

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

BRYAN MOREIRA PAES

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ELETRÔNICO AUTOMATIZADO PARA
TALONAMENTO DE PNEUS SEM CÂMARA EM BICICLETAS

CAXIAS DO SUL

2026

BRYAN MOREIRA PAES

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ELETRÔNICO AUTOMATIZADO PARA
TALONAMENTO DE PNEUS SEM CÂMARA EM BICICLETAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como parte do requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Elétrica junto à
Universidade de Caxias do Sul.

Orientador Prof. Me. Patricia Giacomelli

**CAXIAS DO SUL
2026**

BRYAN MOREIRA PAES

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ELETRÔNICO AUTOMATIZADO PARA
TALONAMENTO DE PNEUS SEM CÂMARA EM BICICLETAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como parte do requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Elétrica junto à
Universidade de Caxias do Sul.

Aprovado em 01/07/2026

Banca Examinadora

Prof. Me. Patricia Giacomelli (orientadora)
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Alexandre Mesquita
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Ricardo Costi
Universidade de Caxias do Sul – UCS

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a validação de um sistema eletrônico automatizado para auxiliar no talonamento de pneus sem câmara em bicicletas. O problema abordado está relacionado à dificuldade de realizar o talonamento de pneus tubeless utilizando apenas bombas convencionais ou compressores comuns, uma vez que esse processo exige a liberação rápida e controlada de ar comprimido para o correto assentamento dos talões no aro. Além disso, observa-se a limitação de soluções específicas, portáteis e automatizadas voltadas a essa aplicação, o que motiva o desenvolvimento de um protótipo funcional próprio. O objetivo foi desenvolver um sistema capaz de controlar a pressurização, a liberação de ar comprimido e o acompanhamento da pressão durante o processo. O sistema é composto por reservatório de ar comprimido, compressor 12 V, duas válvulas solenoides, dois sensores de pressão, microcontrolador Arduino Nano, display LCD, encoder rotativo e componentes auxiliares de alimentação, acionamento e segurança. A metodologia envolveu a validação inicial do princípio de funcionamento, a seleção dos componentes, a montagem pneumática e eletrônica do protótipo, a calibração dos sensores e a realização de ensaios em bancada. Foram verificados o funcionamento das válvulas solenoides, dos sensores de pressão, do compressor, da alimentação elétrica e do acionamento das cargas por relés. Os testes práticos demonstraram que o protótipo foi capaz de pressurizar o sistema, controlar a liberação de ar comprimido e realizar o talonamento de pneus sem câmara em condições reais de ensaio. Os resultados obtidos indicam a viabilidade técnica da solução desenvolvida como protótipo funcional para aplicação em bicicletas.

Palavras-chave: talonamento; pressão; pneu sem câmara; automação.

ABSTRACT

This work presents the development and validation of an automated electronic system to assist in the seating of tubeless bicycle tires. The problem addressed is related to the difficulty of seating tubeless tires using only conventional pumps or common compressors, since this process requires a rapid and controlled release of compressed air to ensure the proper seating of the tire beads on the rim. In addition, there is a limitation of specific, portable, and automated solutions aimed at this application, which motivates the development of a functional prototype. The objective was to develop a system capable of controlling pressurization, compressed air release, and pressure monitoring during the process. The system consists of a compressed air reservoir, a 12 V compressor, two solenoid valves, two pressure sensors, an Arduino Nano microcontroller, an LCD display, a rotary encoder, and auxiliary power supply, actuation, and safety components. The methodology involved the initial validation of the operating principle, component selection, pneumatic and electronic assembly of the prototype, sensor calibration, and bench testing. The operation of the solenoid valves, pressure sensors, compressor, electrical power supply, and load actuation through relays was verified. Practical tests demonstrated that the prototype was able to pressurize the system, control the release of compressed air, and seat tubeless tires under real test conditions. The results obtained indicate the technical feasibility of the developed solution as a functional prototype for application in bicycles.

Keywords: tire seating; tubeless tire; pressure; automation; Arduino.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Detalhe de um aro convencional.....	16
Figura 2 - Fita adesiva para sistema sem câmara	17
Figura 3 - Detalhe de aro tubeless	17
Figura 4 - Pneu convencional e detalhe do talão	17
Figura 5 - Pneu tubeless e detalhe do seu talão	18
Figura 6 - Pneu destalonado do aro	19
Figura 7 - Ato de talonar o pneu.....	20
Figura 8 - Exemplo de indicação de pressão impressa no pneu	21
Figura 9 - Exemplo de relação entre tensão de saída pela pressão absoluta	23
Figura 10 - Exemplo de sensor de pressão	23
Figura 11 - Exemplo de aplicação de sensor fotoelétrico em linha de produção	25
Figura 12 - Principais tipos de atuadores.....	26
Figura 13 - Válvula solenoide visão externa	27
Figura 14 - Esquema de válvula solenoide visão interna	28
Figura 15 - Exemplo de um esquema de válvula solenoide de ação direta	29
Figura 16 - Faixa de pressão impressa diretamente no corpo da válvula solenoide.....	30
Figura 17 - Indicação da tensão impressa na bobina da válvula solenoide	31
Figura 18 - Microcontroladores	33
Figura 19 - Exemplo de encoder rotativo	34
Figura 20 - Display LCD	35
Figura 21 - Cilindro de ar comprimido.....	37
Figura 22 - Esquema de funcionamento de um compressor de pistão	38
Figura 23 - Protótipo para talonamento com garrafa PET e válvula manual	40
Figura 24 - Sensor de pressão escolhido	42
Figura 25 - Curva de tensão do sensor escolhido	42
Figura 26 - Válvula solenoide de alta pressão escolhida (modelo 2W160-15).....	44
Figura 27 - Solenoide utilizada para alívio.....	44
Figura 28 - Sequência de telas da interface do sistema	47
Figura 29 - Diagrama em blocos do funcionamento do sistema	48
Figura 30 - Características da bateria Pioneiro MBR 4-BS.....	49
Figura 31 - Esquemático conversor DC-DC.....	50

