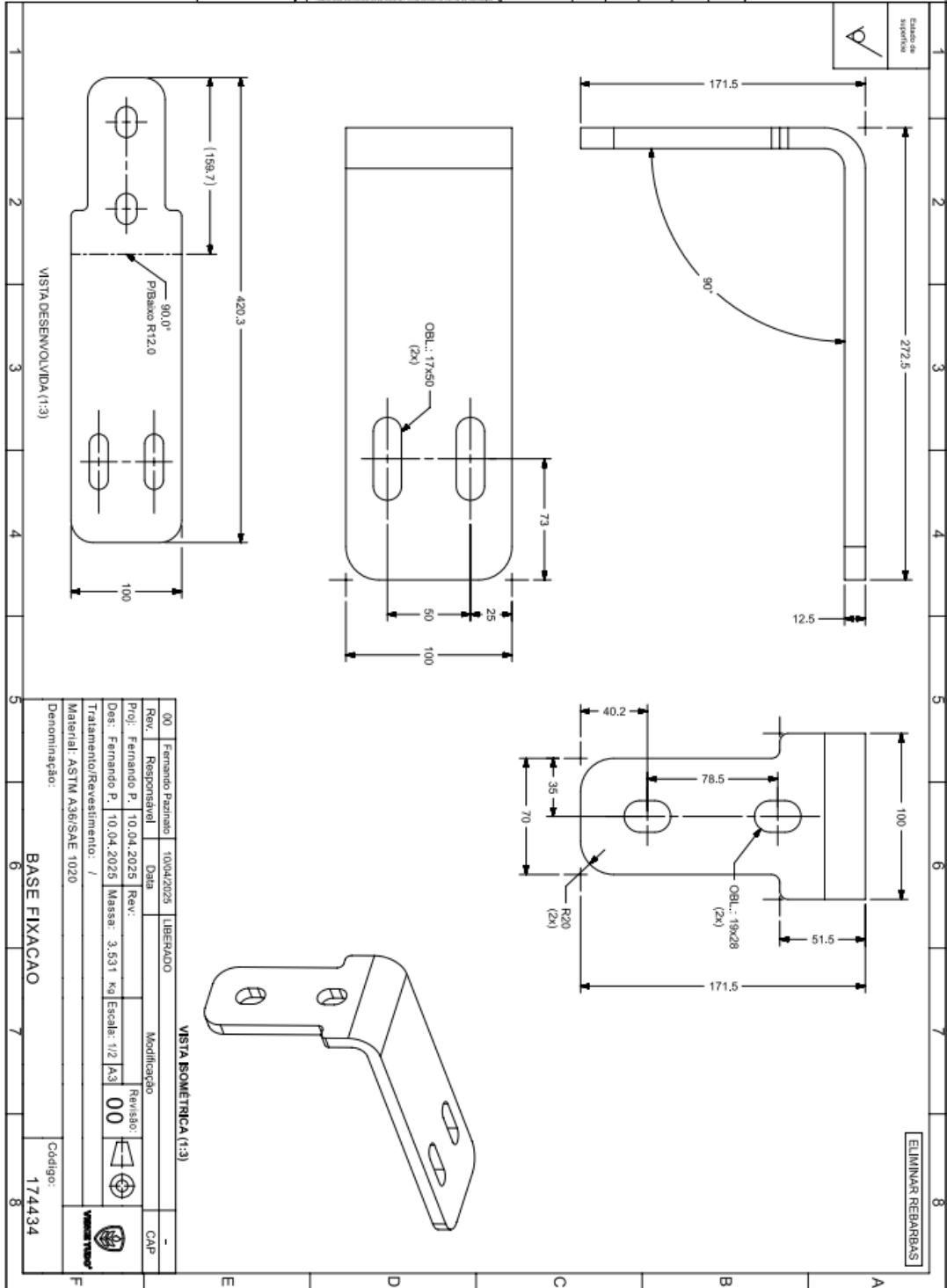
Este desenho é propriedade exclusiva da Indústria de Implementos Agrícolas Venca Tudo Importação e Exportação LTDA, não deve ser divulgado para terceiros, reproduzido ou usado sem permissão da mesma.

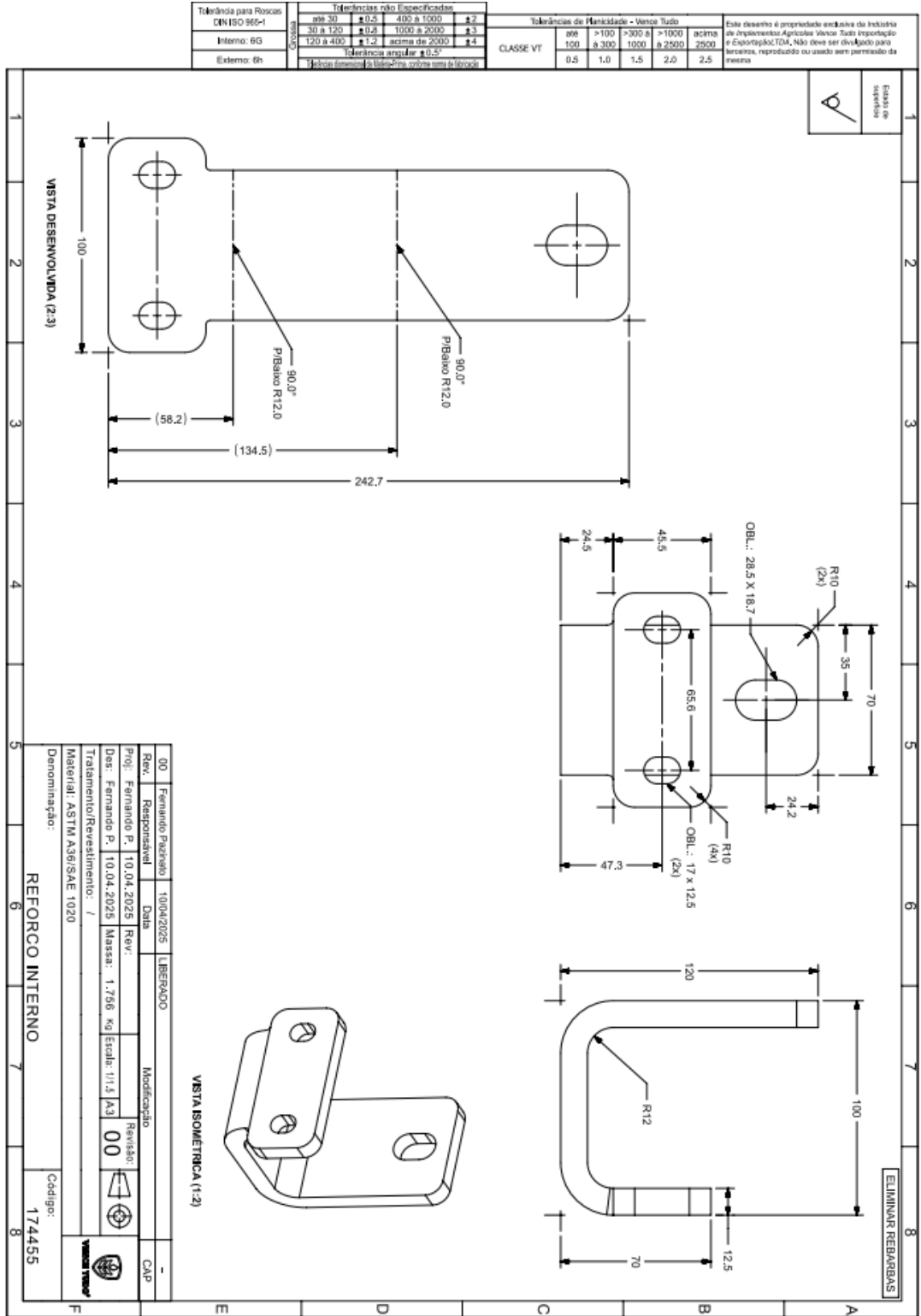


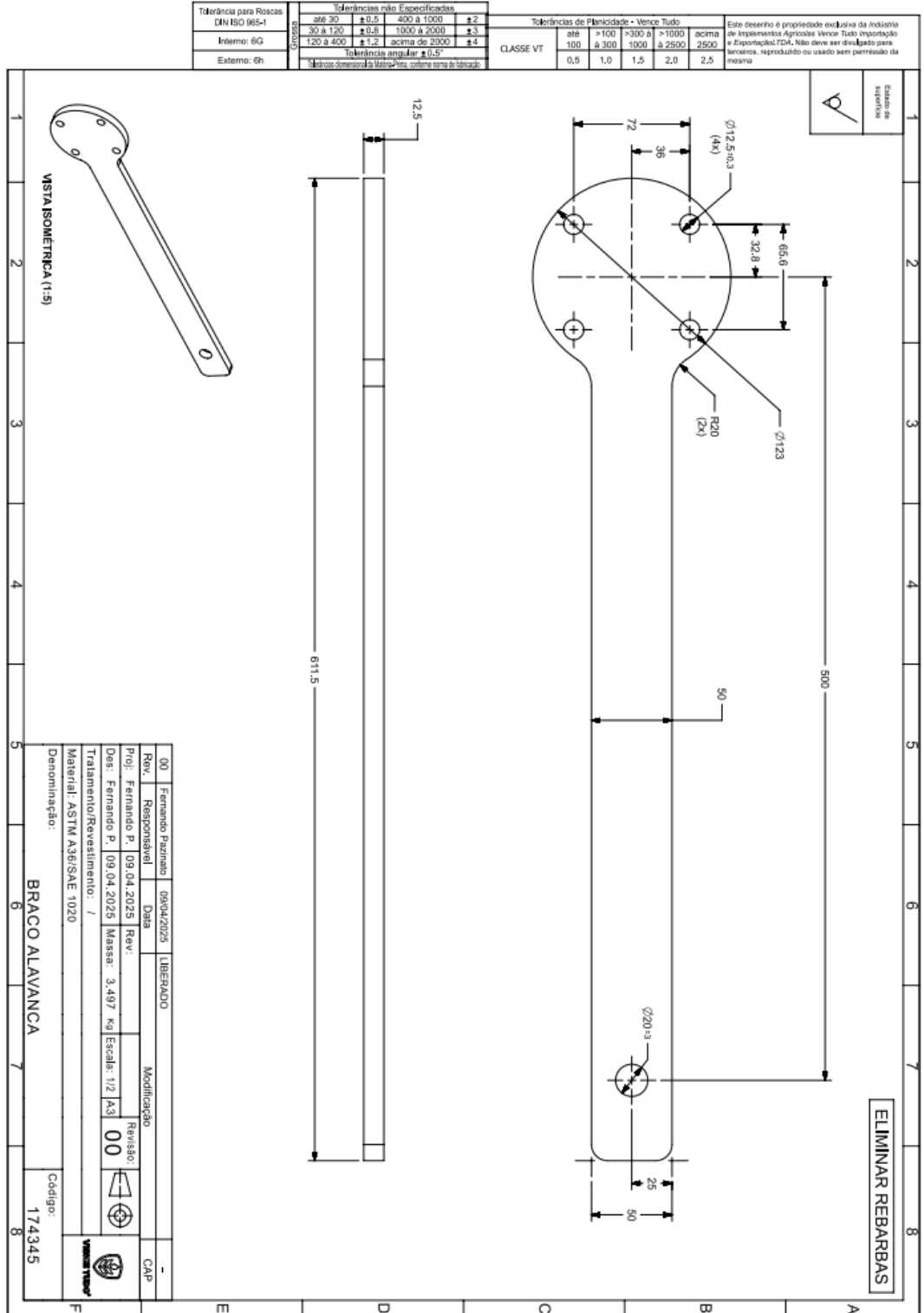
Apêndice V – Desenhos Técnicos da estrutura de calibração