Figura 32 - Módulo de relés utilizado	51
Figura 33 - Tabela de especificações do cilindro (extintor de incêndio 4 kg).....	52
Figura 34 - Extintor reutilizado como cilindro de ar comprimido	52
Figura 35 - Compressor de ar CAV12 utilizado no sistema.....	53
Figura 36 - Esquemático eletrônico do protótipo	56
Figura 37 - Modelo tridimensional da estrutura modular do protótipo	57
Figura 38 - Montagem inicial da linha pneumática com derivações tipo “T”	59
Figura 39 - Linha pneumática modificada com conexões metálicas.....	60
Figura 40 - Válvula solenoide em condição fechada e aberta	62
Figura 41 - Corrente das válvulas solenoides: A - solenoide de alta; B - solenoide de alívio ..	62
Figura 42 - Medição da tensão de saída do sensor de pressão para 50 PSI.....	63
Figura 43 - Tensão de saída em função da pressão aplicada no sensor escolhido	64
Figura 44 - Pressurização do sistema com o compressor de ar até 140 PSI.....	66
Figura 45 - Medição da corrente consumida pelo compressor durante a pressurização	66
Figura 46 - Medição da tensão da bateria em repouso e acionamento do compressor.....	67
Figura 47 - Medição da tensão de saída do conversor DC-DC	68
Figura 48 - Montagem integrada em bancada para verificação conjunta dos componentes	70
Figura 49 - Comparação entre a tensão da bateria medida e a leitura exibida no display	70
Figura 50 - Vista frontal do protótipo final	72
Figura 51 - Vista traseira do protótipo final	73
Figura 52 - Primeiro conjunto pneu-roda antes e após o processo de talonamento	74
Figura 53 - Segundo conjunto pneu-roda antes e após o processo de talonamento	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Corrente consumida pelas válvulas solenoides	63
Tabela 2 - Relação entre pressão aplicada e tensão de saída do sensor.....	64
Tabela 3 - Verificação das tensões primária e secundária do sistema	68

LISTA DE SIGLAS

CO ₂	Dióxido de Carbono
DC	<i>Direct Current</i> (corrente contínua)
FS	<i>Full Scale</i> (escala completa, usada na precisão do sensor)
GND	<i>Ground</i> (terra elétrica)
IHM	Interface Homem-Máquina
IP67	<i>Ingress Protection 67</i> (grau de proteção contra poeira e imersão em água)
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i> (visor de cristal líquido)
MTB	<i>Mountain Bike</i> (bicicleta de montanha)
NA	Normalmente Aberta
NF	Normalmente Fechada
N	Newton
NPT	<i>National Pipe Thread</i> (rosca padrão americana)
PA	Pascal (unidade de pressão)
PSI	<i>Pounds per Square Inch</i> (libras por polegada quadrada)
UCS	Universidade de Caxias do Sul
VDC	<i>Volts of Direct Current</i> (volts de corrente contínua)
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i> (Circuito Inter-Integrado)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	12
1.2 OBJETIVOS.....	13
1.2.1 Objetivo geral.....	13
1.2.2 Objetivos específicos.....	14
1.3 LIMITAÇÕES DO TRABALHO	14
 2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	 15
2.1 TALONAMENTO E PRESSÃO EM PNEUS SEM CÂMARA	15
2.1.1 Diferença entre talonamento e calibração.....	15
2.1.2 Diferenças entre aros e pneus para sistemas com e sem câmara	15
2.1.3 Processo de talonamento em pneus sem câmara	18
2.1.4 Pressão de uso e limites informados por fabricantes.....	20
2.2 SENSORES	22
2.2.1 Sensores de Pressão	22
2.2.2 Parâmetros Técnicos Relevantes em Sensores de Pressão.....	23
2.2.3 Sensores fotoelétricos	24
2.3 ATUADORES NO SISTEMA DE TALONAMENTO	25
2.3.1 Papel dos atuadores no projeto	26
2.3.2 Considerações Técnicas Importantes.....	30
2.4 CONTROLE ELETRÔNICO	31
2.4.1 Microcontroladores	32
2.4.2 Interface de Usuário	34
2.5 ELEMENTOS AUXILIARES	35
2.5.1 Cilindros de ar comprimido.....	35
2.5.2 Compressores de Ar	37
 3 METODOLOGIA DE PROJETO.....	 40
3.1 VALIDAÇÃO PRÉVIA COM PROTÓTIPO MANUAL	40
3.2 SENSOR DE PRESSÃO	41
3.3 VÁLVULA SOLENOIDE	43

3.4 MICROCONTROLADOR.....	45
3.5 INTERFACE COM O USUÁRIO	45
3.6 ALIMENTAÇÃO ELÉTRICA E ACIONAMENTO DAS CARGAS	49
3.7 ELEMENTOS AUXILIARES	51
3.7.1 Cilindro de ar comprimido	51
3.7.2 Compressor de ar.....	53
3.8 ESQUEMÁTICO ELETRÔNICO DO PROTÓTIPO.....	55
3.9 MODELAGEM CAD E ESTRUTURA MODULAR DO PROTÓTIPO	57
 4 TESTES E RESULTADOS.....	59
4.1 MONTAGEM PNEUMÁTICA E TESTES INICIAIS DE PRESSURIZAÇÃO	59
4.2 VERIFICAÇÃO DOS COMPONENTES DO SISTEMA	61
4.2.1 Ensaio Válvulas solenoides	61
4.2.2 Ensaio dos sensores de pressão.....	63
4.2.3 Verificação do compressor de ar	65
4.2.4 Alimentação elétrica e acionamento das cargas.....	67
4.3 MONTAGEM INTEGRADA EM BANCADA.....	69
4.4 MONTAGEM FINAL DO PROTÓTIPO	71
4.5 VALIDAÇÃO DO SISTEMA.....	73
 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	75
REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

Os pneus de bicicleta podem ser classificados em dois principais tipos: com câmara de ar e *tubeless* (sem câmara). Os pneus com câmara possuem uma estrutura interna de borracha que armazena o ar pressurizado, garantindo a expansão do pneu. Esse sistema é montado em aros tradicionais, que não possuem vedação interna, já que o ar é contido pela câmara. Uma das vantagens práticas desse sistema é que o enchimento pode ser feito facilmente com bombas de ar manuais, independentemente de o pneu estar totalmente vazio ou parcialmente inflado. No entanto, está sujeito a furos e cortes na câmara, especialmente quando um objeto perfura o pneu e atinge diretamente a câmara, causando perda constante ou até instantânea de pressão. Além disso, o chamado *snake bite*, que ocorre quando a câmara é comprimida contra o aro em impactos fortes, pode causar dois furos simultâneos. Por essas razões, esse sistema necessita uma manutenção frequente.