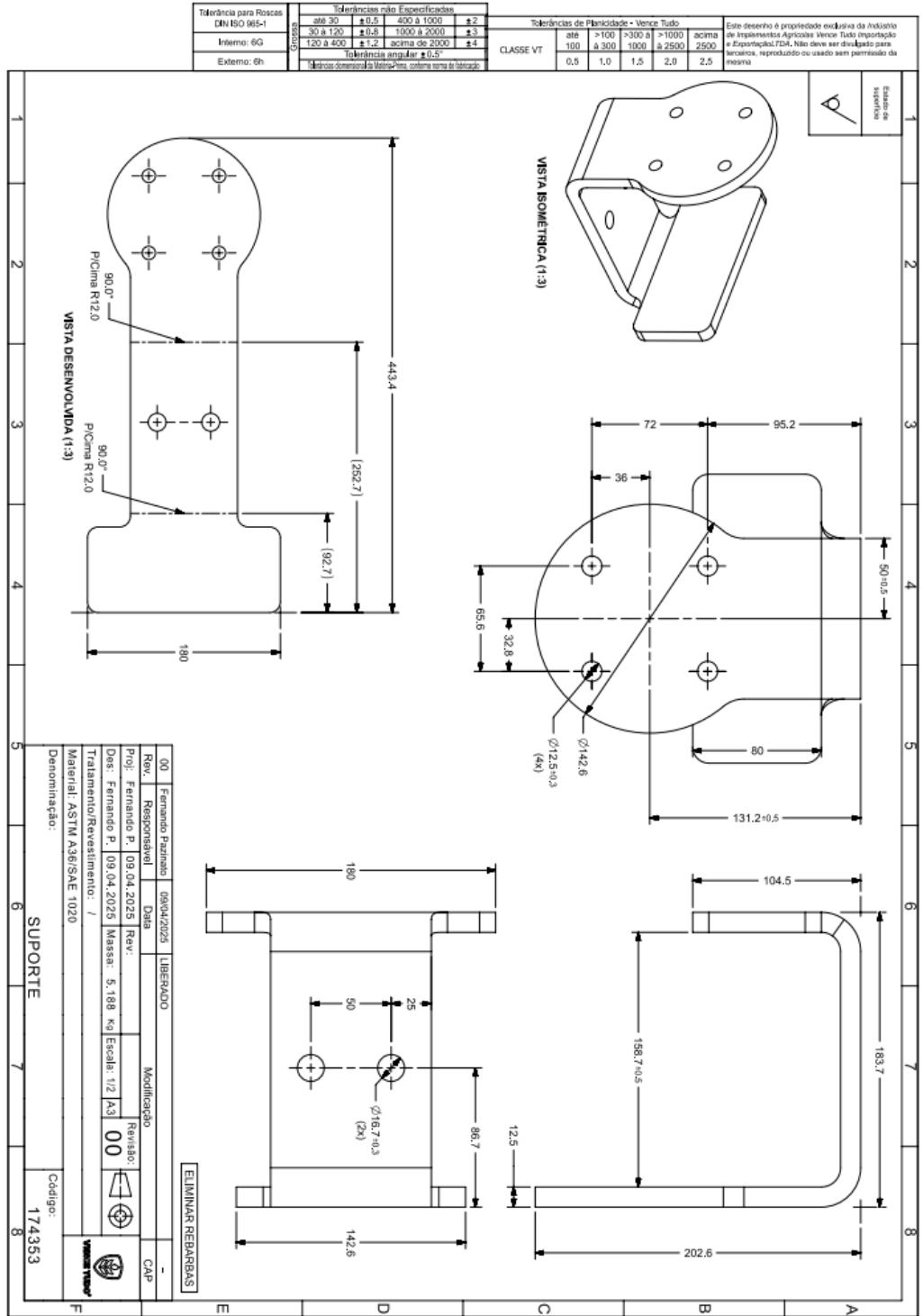


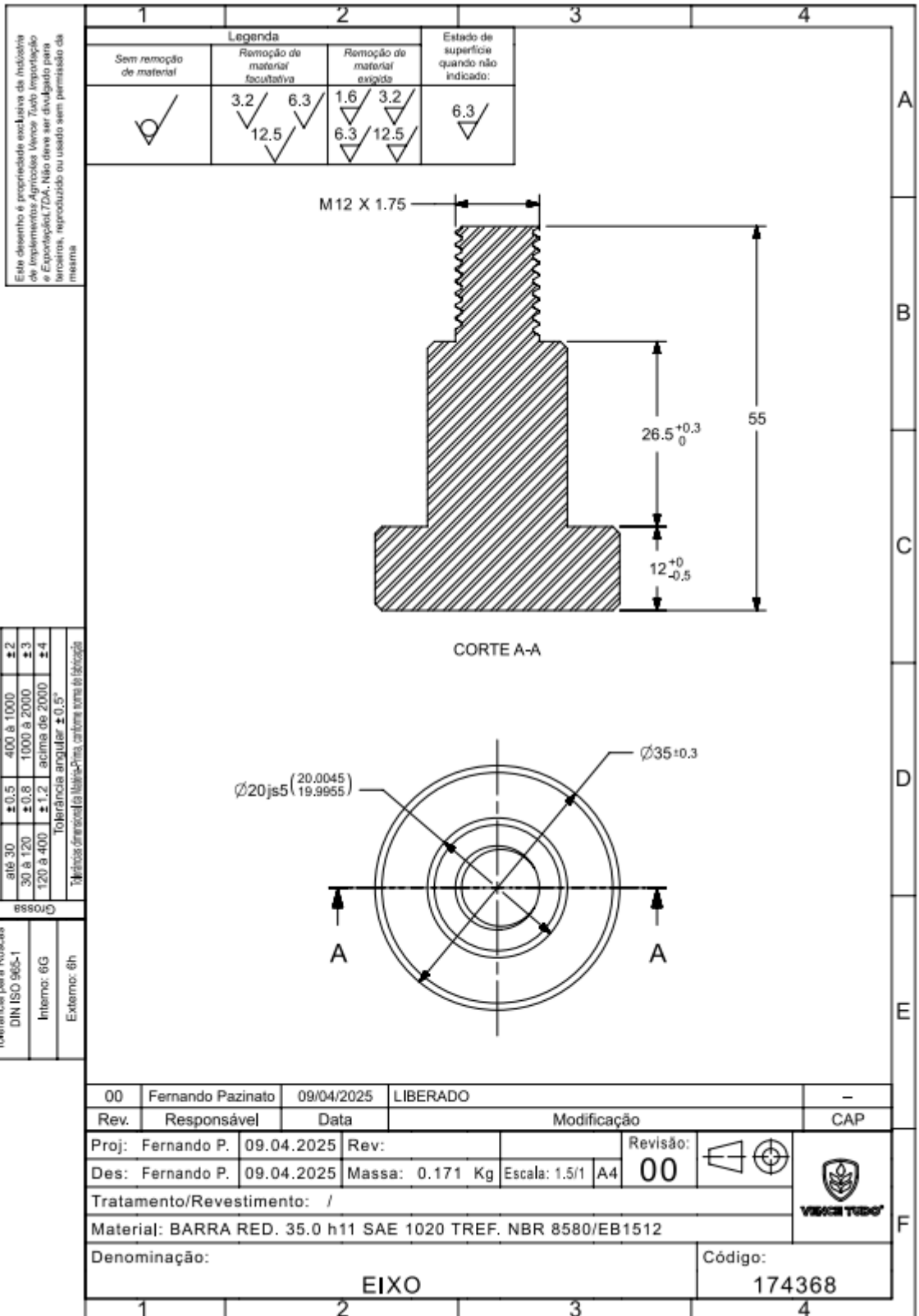
Tolerância para Roscas DN ISO 965-1	Tolerâncias não Especificadas			Tolerâncias de Planicidade - Vence Tudo	Este desenho é propriedade exclusiva da Indústria de Implementos Agrícolas Vence Tudo Importação e Exportação LTDA. Não deve ser divulgado para terceiros, reproduzido ou usado sem permissão da empresa.			
	até 30	± 0,5	400 a 1000			± 2		
	30 a 120	± 0,8	1000 a 2000			± 3		
	120 a 400	± 1,2	acima de 2000			± 4		
Interno: 6G	Tolerância angular ± 0,5°			CLASSE VT				
Externo: 6h	Tolerância dimensional à tolerância mais restrita entre as tabelas:			até 100	100 a 300	300 a 1000	1000 a 2500	acima de 2500
				0,5	1,0	1,5	2,0	2,5







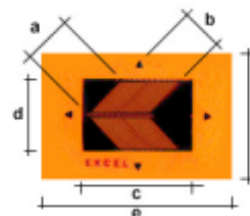




ANEXOS

Anexo I – Informações técnicas – Extensômetro de resistência elétrica

EXTENSÔMETROS COLÁVEIS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

MODELOS
DUPLOS TIPO ESPINHA DE PEIXE

IDENTIFICAÇÃO				DIMENSÕES						
BASE E METAL	COMPENSAÇÃO DE TEMPERATURA	TAMANHO E FORMA	RESISTÊNCIA ELÉTRICA (OHMS)	OPÇÕES DISPONÍVEIS	ESPAÇO DA GRELHA		ESPAÇO DAS GRELHAS COM SEUS TERMINAIS		ESPAÇO DA BASE	
					comprimento (a)	largura (b)	comprimento (c)	largura (d)	comprimento (e)	largura (f)
PA	06	060 TA	350	B; S; L	2mm	3mm	5mm	3,5mm	9mm	8mm
PA	09	060 TA	350							
PA	13	060 TA	350							
PA	06	125 TA	350	B; S; L	3mm	4mm	7mm	4,5mm	11mm	9mm
PA	09	125 TA	350							
PA	13	125 TA	350							

INFORMAÇÕES TÉCNICAS

FATOR DE SENSIBILIDADE (Gage Factor)

Extensômetros elétricos são transdutores. Isto é, convertem uma grandeza que se quer medir, em outra, que se pode medir mais facilmente.