Por outro lado, o sistema *tubeless* elimina a necessidade da câmara de ar, vedando diretamente o ar entre o pneu e o aro. Para isso, utiliza um selante líquido que com o rodar do conjunto, auxilia na vedação e no reparo de pequenos furos de forma quase instantânea, impedindo a perda rápida de pressão. Como não há câmara interna, o risco de furos por compressão *snake bite* é praticamente eliminado. Porém, uma limitação prática importante é que o enchimento só é possível se o pneu já estiver corretamente talonado, ou seja, com o talão (borda do pneu que se encaixa no aro) perfeitamente encaixado nas laterais do aro, garantindo a vedação. Caso contrário, o ar escapa pelas laterais e o pneu não infla, inviabilizando o uso de bombas manuais comuns. Esse tipo de pneu requer um aro específico, com perfil interno adaptado para vedação e retenção do talão do pneu, geralmente acompanhado de fita de vedação sobre os furos dos raios. A configuração sem câmara também costuma ser mais leve, já que elimina o peso da câmara de ar, contribuindo para melhor desempenho, especialmente em subidas e acelerações. Assim, o sistema sem câmara de ar apresenta vantagens como menor risco de furos, possibilidade de rodar com pressões mais baixas (aumentando a aderência), maior eficiência na rolagem e menor peso total do conjunto. No entanto, sua instalação e manutenção são mais complexas, exigindo um correto talonamento para garantir a estanqueidade do sistema.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

O processo de talonamento do pneu *tubeless* é um dos desafios enfrentados pelos

ciclistas, mecânicos e entusiastas do ciclismo. O talonamento consiste no encaixe correto da borda do pneu nas paredes internas do aro, garantindo a vedação perfeita e impedindo a perda de ar.

Atualmente, esse processo é realizado de forma manual utilizando bombas de ar de alta pressão, compressores ou cartuchos de CO₂. Esses cartuchos, amplamente utilizados por ciclistas, contêm dióxido de carbono comprimido e oferecem uma forma rápida de inflar pneus, especialmente em casos de emergências. No entanto, seu uso no talonamento de pneus *tubeless* nem sempre é eficaz, pois sua capacidade limitada pode não gerar a vazão de ar necessária para expandir rapidamente o pneu contra o aro e garantir a vedação necessária. Além disso, os cartuchos são descartáveis, implicando em custo adicional a cada tentativa.

Esses métodos podem ser ineficazes, especialmente quando o pneu e o aro não possuem um encaixe ideal. Além disso, embora teoricamente o uso de compressores ou bombas específicas resolva o problema, na prática a maioria dos usuários não dispõe desses equipamentos em casa. Muitas vezes são utilizados compressores industriais adaptados improvisadamente, o que pode comprometer a segurança e a eficácia do procedimento. Mesmo quando o equipamento está disponível, a falta de experiência técnica com seu uso para talonamento pode dificultar o processo. Como consequência, é comum que o usuário enfrente diversas tentativas frustradas, levando ao desperdício de tempo e ao uso excessivo de ar comprimido ou CO₂.

Deste modo, não é possível realizar o talonamento em casa utilizando bombas manuais convencionais, já que estas não oferecem vazão suficiente para expandir rapidamente o pneu contra as paredes do aro. A única alternativa tem sido deslocar-se até postos de gasolina que dispõem de compressores. Mesmo assim, o sucesso nem sempre é garantido, pois esses compressores nem sempre oferecem a vazão necessária para garantir um talonamento eficaz. Essa limitação prática motivou o desenvolvimento deste projeto, visando criar uma solução automática e eficiente para o talonamento de pneus sem câmara.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver um sistema eletrônico automático para facilitar o talonamento de pneus sem câmara de bicicletas, proporcionando praticidade, eficiência e autonomia ao usuário.

1.2.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral proposto, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a. Identificar os requisitos técnicos necessários para o talonamento automatizado de pneus sem câmara;
- b. Selecionar os componentes adequados, como compressor elétrico, sensor de pressão e válvula de liberação;
- c. Projetar o sistema eletrônico de controle que gerencie o fluxo e a pressão do ar no sistema;
- d. Desenvolver um protótipo funcional que automatize o processo de talonamento;
- e. Validar o funcionamento do sistema por meio de testes práticos em situações reais.

1.3 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Este trabalho tem como foco o desenvolvimento de um protótipo funcional para automatizar o talonamento de pneus sem câmara em bicicletas. O projeto será testado somente em condições normais de uso, com conjuntos específicos de rodas e pneus, sem incluir situações com chuva, poeira ou temperaturas extremas.

Como se trata de um protótipo, não há preocupação com o desenvolvimento de um produto comercial finalizado ou com a compactação definitiva dos componentes. Também ficam fora do escopo a produção em escala, processos de certificação e análises quantitativas aprofundadas de desempenho, como comparação detalhada entre diferentes modelos de pneus, aros ou condições de uso. A proposta se concentra na criação de uma solução funcional e acessível para fins didáticos e uso pessoal por ciclistas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta os conceitos necessários para compreender a proposta do sistema e os fundamentos utilizados no seu desenvolvimento.

2.1 TALONAMENTO E PRESSÃO EM PNEUS SEM CÂMARA

Esta seção apresenta as principais informações sobre o funcionamento dos pneus sem câmara e a importância do talonamento e da pressão nesse sistema.

2.1.1 Diferença entre talonamento e calibração

O talonamento e a calibração são processos distintos, porém complementares, no contexto da preparação de pneus de bicicleta, especialmente os do tipo *tubeless*.

O talonamento refere-se ao encaixe adequado do talão do pneu nas bordas internas do aro, garantindo a vedação necessária para manter o ar pressurizado no interior do pneu. Esse processo é crucial para pneus *tubeless*, pois, sem a câmara de ar, a vedação depende exclusivamente do contato preciso entre o pneu e o aro. Um talonamento inadequado pode resultar em vazamentos de ar e comprometer a segurança do ciclista. De maneira geral, segundo Yanick Gyger (2020) o sistema *tubeless* exige uma montagem cuidadosa para garantir desempenho, vedação e confiabilidade.

Por outro lado, a calibração diz respeito ao ajuste da pressão interna do pneu, adequando-a às condições de uso, peso do ciclista e tipo de terreno. Uma pressão correta proporciona melhor desempenho, conforto e segurança durante a pedalada. Pressões inadequadas podem levar a problemas como maior risco de furos, menor aderência e desgaste irregular do pneu (Cury, 2020).

2.1.2 Diferenças entre aros e pneus para sistemas com e sem câmara

O desempenho e a vedação dos pneus sem câmara dependem diretamente da compatibilidade entre o aro e o pneu utilizado. Existem diferenças significativas entre os componentes projetados para sistemas convencionais (com câmara de ar) e os voltados para sistemas *tubeless*, especialmente no que se refere ao perfil do aro e à construção do talão do pneu.

Os aros convencionais, normalmente utilizados com câmaras de ar, não são projetados para manter a vedação de ar diretamente entre o pneu e o aro. Sua superfície interna possui furos dos raios expostos e não conta com ganchos de retenção bem definidos. Isso os torna inadequados para uso direto com pneus *tubeless*, a menos que sejam adaptados com fita de vedação e válvula específica (Malandrini, 2015). Conforme ilustrado na Figura 1, os aros convencionais apresentam um perfil mais simples, com superfície reta.