No caso, convertem uma deformação ϵ , que se quer medir, numa variação de resistência elétrica, a ser medida de forma mais acessível.

Detalhando melhor: convertem uma variação de comprimento em relação a um comprimento inicial $\epsilon = \Delta L / L$, numa variação de resistência elétrica em relação a uma resistência inicial $\Delta R / R$.

Este fator de conversão é conhecido como **FATOR DE SENSIBILIDADE** do extensômetro (gage factor), sendo expressado por:

$$\text{FATOR DE SENSIBILIDADE} = (\Delta R/R) / (\Delta L/L) = (\Delta R/R) / \epsilon$$

O Fator de Sensibilidade depende, assim, do material com que é feito o condutor elétrico do extensômetro.

Sendo este material a liga metálica constantan, o Fator de Sensibilidade é sempre 2,1, que é o que ocorre na linha de extensômetros elétricos da EXCEL SENSORES.

Caso a utilização dos extensômetros elétricos seja a produção de outros transdutores daí derivados, como transdutores de força (células de carga), de pressão, de torque, etc, o Fator de Sensibilidade, embora presente, não altera o processo de sua fabricação e utilização.

Caso a utilização dos extensômetros elétricos seja em extensometria, alguns instrumentos de leitura, mas não todos, apresentam o recurso de se poder regular o "ganho" do aparelho pelo Fator de Sensibilidade do extensômetro, permitindo que também seja utilizado com extensômetros de outros materiais. Neste caso, fornecemos o valor do Fator de Sensibilidade do extensômetro ao lado da identificação do seu lote, pois ele varia de lote para lote, apenas na sua segunda casa decimal.

TAMANHOS E FORMAS GEOMÉTRICAS DOS EXTENSÔMETROS

Conceitos fundamentais sobre a atuação dos extensômetros orientam a nossa compreensão e raciocínio para a sua escolha, face a diversidade de tamanhos e formas geométricas existentes.

Quanto ao tamanho:

O extensômetro mede a deformação do local onde está aplicado pela variação de sua resistência elétrica. Como esta resistência ocupa uma determinada área, formada pelo comprimento e largura de sua grade, é sob esta área que ele irá "captar" a deformação. Supondo-se que em diferentes pontos desta área houver deformações diferentes, para a área completa, a variação de resistência elétrica corresponderá à deformação média nela ocorrida.

Isto, de certa forma, explica porque se tem extensômetros de tamanhos (e áreas) muito diversos, sendo que alguns, de tão pequenos, tendem a se aproximar do tamanho de um ponto. Por outro lado, existem materiais muito heterogêneos, onde também se pretende medir deformações. Exemplos clássicos são rochas e concreto. A heteroge-

neidade é tal que se o extensômetro for muito pequeno não se lê nada representativo. Tem-se, portanto, a necessidade de extensômetros grandes, cuja área leve a uma deformação média que considere como homogêneo o material que, na nossa visão normal, é heterogêneo.

Outro fator a ser considerado é a própria dimensão da peça, e nela, do local a ser analisado, que muitas vezes nos conduz ao tamanho do extensômetro que é possível utilizar.

É bom destacar que, para extensômetros muito pequenos a sua manipulação torna-se mais difícil, e muito mais precisa e rigorosa deve ser a sua localização na peça, onde um pequeno desvio pode significar que ele está num outro ponto fora do desejado.



Quanto à forma:

O extensômetro é feito para medir só as deformações que ocorrem ao longo de seu eixo principal, isto é, no sentido longitudinal da grade. Assim sendo, ele é seletivo na indicação das deformações. Esta propriedade nos obriga a identificar previamente em que sentido deverão ocorrer as deformações no local em estudo. E a utilização deverá ser, em princípio, de um extensômetro unidirecional.

Mas, se o objetivo são deformações situadas a 45° do eixo da peça, provocadas por esforços de torção ou cisalhamento, existem os modelos unidirecionais a 45°, à direita ou à esquerda, e os modelos espinha de peixe, que são duplos, 45° à direita e à esquerda ao mesmo tempo.

Por vezes pretende-se determinar as deformações principal e secundária de uma peça, situadas uma

da outra a 90°. Para tanto existem as rosetas duplas a 90°.

E quando não se sabe qual é o sentido da deformação principal, pode-se utilizar do princípio de medir-las em 3 direções diferentes, em ângulos pré-definidos entre si, extraindo-se a resultante pelo Círculo de Mohr. Assim existem os modelos de roseta tripla a 90° e 120°.

Existem também extensômetros voltados para aplicações específicas, como os modelos diafragma, que captam deformações existentes em formas tal como um "fundo de copo", quando o mesmo está instalado numa tubulação submetida à uma pressão interna, que provoca a deformação da membrana deste "fundo de copo", daí resultando um sensor de pressão.

EXTENSÔMETROS AUTO-COMPENSADOS

Os extensômetros são sensores que colados num local e conectados à instrumentação apropriada passam a indicar as deformações deste local, a partir de um instante inicial. Com estas informações afere-se as forças aplicadas e as tensões envolvidas.

Entretanto, se no local também houver variações de temperatura, haverá também a correspondente deformação térmica, de dilatação ou contração, cuja indicação se somará às deformações mecânicas, que, normalmente, são exclusivamente as que nos interessam.

É nesse sentido que existem extensômetros que, aproximadamente, auto-compensam, por si só, dentro de uma faixa de temperatura, as deforma-

ções térmicas correspondentes a um determinado coeficiente, e as leituras assim feitas passam a se referir apenas às deformações mecânicas. São os extensômetros auto-compensados, cuja auto-compensação, portanto, refere-se a um determinado coeficiente de dilatação térmica. Comercialmente, entretanto, estão restritos a apenas alguns coeficientes, como seja, 11 ppm/oC (06 ppm/oF), correspondendo a aços em geral e concreto, 16 ppm/oC (09 ppm/oF), correspondendo a várias composições de aço inoxidável, e 23 ppm/oC (13 ppm/oF), correspondendo ao alumínio.

Origina-se, desta forma, a designação corriqueira de "extensômetro para aço", ou "para inox", ou "para alumínio".

ENSAIOS EM TEMPERATURA ACIMA DA AMBIENTE

Os extensômetros EXCEL, constituídos com base de políimida e grade metálica de constatan, em sua configuração básica, sem os opcionais de pontos de solda em seus terminais, ou fios a ele soldados, podem ser utilizados em temperaturas até 175°C, podendo chegar a 200°C.

Para temperaturas superiores, os extensômetros são de outros materiais para base e grade, apresentando características diferentes, e não fazem parte da nossa linha de fabricação.