Figura 1 - Detalhe de um aro convencional



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Já os aros *tubeless* possuem um perfil interno específico, com paredes laterais (ganchos) projetadas para manter o talão do pneu firmemente encaixado e vedado. Esses aros geralmente já vêm com uma superfície selada ou prontos para receber a fita de vedação, que impede a passagem de ar pelos furos dos raios. A Figura 2 ilustra esse componente. Além disso, a largura interna do aro costuma ser otimizada para compatibilidade com pneus mais largos, permitindo melhor assentamento e performance em uso com pressões mais baixas (YANICK GYGER, 2020). A Figura 3 mostra um exemplo típico de perfil de aro projetado para uso com pneus sem câmara.

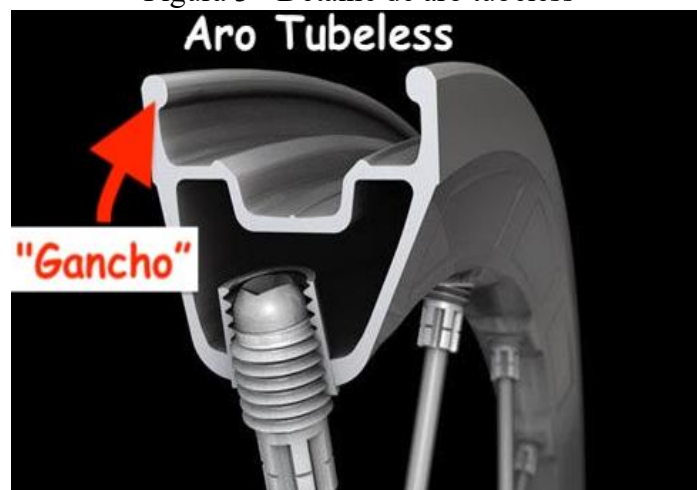
No que diz respeito aos pneus, os modelos *tubeless* possuem talões reforçados, geralmente com materiais mais rígidos e revestimentos internos que evitam a perda de ar. Pneus convencionais, por outro lado, não garantem vedação adequada mesmo que sejam montados em aros compatíveis, e são mais suscetíveis a vazamentos. A Figura 4 apresenta um exemplo de pneu convencional, evidenciando sua construção voltada ao uso com câmara de ar. Já a Figura 5 mostra um pneu *tubeless* com talão reforçado.

Figura 2 - Fita adesiva para sistema sem câmara



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 3 - Detalhe de aro tubeless



Fonte: Adaptado de (Mancha, 2013).

Figura 4 - Pneu convencional e detalhe do talão



Fonte: Adaptado de Cicles Jaime (2025).

Figura 5 - Pneu tubeless e detalhe do seu talão



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Portanto, para garantir um talonamento eficiente e vedação adequada, é essencial que o aro e o pneu sejam compatíveis com o sistema sem câmara. Mesmo com adaptações possíveis, o uso de componentes próprios para *tubeless* reduz falhas, facilita o processo e melhora o desempenho geral da bicicleta.

2.1.3 Processo de talonamento em pneus sem câmara

O talonamento é uma etapa fundamental no sistema de pneus sem câmara, sendo o momento em que o talão se encaixa firmemente nas abas internas do aro. Esse encaixe é essencial para que o sistema *tubeless* funcione corretamente.

Fisicamente, o processo de talonamento está relacionado à pressão interna aplicada pelo ar comprimido sobre as paredes do pneu e à resistência mecânica do conjunto pneu-aro. A pressão do ar atua de forma distribuída sobre as superfícies internas do pneu, contribuindo para a expansão da carcaça e para o deslocamento do talão em direção às paredes internas do aro. A relação entre pressão, área e força resultante pode ser representada pela Equação 1:

$$F = P \times A \quad (1)$$

Em que F é a força resultante exercida sobre determinada área da parede interna do pneu, em newton (N); P é a pressão interna do ar, em pascal (Pa); e A é a área sobre a qual essa pressão atua, em metros quadrados (m²).

Essa equação, derivada dos princípios da estática dos fluidos, mostra que a pressão exercida por um fluido atua perpendicularmente sobre as superfícies que o contêm (Hibbeler,

2012). No caso dos pneus sem câmara, a análise por meio dessa relação não representa isoladamente todo o fenômeno de talonamento, mas auxilia na compreensão de como a pressão interna pode gerar uma força resultante sobre determinadas regiões do pneu. Dessa forma, o talonamento depende principalmente da elevação adequada da pressão interna e da vazão de ar fornecida ao sistema, que devem ser suficientes para expandir o pneu e promover o encaixe do talão no aro.

Durante o talonamento, a pressão interna precisa vencer a resistência mecânica do talão, determinada pela rigidez do material, pela geometria do pneu e pela compatibilidade com o aro. Para que o encaixe ocorra, o ar deve ser introduzido em quantidade e velocidade adequadas, permitindo a expansão do pneu antes que o ar escape pelas laterais ainda não vedadas.

O sucesso do talonamento depende de três fatores principais: a geometria do aro e do pneu, que deve apresentar compatibilidade dimensional para permitir o correto assentamento dos talões (Malandrini, 2015); a elasticidade e a rigidez do talão, influenciadas pelo material de fabricação e pelas condições de uso anterior do pneu (Biopdi, 2024); e a vazão de ar injetada no sistema, que contribui para a rápida expansão do pneu e para o encaixe adequado do talão no aro (Pedaleria, 2016).

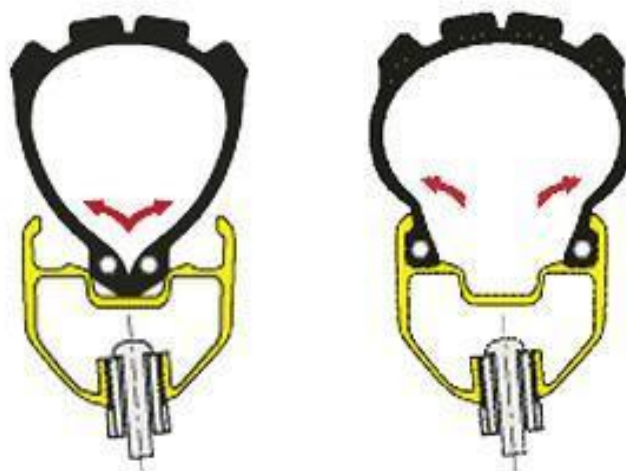
Como mostra a Figura 6 e a Figura 7, durante o talonamento o talão precisa ser deslocado até encaixar totalmente nas paredes internas do aro. Esse processo ocorre quando a pressão interna e o fluxo de ar fornecido ao pneu são suficientes para expandir a carcaça e permitir a vedação inicial do conjunto.

Figura 6 - Pneu destalonado do aro



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 7 - Ato de talonar o pneu



Fonte: Mancha (2013).

2.1.4 Pressão de uso e limites informados por fabricantes

A unidade de medida mais comum para indicar a pressão dos pneus de bicicleta é o PSI (pounds per square inch), que significa libras por polegada quadrada. Essa medida expressa quantas libras de força são aplicadas em uma área de uma polegada quadrada. No uso cotidiano, os ciclistas frequentemente dizem apenas “libras” para se referir ao PSI. Por exemplo, quando um ciclista afirma que “calibrou o pneu com 30 libras”, isso significa que foram usados 30 PSI. Alguns manômetros e bombas também exibem a medida em bar, sistema mais comum na Europa, onde 1 bar equivale a aproximadamente 14,5 PSI.

A pressão interna do pneu é um dos principais fatores que influenciam o desempenho, a segurança e a eficácia do sistema sem câmara. Fabricantes de pneus e componentes fornecem faixas de pressão recomendadas de acordo com o tipo de pneu, o tipo de aro, o terreno, e o peso do ciclista (Cury, 2020). Esses valores têm como objetivo garantir não apenas o conforto na pedalada, mas também a vedação adequada do conjunto pneu-aro, especialmente no caso de sistemas *tubeless*.

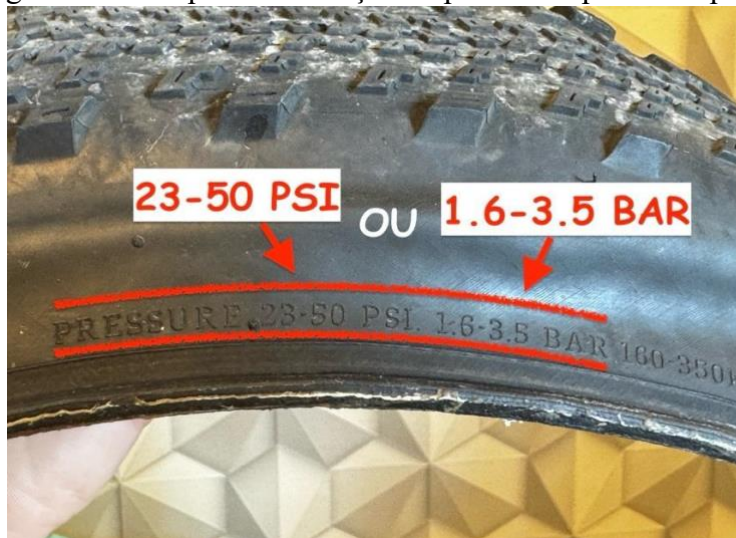
No contexto dos pneus sem câmara, é importante diferenciar a pressão de uso da pressão necessária para o talonamento. A pressão de uso corresponde ao valor final utilizado durante a pedalada, sendo ajustada conforme a modalidade, largura do pneu, peso do ciclista, tipo de terreno e limites indicados pelos fabricantes. Em bicicletas mountain bike, sistemas sem câmara geralmente permitem a utilização de pressões mais baixas em comparação com sistemas com câmara, enquanto bicicletas de estrada normalmente operam com pressões mais elevadas.

Já no processo de talonamento, a pressão indicada para uso do pneu não representa,

necessariamente, a condição necessária para que o talão encaixe no aro. Nessa etapa, além da pressão, a vazão de ar fornecida ao pneu tem papel importante, pois contribui para a expansão rápida da carcaça e para o deslocamento do talão até as paredes internas do aro. Por esse motivo, a condição necessária para o talonamento pode variar conforme o conjunto pneu-aro, a rigidez do talão, a vedação inicial e a forma como o ar é injetado.

Além da pressão recomendada para o uso, os fabricantes de aros geralmente indicam a pressão máxima de inflagem permitida para preservar a integridade estrutural da roda e garantir a segurança do sistema. A superação desses limites pode causar danos ao aro ou até mesmo resultar em explosões do pneu, especialmente em casos de montagem incorreta. Como mostra a Figura 8, a pressão máxima do pneu costuma vir impressa diretamente na lateral da carcaça, em forma de “min – max PSI”. Já a pressão máxima do aro deve ser consultada no manual técnico do fabricante, como o da Roval (Specialized), que alerta para os riscos de ultrapassar esse limite (Specialized, 2022).

Figura 8 - Exemplo de indicação de pressão impressa no pneu



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Vale destacar que a pressão ideal também depende de fatores como (Cury, 2020):

- Peso total do ciclista e da bicicleta;
- Tipo de terreno (asfalto, trilha seca, lama, cascalho);
- Volume de ar do sistema (diâmetro e largura do pneu).

Em sistemas *tubeless*, a vantagem de poder rodar com pressões mais baixas sem risco de pinçar a câmara é um dos principais atrativos. Isso melhora a tração e o conforto, mas exige atenção à vedação e à calibragem regular.

2.2 SENSORES

Sensores são dispositivos capazes de detectar alterações em grandezas físicas, químicas ou biológicas e convertê-las em sinais elétricos que podem ser interpretados por sistemas eletrônicos de controle (Mattede, 2019). Eles atuam como a ponte entre o ambiente físico e os circuitos de automação, fornecendo informações essenciais para o funcionamento automático de máquinas e equipamentos. Entre os exemplos comuns de sensores estão os de temperatura, pressão, posição, umidade e luminosidade.

No sistema de talonamento de pneus sem câmara proposto, sensores são utilizados para monitorar variáveis do sistema e auxiliar o controle eletrônico durante a operação. Entre eles, destacam-se os sensores de pressão, responsáveis pelo acompanhamento da pressão do ar, e sensores fotoelétricos, que podem ser empregados como elementos auxiliares de identificação de condições específicas de funcionamento.

2.2.1 Sensores de Pressão

Sensores de pressão são dispositivos projetados para medir a pressão exercida por um fluido (líquido ou gás) sobre uma superfície e converter essa informação em um sinal elétrico proporcional (Engellogic, 2018). Entre as tecnologias mais utilizadas estão os sensores piezoresistivos, capacitivos e piezoelétricos. Cada um desses modelos possui características específicas que se adequam melhor a diferentes aplicações, de acordo com fatores como precisão, faixa de medição, resposta em frequência e tipo de saída.

Segundo Balbinot e Brusamarello (2011, p. 345), sensores modernos são frequentemente construídos como dispositivos de estado sólido, baseados em microestruturas que se deformam sob pressão, gerando um sinal elétrico proporcional. A Figura 9 apresenta uma curva típica de funcionamento, em que o aumento da pressão resulta em um aumento proporcional da tensão de saída.