Os pontos de solda, executados nos terminais dos extensômetros, ou nas conexões necessárias, para a fixação dos fios condutores elétricos, em liga eutética com 63% de estanho e 37% de chumbo, suportam a temperatura máxima de 120°C, excepcionalmente um pouco mais, já com a solda se tornando pastosa, pois se liquefaz a 183°C. Razão esta que também limita a 120°C a temperatura de utilização dos extensômetros EXCEL que apresentam pontos de solda em seus terminais, isto é, as opções "S" e "L".

Anexo II – Datasheet HX 711



HX711

24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales

DESCRIPTION

Based on Avia Semiconductor's patented technology, HX711 is a precision 24-bit analog-to-digital converter (ADC) designed for weigh scales and industrial control applications to interface directly with a bridge sensor.

The input multiplexer selects either Channel A or B differential input to the low-noise programmable gain amplifier (PGA). Channel A can be programmed with a gain of 128 or 64, corresponding to a full-scale differential input voltage of $\pm 20\text{mV}$ or $\pm 40\text{mV}$ respectively, when a 5V supply is connected to AVDD analog power supply pin. Channel B has a fixed gain of 32. On-chip power supply regulator eliminates the need for an external supply regulator to provide analog power for the ADC and the sensor. Clock input is flexible. It can be from an external clock source, a crystal, or the on-chip oscillator that does not require any external component. On-chip power-on-reset circuitry simplifies digital interface initialization.

There is no programming needed for the internal registers. All controls to the HX711 are through the pins.

FEATURES

- Two selectable differential input channels
- On-chip active low noise PGA with selectable gain of 32, 64 and 128
- On-chip power supply regulator for load-cell and ADC analog power supply
- On-chip oscillator requiring no external component with optional external crystal
- On-chip power-on-reset
- Simple digital control and serial interface: pin-driven controls, no programming needed
- Selectable 10SPS or 80SPS output data rate
- Simultaneous 50 and 60Hz supply rejection
- Current consumption including on-chip analog power supply regulator:
 - normal operation $< 1.5\text{mA}$, power down $< 1\mu\text{A}$
- Operation supply voltage range: 2.6 ~ 5.5V
- Operation temperature range: $-40 \sim +85^\circ\text{C}$
- 16 pin SOP-16 package

APPLICATIONS

- Weigh Scales
- Industrial Process Control

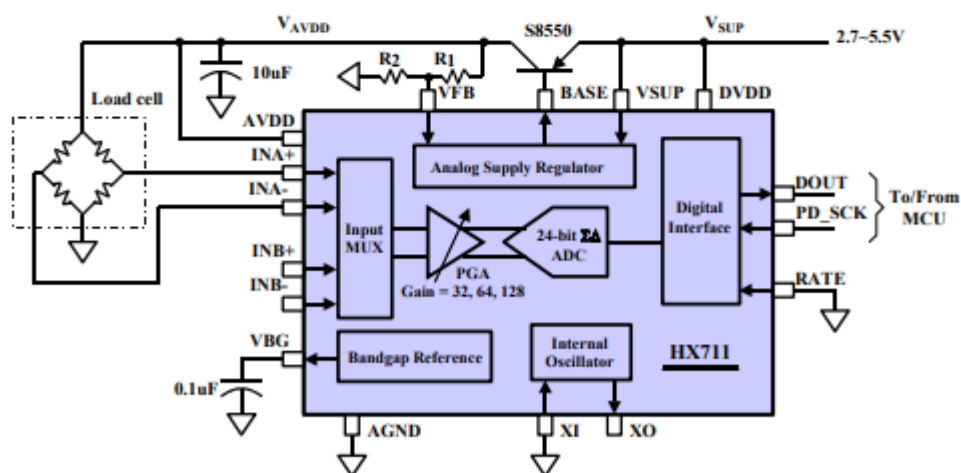


Fig. 1 Typical weigh scale application block diagram

KEY ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Parameter	Notes	MIN	TYP	MAX	UNIT
Full scale differential input range	V(inp)-V(inn)	$\pm 0.5(AVDD/GAIN)$			V
Common mode input		AGND+1.2		AVDD-1.3	V
Output data rate	Internal Oscillator, RATE = 0	10			Hz
	Internal Oscillator, RATE = DVDD	80			
	Crystal or external clock, RATE = 0	$f_{clk}/1,105,920$			
	Crystal or external clock, RATE = DVDD	$f_{clk}/138,240$			
Output data coding	2's complement	800000		7FFFFFFF	HEX
Output settling time ⁽¹⁾	RATE = 0	400			ms
	RATE = DVDD	50			
Input offset drift	Gain = 128	0.2			mV
	Gain = 64	0.4			
Input noise	Gain = 128, RATE = 0	50			nV(rms)
	Gain = 128, RATE = DVDD	90			
Temperature drift	Input offset (Gain = 128)	± 6			nV/°C
	Gain (Gain = 128)	± 5			ppm/°C
Input common mode rejection	Gain = 128, RATE = 0	100			dB
Power supply rejection	Gain = 128, RATE = 0	100			dB
Reference bypass (V _{BG})		1.25			V
Crystal or external clock frequency		1	11.0592	20	MHz
Power supply voltage	DVDD	2.6		5.5	V
	AVDD, VSUP	2.6		5.5	
Analog supply current (including regulator)	Normal	1400			μ A
	Power down	0.3			
Digital supply current	Normal	100			μ A
	Power down	0.2			

(1) Settling time refers to the time from power up, reset, input channel change and gain change to valid stable output data.

Table 2 Key Electrical Characteristics

Anexo III – Datasheet ESP32

1. Overview

ESP32-WROOM-32 (ESP-WROOM-32) is a powerful, generic Wi-Fi+BT+BLE MCU module that targets a wide variety of applications, ranging from low-power sensor networks to the most demanding tasks, such as voice encoding, music streaming and MP3 decoding.

At the core of this module is the ESP32-D0WDQ6 chip*. The chip embedded is designed to be scalable and adaptive. There are two CPU cores that can be individually controlled, and the clock frequency is adjustable from 80 MHz to 240 MHz. The user may also power off the CPU and make use of the low-power co-processor to constantly monitor the peripherals for changes or crossing of thresholds. ESP32 integrates a rich set of peripherals, ranging from capacitive touch sensors, Hall sensors, SD card interface, Ethernet, high-speed SPI, UART, I2S and I2C.

Note:

* For details on the part number of the ESP32 series, please refer to the document [ESP32 Datasheet](#).

The integration of Bluetooth, Bluetooth LE and Wi-Fi ensures that a wide range of applications can be targeted, and that the module is future proof: using Wi-Fi allows a large physical range and direct connection to the internet through a Wi-Fi router, while using Bluetooth allows the user to conveniently connect to the phone or broadcast low energy beacons for its detection. The sleep current of the ESP32 chip is less than 5 μ A, making it suitable for battery powered and wearable electronics applications. ESP32 supports a data rate of up to 150 Mbps, and 20.5 dBm output power at the antenna to ensure the widest physical range. As such the chip does offer industry-leading specifications and the best performance for electronic integration, range, power consumption, and connectivity.

The operating system chosen for ESP32 is freeRTOS with LwIP; TLS 1.2 with hardware acceleration is built in as well. Secure (encrypted) over the air (OTA) upgrade is also supported, so that developers can continually upgrade their products even after their release.

Table 1 provides the specifications of ESP32-WROOM-32 (ESP-WROOM-32).