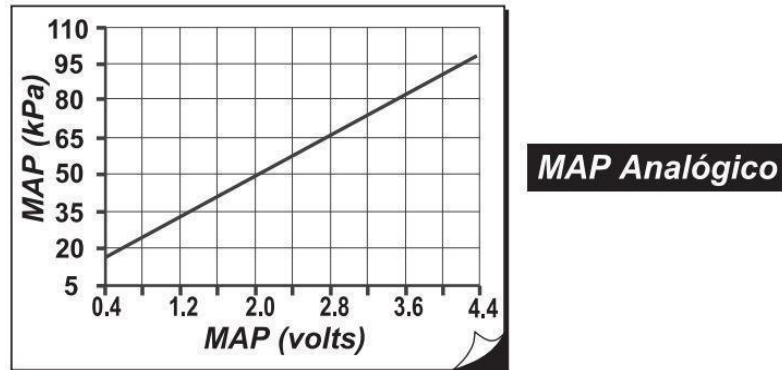
Sensores de pressão são amplamente utilizados em aplicações industriais, automotivas e de instrumentação para monitorar sistemas de ar comprimido, hidráulica, pneumática e muitos outros processos.

Os sensores de pressão podem ser classificados conforme o tipo de medida realizada (Balbinot e Brusamarello, 2007, p. 336):

- Pressão absoluta: mede em relação ao vácuo completo (zero absoluto);

- Pressão relativa (manométrica): mede em relação à pressão atmosférica local;
- Pressão diferencial: mede a diferença entre dois pontos distintos de um sistema.

Figura 9 - Exemplo de relação entre tensão de saída pela pressão absoluta



Fonte: Canal da Peça (2020).

Além da classificação por tipo de referência, a medição de pressão pode ser dividida em estática, quando não há variações significativas ao longo do tempo (como em um reservatório pressurizado), ou dinâmica, quando há rápidas flutuações, como em sistemas com fluidos em movimento ou variação cíclica de pressão (Balbinot e Brusamarello, 2007, p. 336). A Figura 10 apresenta um exemplo de sensor de pressão.

Figura 10 - Exemplo de sensor de pressão



Fonte: Store (2025).

2.2.2 Parâmetros Técnicos Relevantes em Sensores de Pressão

Diversas características são consideradas relevantes no desempenho de sensores de pressão aplicados em sistemas automatizados (Engellogic, 2018).

Os sensores de pressão apresentam algumas características fundamentais que devem ser consideradas em sua aplicação. A faixa de operação corresponde ao intervalo de pressão que o sensor é capaz de medir com precisão, devendo abranger as condições de trabalho previstas para o sistema. O tipo de saída também é um aspecto importante, pois esses sensores podem fornecer sinais analógicos, como variações de tensão ou corrente, ou sinais digitais. Em sistemas de leitura contínua, os sensores analógicos são amplamente utilizados pela facilidade de integração com circuitos eletrônicos e microcontroladores.

A precisão está relacionada à capacidade do sensor de fornecer leituras consistentes e confiáveis, sendo especialmente relevante em processos que envolvem controle e monitoramento de pressão. A alimentação elétrica normalmente ocorre por tensões padronizadas, como 3,3 V ou 5 V, compatíveis com microcontroladores e demais circuitos eletrônicos. O material de construção influencia diretamente na resistência do sensor a condições ambientais, como umidade, poeira e variações térmicas.

Além disso, o tempo de resposta deve ser considerado em aplicações nas quais ocorrem variações rápidas de pressão, como no acionamento de válvulas solenoides. Nesses casos, é importante que o sensor apresente resposta adequada, permitindo acompanhar as mudanças de pressão sem comprometer a fidelidade do sinal medido (Balbinot e Brusamarello, 2007, p. 338).

2.2.3 Sensores fotoelétricos

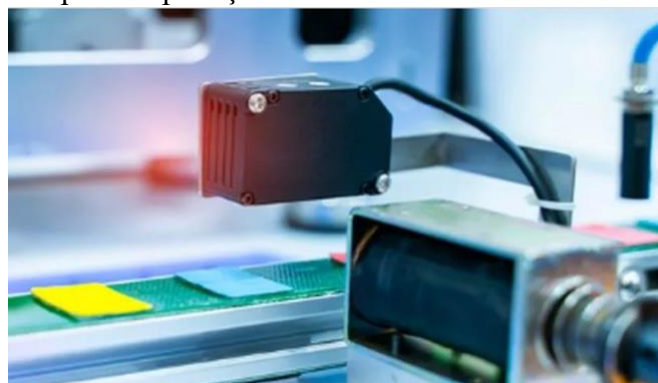
Além dos sensores de pressão, sistemas de automação também podem utilizar sensores fotoelétricos para identificar alterações no ambiente e gerar sinais elétricos interpretáveis por circuitos de controle. De acordo com Cravo (2023), o sensor fotoelétrico é um dispositivo capaz de converter uma manifestação luminosa, como luz ou sombra, em uma grandeza elétrica, como tensão ou resistência. Essa característica permite que o sinal gerado pelo sensor seja utilizado em sistemas automatizados para realizar comandos ou identificar determinadas condições de operação.

A utilização desse tipo de sensor é comum em aplicações industriais, especialmente em processos que exigem detecção de objetos, identificação de materiais, medição de distâncias e detecção de bordas (Cravo, 2023). A Figura 11 apresenta um exemplo de aplicação de sensor fotoelétrico em uma esteira de linha de produção.

Os sensores fotoelétricos apresentam diferentes formas de funcionamento, conforme a disposição entre emissor e receptor de luz. Entre os tipos citados por Cravo (2023), estão os

sensores difusos, retro reflexivos e de barreira. No sensor difuso, o emissor e o receptor ficam no mesmo invólucro, e a detecção ocorre quando o feixe de luz emitido é refletido por um objeto e retorna ao receptor. No sensor retro reflexivo, também há emissor e receptor no mesmo conjunto, porém o feixe é refletido por um espelho prismático. Já no sensor de barreira, emissor e receptor ficam separados, e a detecção acontece quando algum objeto interrompe o feixe de luz.

Figura 11 - Exemplo de aplicação de sensor fotoelétrico em linha de produção



Fonte: Cravo (2023).

Por converter variações de luz em sinais elétricos, o sensor fotoelétrico pode ser integrado a microcontroladores e circuitos eletrônicos, atuando como recurso auxiliar para identificação de condições específicas durante o funcionamento de um sistema automatizado.

2.3 ATUADORES NO SISTEMA DE TALONAMENTO

Atuadores são dispositivos fundamentais em sistemas de automação, responsáveis por converter diferentes formas de energia — como elétrica, pneumática ou hidráulica — em movimento mecânico. Eles atuam como a interface entre o sistema de controle e o ambiente físico, executando ações que variam desde aberturas e fechamentos de válvulas até movimentos complexos em braços robóticos. Ou seja, enquanto sensores coletam informações do ambiente, os atuadores são os componentes que agem com base nessas informações, realizando tarefas específicas conforme os comandos recebidos (CIM Automação, 2024).