Table 1: ESP32-WROOM-32 (ESP-WROOM-32) Specifications

Categories	Items	Specifications
Certification	RF certification	FCC/CE/IC/TELEC/KCC/SRRC/NCC
	Wi-Fi certification	Wi-Fi Alliance
	Bluetooth certification	BQB
	Green certification	RoHS/REACH
Wi-Fi	Protocols	802.11 b/g/n (802.11n up to 150 Mbps) A-MPDU and A-MSDU aggregation and 0.4 μ s guard interval support
	Frequency range	2.4 GHz ~ 2.5 GHz
Bluetooth	Protocols	Bluetooth v4.2 BR/EDR and BLE specification
	Radio	NZIF receiver with -97 dBm sensitivity
		Class-1, class-2 and class-3 transmitter
		AFH
Audio	CVSD and SBC	

Categories	Items	Specifications
Hardware	Module interface	SD card, UART, SPI, SDIO, I2C, LED PWM, Motor PWM, I2S, IR
		GPIO, capacitive touch sensor, ADC, DAC
	On-chip sensor	Hall sensor, temperature sensor
	On-board clock	40 MHz crystal
	Operating voltage/Power supply	2.7 ~ 3.6V
	Operating current	Average: 80 mA
	Minimum current delivered by power supply	500 mA
	Operating temperature range	-40°C ~ +85°C
	Ambient temperature range	Normal temperature
Package size	18±0.2 mm x 25.5±0.2 mm x 3.1±0.15 mm	
Software	Wi-Fi mode	Station/SoftAP/SoftAP+Station/P2P
	Wi-Fi Security	WPA/WPA2/WPA2-Enterprise/WPS
	Encryption	AES/RSA/ECC/SHA
	Firmware upgrade	UART Download / OTA (download and write firmware via network or host)
	Software development	Supports Cloud Server Development / SDK for custom firmware development
	Network protocols	IPv4, IPv6, SSL, TCP/UDP/HTTP/FTP/MQTT
	User configuration	AT instruction set, cloud server, Android/iOS app

2. Pin Definitions

2.1 Pin Layout

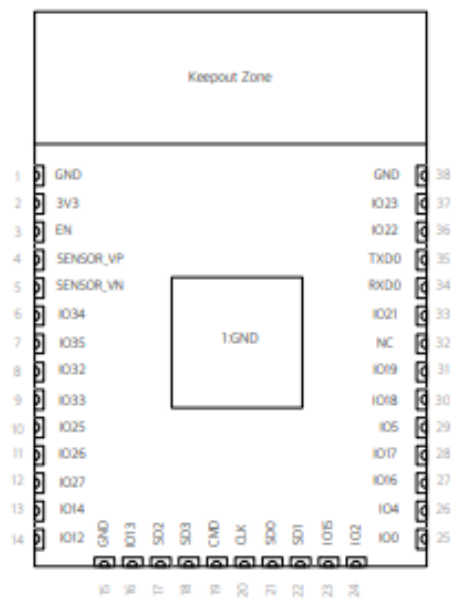


Figure 1: ESP32-WROOM-32 (ESP-WROOM-32) Pin layout

Anexo IV – Datasheet TP4056

Edited by Foxit Reader
Copyright(C) by Foxit Software Company,2005-2006
For Evaluation Only.



TP4056

Using SOP8/MSOP8 package 1A Linear Li-Ion Battery Charger

Description

The TP4056 is a complete constant current & constant voltage linear charger for single cell lithium-ion batteries. Its SOP package and low external component count make the TP4056 ideally suited for portable applications. Furthermore, the TP4056 is specifically designed to work within USB power specifications.

No external sense resistor is needed, and no blocking diode is required due to the internal MOSFET architecture. Thermal feedback regulates the charge current to limit the die temperature during high power operation or high ambient temperature. The charge voltage is fixed at 4.2V, and the charge current can be programmed externally with a single resistor. The TP4056 automatically terminates the charge cycle when the charge current drops to 1/10th the programmed value after the final float voltage is reached.

When the input supply (wall adapter or USB supply) is removed, the TP4056 automatically enters a low current state, dropping the battery drain current to less than 2uA. The TP4056 can be put into shutdown mode, reducing the supply current to 50uA.

Other features include Battery temperature monitor, under-voltage lockout, automatic recharge and two status pins to indicate charge and charge termination.

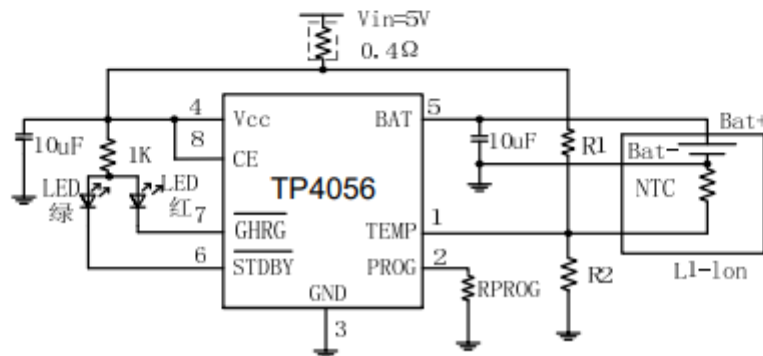
Applications

- Cellular Telephones, PDAs, MP3 /MP4 Players
- Charging Docks and Cradles
- Bluetooth , GPS Applications

Features

- Programmable Charge Current Up to 1000mA

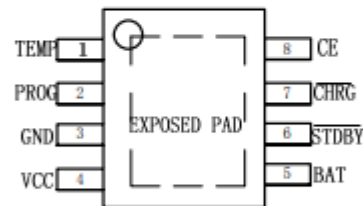
Typical Application Circuit



- No MOSFET, Sense Resistor or Blocking Diode Required
- Complete Linear Charger in SOP Package for single Cell Lithium-Ion Batteries
- Constant-Current/Constant-Voltage Operation with Thermal Regulation to Maximize Charge Rate Without Risk of Overheating
- Charges Single Cell Li-Ion Batteries Directly from USB Port
- Preset 4.2V Charge Voltage with $\pm 1\%$ Accuracy
- Charge Current Monitor Output for Gas Gauging
- Automatic Recharge
- Charge state pairs of output, no battery and fault status display
- C/10 Charge Termination
- 50uA Supply Current in Shutdown
- 2.9V Trickle Charge Threshold
- Soft-Start Limits Inrush Current
- Battery temperature monitoring function
- Available in SOP8-PP/ MSOP8-PP Package

Package

- SOP8-PP/MSOP8-PP



Absolute Maximum Ratings

PARAMETER	SYMBOL	MAXIMUM RATING	UNIT
Input Supply Voltage	V _{cc}	V _{SS} -0.3~V _{SS} +7	V
PROG pin Voltage	V _{prog}	V _{SS} -0.3~V _{cc} +0.3	
BAT pin Voltage	V _{bat}	V _{SS} -0.3~7	
CHAG pin Voltage	V _{chrg}	V _{SS} -0.3~V _{SS} +7	
BAT pin Current	I _{bat}	1400	mA
PROG pin Current	I _{prog}	1400	μA
Operating Ambient Temperature	T _{opa}	-40~+85	°C
Storage Temperature	T _{str}	-65~+125	

Caution: The absolute maximum ratings are rated values exceeding which the product could suffer physical damage. These values must therefore not be exceeded under any conditions.