De forma geral, atuadores são dispositivos que modificam uma variável controlada dentro de um sistema automatizado. Eles recebem sinais provenientes do controlador e executam ações físicas no sistema, geralmente operando com níveis mais elevados de potência. Entre os exemplos mais comuns de atuadores estão válvulas (pneumáticas e hidráulicas), relés (eletromecânicos ou estáticos), motores (como servomotores e step-motors) e solenóides

(Thomazini, 2009, p. 17). A Figura 12 ilustra os três tipos principais de atuadores utilizados na indústria: elétrico, pneumático e hidráulico.



Fonte: Adaptado de Unival Válvulas e Conexões (2024).

Em sistemas automatizados, o tempo de resposta dos atuadores é um fator determinante para o desempenho e a eficiência do processo. Atuadores com acionamento lento ou impreciso podem comprometer toda a operação, especialmente quando é necessário sincronismo entre o acionamento e o resultado esperado (SMC Corporation, 2024). No caso do projeto em questão, em que o talonamento depende da liberação súbita de ar comprimido, o tempo de atuação precisa ser reduzido o suficiente para permitir a expansão rápida do pneu e o encaixe do talão no aro.

A capacidade de um atuador abrir ou fechar um mecanismo em milésimos de segundo permite que ações como a liberação de pressão ocorram de forma controlada, repetível e segura (SMC Corporation, 2024). Isso garante que o sistema funcione de maneira eficiente, sem exigir esforço manual ou depender de tentativa e erro. Além disso, atuadores bem dimensionados, com controle eletrônico, tornam possível aplicar a força necessária apenas no momento certo, reduzindo desgastes mecânicos e otimizando recursos.

Segundo a SMC Corporation (2024), a escolha adequada do atuador e seu tempo de resposta são essenciais para manter a eficiência, a segurança e a confiabilidade em sistemas de automação industrial, especialmente aqueles que exigem precisão em processos de liberação ou bloqueio de fluxo.

2.3.1 Papel dos atuadores no projeto

Durante o processo de talonamento, é necessário que uma grande quantidade de ar

comprimido seja liberada de forma súbita no interior do pneu. Essa liberação precisa ocorrer em intervalo reduzido, para que o talão do pneu se expanda contra as bordas do aro, promovendo o encaixe e garantindo a vedação do sistema. Para realizar essa função com precisão, é necessário empregar um mecanismo de controle que permita a passagem do ar no momento exato.

É nesse contexto que os atuadores entram em ação. No projeto proposto, a válvula solenoide foi escolhida para desempenhar essa função, operando como um dispositivo eletromecânico capaz de abrir e fechar rapidamente, controlando a passagem do ar de maneira eficiente. Como destaca Luiz Kuchenbecker Panin (2021), válvulas solenoides são amplamente utilizadas em aplicações que exigem rapidez e confiabilidade na ativação de fluxos de fluido, tornando-se adequadas para esse tipo de sistema.

A válvula solenoide é um dispositivo eletromecânico utilizado para controlar o fluxo de fluido (líquido ou gás) em um sistema. Seu funcionamento é baseado em um solenoide, que é uma bobina de fio condutor que, ao ser energizada por corrente elétrica, gera um campo magnético. Esse campo atrai um êmbolo (ou núcleo móvel), que se movimenta dentro da estrutura da válvula, permitindo ou bloqueando a passagem do fluido (Jefferson, 2023).

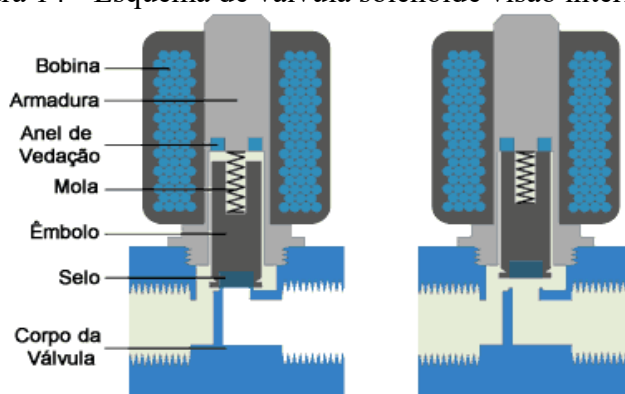
Internamente, a válvula é composta por uma bobina, uma mola, um êmbolo, um corpo com entradas e saídas, além de vedações e guias. A movimentação desses componentes ocorre conforme o campo magnético é ativado ou desativado, o que depende do tipo de válvula e da aplicação específica. A Figura 13 mostra um modelo típico de válvula solenoide externa, enquanto a Figura 14 apresenta uma vista em corte, destacando seus principais componentes internos.

Figura 13 - Válvula solenoide visão externa



Fonte: Jefferson (2019).

Figura 14 - Esquema de válvula solenoide visão interna



Fonte: Casa das Válvulas (2022).

Esse princípio torna a válvula solenóide ideal para sistemas que exigem acionamento rápido e automático do fluxo, como o sistema de talonamento deste projeto, onde a resposta instantânea é fundamental para o sucesso da operação (Jefferson, 2023).

As válvulas solenoides podem ser classificadas segundo o número de vias, o estado de repouso e o modo de acionamento (Jefferson, 2023).

Quanto ao número de vias, as válvulas solenoides podem ser classificadas conforme a quantidade de conexões e estados operacionais. Entre as configurações mais comuns estão as válvulas 2/2 vias, que possuem duas conexões, sendo uma entrada e uma saída, e dois estados de operação, aberta ou fechada. Também são utilizadas válvulas 3/2 vias, que apresentam três conexões e dois estados operacionais, sendo comumente empregadas no acionamento de sistemas pneumáticos.

Com relação ao estado de repouso, as válvulas podem ser classificadas como normalmente fechadas (NF) ou normalmente abertas (NA). As válvulas normalmente fechadas bloqueiam o fluxo quando estão desenergizadas e permitem a passagem do fluido quando recebem sinal elétrico. Já as válvulas normalmente abertas permitem o fluxo na condição desenergizada e interrompem a passagem do fluido ao serem energizadas.

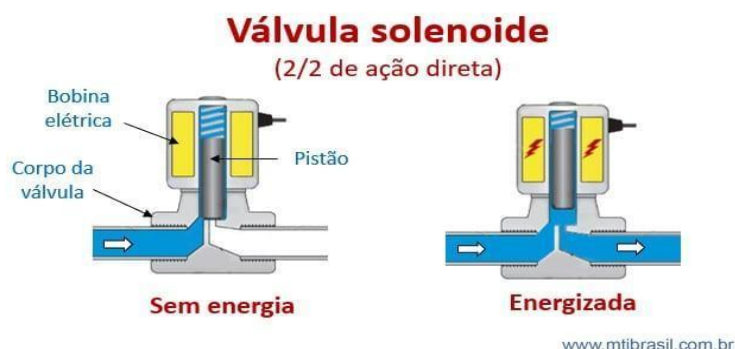
As válvulas solenoides também podem ser classificadas quanto à sua estabilidade operacional em monoestáveis e biestáveis. As válvulas monoestáveis retornam automaticamente ao estado inicial quando a corrente elétrica é desligada, sendo bastante utilizadas em aplicações nas quais se deseja que o sistema volte a uma condição segura de repouso. Já as válvulas biestáveis permanecem no último estado acionado até receberem um novo sinal elétrico, permitindo manter a posição sem a necessidade de energização contínua.