Electrical Characteristics

Parameter	Symbol	CONDITION	MIN	TYP	MAX	UNIT
Input supply voltage	V _{cc}		4.25		6.5	V
Input supply current	I _{cc}	Charge mode, R _{PROG} =10K		350	2000	μA
		Standby mode		150	500	μA
		Shutdown mode(R _{PROG} not connected, V _{cc} <V _{bat} or V _{cc} <V _{uv})		50	100	μA
Regulated Output Voltage	V _{float}	0°C ≤ T _A ≤ 85°C, I _{BAT} = 40mA	4.158	4.2	4.242	V
BAT pin Current	I _{bat}	R _{PROG} = 2k, Current mode	465	500	535	mA
		R _{PROG} = 1k, Current mode	934	1000	1070	mA
		Standby mode, V _{bat} =4.2V	0	-2.5	-6	μA
		Shutdown mode		1	2	μA
		Sleep mode, V _{cc} =0V		0.3	2	μA
Trickle charge current	I _{trikl}	V _{bat} <V _{trikl} , R _{prog} =1k	93	100	107	mA
Trickle charge Threshold Voltage	V _{trikl}	R _{PROG} = 10K, V _{bat} Rising	2.8	2.9	3.0	V
Trickle voltage hysteresis voltage	V _{trhys}	R _{PROG} = 1k	60	80	110	mV
V _{cc} Undervoltage lockout Threshold	V _{uv}	From V _{cc} low to high	3.7	3.8	3.93	V
V _{cc} undervoltage lockout hysteresis	V _{uvhys}		150	200	300	mV
V _{cc} -V _{bat} Lockout Threshold voltage	V _{asd}	V _{cc} from low to high	50	100	140	mV
		V _{cc} from high to low	5	40	50	mV
C/10 Termination Current Threshold	I _{term}	R _{PROG} =1k	0.085	0.1	0.115	mA/mA
		R _{PROG} =2k	0.085	0.1	0.115	mA/mA
PROG pin Voltage	V _{prog}	R _{PROG} = 1k, Current mode	0.93	1.0	1.07	V
CHRG pin Output low voltage	V _{chrg}	I _{chrg} =5mA		0.35	0.6	V
STDBY pin Output low voltage	V _{stdby}	I _{stdby} =5mA		0.35	0.6	V
Recharge Battery threshold Voltage	ΔV _{recg}	V _{FLOAT} - V _{RECHRG}		100	200	mV
CE high voltage	V _{ce-h}		1.2			V
CE low voltage	V _{ce-l}				0.6	V
TEMP pin voltage of the high-end flip	V _{temp-h}			80	82	%V _{cc}
TEMP pin voltage of the low-end flip	V _{temp-l}		43	45		%V _{cc}
Limited temperature patterns in the junction temperature	T _{lim}			145		°C

Anexo V – Datasheet Bateria de Lítio 18650



LIR18650 Datasheet
Li-Ion Battery
Edition: NOV. 2010

5. BASIC CHARACTERISTICS

5.1 Capacity ($25 \pm 5^\circ\text{C}$)	Nominal Capacity: 2600mAh (0.52A Discharge, 2.75V) Typical Capacity: 2550mAh (0.52A Discharge, 2.75V) Minimum Capacity: 2500mAh (0.52A Discharge, 2.75V)
5.2 Nominal Voltage	3.7V
5.3 Internal Impedance	$\leq 70\text{m}\Omega$
5.4 Discharge Cut-off Voltage	3.0V
5.5 Max Charge Voltage	$4.20 \pm 0.05\text{V}$
5.6 Standard Charge Current	0.52A
5.7 Rapid Charge Current	1.3A
5.8 Standard Discharge Current	0.52A
5.9 Rapid Discharge Current	1.3A
5.10 Max Pulse Discharge Current	2.6A
5.11 Weight	$46.5 \pm 1\text{g}$
5.12 Max. Dimension	Diameter(\varnothing): 18.4mm Height (H): 65.2mm
5.13 Operating Temperature	Charge: $0 \sim 45^\circ\text{C}$ Discharge: $-20 \sim 60^\circ\text{C}$
5.14 Storage Temperature	During 1 month: $-5 \sim 35^\circ\text{C}$ During 6 months: $0 \sim 35^\circ\text{C}$

6. Standard conditions for test

All the tests need to be done within one month after the delivery date under the following conditions :
Ambient Temperature: $25 \pm 5^\circ\text{C}$; Relative Humidity: $65 \pm 20\%$

Standard Charge	Constant Current and Constant Voltage (CC/CV) Current = 0.52A Final charge voltage = 4.2V Final charge Current = 0.052A
Standard Discharge	Constant Current (CC) Current = 0.52A End Voltage = 3.0V

7. Appearance

All surfaces must be clean, without damages, leakage and corrosion. Each product will have a product label identifying the model.

8. Characteristics

In this section, the Standard Conditions of Tests are used as described in part 6.

8.1 Electrical Performances

Items	Test procedure	Requirements
8.1.1 Nominal Voltage	The average value of the working voltage during the whole discharge process.	3.7V
8.1.2 Discharge Performance	The discharge capacity of the cell, measured with 1.3 A down to 3.0V within 1 hour after a completed charge.	≥114min
8.1.3 Capacity Retention	After 28 days storage at 25±5°C, after having been completely charged and discharged at 0.52A, discharge to 3.0V, the residual capacity is above 80%	Capacity≥2080mAh
8.1.4 Cycle Life	After 299 cycles at 100% DOD. Charge and discharge at 1.3A, and plus 1 day, measured under 0.52A charge and discharge, the residual discharge capacity is above 80% of initial capacity (Cycle life may be determined by conditions of charging, discharging, operating temperature and/or storage.)	300 cycles the residual capacity ≥2050mAh
8.1.5 Storage	(Within 3 months after manufactured) The cells is charged with 1.3A to 40-50% capacity and stored at ambient temperature 25±5°C, 65±20%RH for 12 months. After the 12 months storage period the cell is fully charged and discharged to 3.0V with 0.52A	Discharge time≥4h

8.2 Safety Performances

Items	Test procedure	Requirements
8.2.1 Short Circuit	The cell is to be short-circuited by connecting the positive and negative terminals of the cell directly with copper wire with a resistance of less than 0.05Ω.	No fire no explosion.
8.2.2 Impact Test	A test sample battery is to be placed on a flat surface. A 5/8 inch (15.8mm) diameter bar is to be placed across the center of the sample. A 20 pound (9.1kg) weight is to be dropped from a height of 24 ±1 inch (610±25mm) onto the sample.	No fire no explosion.
8.2.3 Overcharge (3C/10V)	The cell is connected with a thermocouple and put in a fume hood. The positive and negative terminals are connected to a DC power supply set at 7.8A and 10V until the cell reaches 10V and the current drops to approximately 0A. Monitor the temperature of cell. When the temperature of the cell is approximately 10°C less than the peak value, the test is completed.	No fire, no explosion.
8.2.4 Thermal shock	After standard charging, heat the cell to 130±2°C at a rate of 5±2°C /min and keep it at this temperature during 30 minutes.	No fire, no explosion.

Anexo VI – Especificações técnicas - Medidor de bateria - 1S

CARACTERÍSTICAS:

- Indicador de Bateria S1 3.7V;
- Medidor de Bateria 4.2V;
- Voltímetro Digital;
- Compatível com baterias de Lítio (Li-Ion) 1S;
- Indica a quantidade de carga da bateria;
- Medição em tempo real;
- Barra Gráfica 5 segmentos em LED azul;
- Perfurações para fixação;
- Ideal para Bateria 18650;
- A PLACA PODE SER ENVIADA NA COR VERDE OU AZUL (Envio Aleatório).

ESPECIFICAÇÕES:

- Modelo: FR50;
- Compatibilidade: Bateria de Lítio 1S;
- Tensão de trabalho: 3.3 a 4.2V DC;
- Corrente de trabalho: <30mA;
- Dimensões do display (CxL): 31x20mm;
- Dimensões totais (CxL): 43,5x20x9mm;
- Peso: 6g.

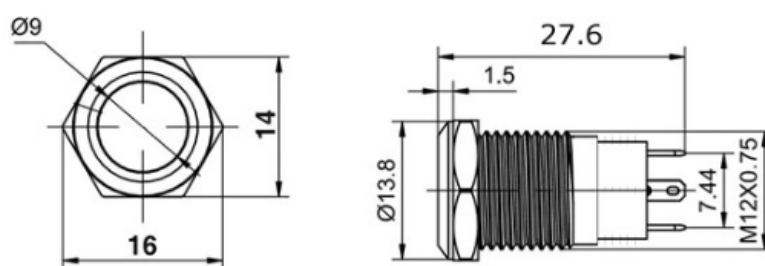
Anexo VII – Especificações técnicas – Interruptor com travamento

O **Interruptor com Travamento 12mm MD147** é uma solução prática e moderna para controle elétrico em diversos ambientes automatizados, possuindo características distintas que o tornam uma escolha versátil, de alta confiabilidade e visibilidade.

Esse modelo não possui LED, possuindo menos pinos para conexão, permitindo reduzir a quantidade de fios na instalação, além disso, devido a essa característica apresenta melhor relação de custo x benefício, sendo ideal para locais bem iluminados. Se diferenciando ainda pela presença da trava, mantendo a posição após a seleção pelo usuário.

O Interruptor com Travamento 12mm MD147 oferece a opção de circuito normalmente aberto (NA) ou normalmente fechado (NF) por meio dos seus dois pinos (ao ser apertado se mantém no estado contrário da posição original) proporcionando flexibilidade de aplicação, permitindo a soldagem direta da fiação.

Com classificação de proteção IP65, o interruptor é resistente à água e poeira, podendo ser utilizado tanto em ambientes internos quanto externos. Seu material de fabricação (aço inoxidável) assegura resistência contra oxidação, prolongando a vida útil do dispositivo.



Medidas Interruptor 12mm

CARACTERÍSTICAS:

- Interruptor 12mm;
- Com travamento ;
- Produzido em Aço Inox;
- Estado NA ou NF (Inverte ao ser Pressionado);
- Dois Pinos para Chave;
- Ideal para Ambientes Interno e Externos;
- Material Resistente à Oxidação;
- Design Arrojado e Moderno;
- Acompanha Anel de Vedação.

ESPECIFICAÇÕES:

- Modelo: MD147;
- Nível de Proteção: IP65;
- Tensão Máxima: 127VAC 4A / 250VCA 2A;
- Diâmetro da Rosca: 12mm;
- Diâmetro Frontal do Botão: 13,8mm;
- Comprimento Total: 27,6mm;
- Peso: 6g.

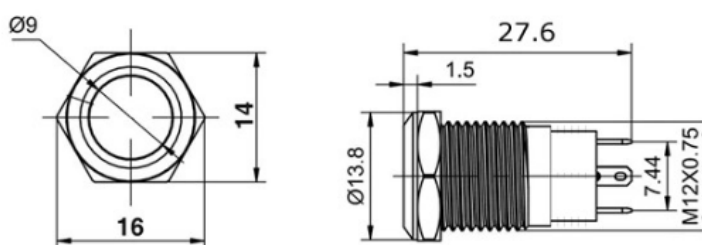
Anexo VIII – Especificações técnicas – Interruptor pulsante

O **Interruptor Pulsador 12mm NA MD148** é uma solução prática e moderna para controle elétrico em diversos ambientes automatizados, possuindo características distintas que o tornam uma escolha versátil, de alta confiabilidade e visibilidade.

Esse modelo não possui LED, possuindo menos pinos para conexão, permitindo reduzir a quantidade de fios na instalação, além disso, devido a essa característica apresenta melhor relação de custo x benefício, sendo ideal para locais bem iluminados. Além disso, se diferencia por **NÃO** ter presença da trava, **NÃO** mantendo a posição após a seleção pelo usuário.

O Interruptor Pulsador 12mm NA MD148 oferece a opção de circuito normalmente aberto (NA) por meio dos seus 2 pinos, proporcionando mais simplicidade de aplicação (após apertar o pulsador ele retorna a posição original), assegurando um funcionamento eficiente e estável.

Com classificação de proteção IP65, o interruptor é resistente à água e poeira, podendo ser utilizado tanto em ambientes internos quanto externos. Seu material de fabricação (aço inoxidável) assegura resistência contra oxidação, prolongando a vida útil do dispositivo.



Medidas Interruptor Pulsador 12mm

CARACTERÍSTICAS:

- Interruptor Pulsador 12mm;
- Pulsador 12mm NA;
- Produzido em Aço Inox;
- Estado Normalmente Aberto;
- Dois Pinos para Chave (Comum/NA);
- Ideal para Ambientes Interno e Externos;
- Material Resistente à Oxidação;
- Design Arrojado e Moderno;
- Botão Sobreposto;
- Acompanha Anel de Vedação.

ESPECIFICAÇÕES:

- Modelo: MD148;
- Nível de Proteção: IP65;
- Tensão Máxima: 127VAC 4A / 250VCA 2A;
- Diâmetro da Rosca: 12mm;
- Diâmetro Frontal do Botão: 13,8mm;
- Comprimento Total: 27,6mm;
- Peso: 6g.

Anexo IX – Datasheet ABS Premium MG94



ABS Premium MG94

Material: ABS MG94

Cor: Todas as cores

Diâmetro: 1.75mm

Temperatura de transição vítrea: 115°C

Informações de impressão

Temperatura de extrusão (bico)	225°C à 250°C
Temperatura da mesa (mesa)	100°C à 130°C
Velocidade de impressão	até 180mm

*Esses parâmetros são apenas uma recomendação, podendo variar de acordo com o equipamento utilizado.

Propriedade	Método de teste	Unidade	Valor
Resistência a tensão	ASTM D 638	kg/m ²	469
Alongamento na ruptura	ASTM D 638	%	18
Módulo de flexão	ASTM D 790	kg/m ²	26716
Dureza (R-Scale)	ASTM D 785	-	113
Resistência ao impacto IZOD (23°C)	ASTM D 256	kg-cm/cm	24.5