Quanto ao modo de acionamento, as válvulas solenoides podem operar por ação direta, ação indireta ou servo-operada, e por ação combinada. Nas válvulas de ação direta, a força

eletromagnética gerada pela bobina atua diretamente sobre o êmbolo, promovendo a abertura ou o fechamento da passagem do fluido. Nas válvulas servo-operadas, também chamadas de pilotadas, a pressão do próprio fluido é utilizada como força auxiliar para realizar o acionamento, sendo necessária uma pressão mínima de trabalho para seu funcionamento adequado. Já as válvulas de ação combinada reúnem características dos dois princípios anteriores, permitindo melhor desempenho em baixas pressões ou em condições específicas de operação.

Entre os diversos tipos de válvulas solenoide existentes, aquelas com configuração 2/2 vias, normalmente fechadas, monoestáveis e de ação direta são amplamente utilizadas em aplicações que exigem controle simples, confiável e resposta rápida (Jefferson, 2023). A Figura 15 apresenta um exemplo de válvula de ação direta utilizada em sistemas industriais automatizados, ilustrando suas principais características construtivas.

Figura 15 - Exemplo de um esquema de válvula solenoide de ação direta



Fonte: Master Tecnologia Industrial (2024).

Entre as principais vantagens desse tipo de válvula estão a resposta rápida ao comando elétrico, o baixo consumo de energia, a facilidade de integração com circuitos eletrônicos e a construção compacta e robusta. Sua operação é silenciosa, confiável e permite ser acionada à distância de forma precisa, o que a torna ideal para projetos automatizados como destaca Luiz Kuchenbecker Panin (2021).

No contexto deste trabalho, a escolha pela válvula solenoide se mostrou mais adequada em comparação com outros tipos disponíveis no mercado. As válvulas manuais, por dependerem da ação direta do usuário, inviabilizam o controle automático. Isso ocorre porque sua operação exige a abertura ou fechamento físico de um registro, o que impede a integração com sistemas automatizados de acionamento. Já as válvulas pneumáticas exigiriam um sistema com linhas de ar e componentes adicionais, aumentando o custo, a complexidade e o espaço

necessário. Por outro lado, a válvula solenoide permite atuação rápida e precisa por meio de sinal elétrico, o que facilita a automação e o controle sincronizado com os demais elementos do sistema (Nauco, 2022).

2.3.2 Considerações Técnicas Importantes

Antes de escolher e instalar uma válvula solenoide, é importante considerar alguns aspectos técnicos que podem impactar diretamente o desempenho e a segurança do sistema. Esses fatores ajudam a garantir que a válvula funcione corretamente com o fluido, a pressão e a tensão disponíveis.

Um dos primeiros pontos a ser observado é a pressão mínima e máxima de operação da válvula. Em sistemas como o deste projeto, onde o ar comprimido é armazenado e depois liberado de forma súbita, é essencial que a válvula suporte a pressão do reservatório sem vazamentos ou travamentos. Modelos de ação direta, como o utilizado aqui, normalmente funcionam bem mesmo com baixas pressões, o que é uma vantagem em sistemas pequenos ou portáteis (Jefferson, 2023).

As especificações de pressão geralmente vêm gravadas diretamente no corpo da válvula, facilitando a identificação e a seleção do componente adequado para a aplicação. A Figura 16 ilustra um exemplo de faixa de pressão impressa no corpo de uma válvula solenoide.

Figura 16 - Faixa de pressão impressa diretamente no corpo da válvula solenoide



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Outro fator importante é a tensão de alimentação. A maioria das válvulas solenoide de uso geral opera com 12 V ou 24 V em corrente contínua (DC), facilitando a integração com fontes simples ou sistemas controlados por microcontroladores (Jefferson, 2023). As

informações sobre a tensão elétrica não costumam estar no corpo hidráulico da válvula, mas sim na bobina, que é montada separadamente. A Figura 17 mostra um exemplo de indicação de tensão de operação impressa diretamente na bobina de uma válvula solenoide.

Figura 17 - Indicação da tensão impressa na bobina da válvula solenoide



Fonte: Adaptado de Poly Belt (2025).

Também é necessário verificar a compatibilidade da válvula com o fluido utilizado. Embora o ar comprimido seja amplamente aceito pela maioria dos modelos, é importante evitar o uso de válvulas projetadas para líquidos em sistemas pneumáticos e vice-versa. A presença de umidade no ar, por exemplo, pode comprometer a durabilidade dos componentes internos se o modelo não for adequado (Jefferson, 2023).

Além disso, o tempo de resposta da válvula é um fator relevante para aplicações que exigem precisão (Jefferson, 2023). Solenoides de qualidade conseguem abrir ou fechar em milissegundos, o que é ideal para liberar o ar rapidamente no processo de talonamento. A válvula deve ser montada de forma que minimize restrições ao fluxo, com conexões bem vedadas e compatíveis com o diâmetro das mangueiras utilizadas.

Por fim, recomenda-se que o sistema utilize ar limpo e seco, e que a válvula seja instalada em local protegido contra poeira e umidade excessiva, prolongando sua vida útil e evitando falhas prematuras.

2.4 CONTROLE ELETRÔNICO

O controle eletrônico é responsável por gerenciar os sinais de entrada, processar as informações recebidas e comandar a atuação dos componentes de um sistema automatizado. Em aplicações com sensores e atuadores, esse controle permite que o funcionamento do sistema ocorra de acordo com parâmetros previamente definidos, reduzindo a necessidade de

intervenção manual constante.

Em sistemas automatizados, como o proposto neste projeto, o controle eletrônico tem como função interpretar informações recebidas dos sensores, processar a lógica de operação e comandar o acionamento dos atuadores no momento adequado (Kerschbaumer, 2022). No caso de sistemas pneumáticos, esse controle pode envolver a leitura de pressão, o acionamento de válvulas solenoides, o comando de compressores e a supervisão de condições de segurança.

O uso de um microcontrolador permite integrar diferentes componentes em um mesmo sistema de controle, como sensores, atuadores e interface de usuário. Dessa forma, é possível realizar a leitura de variáveis do processo, executar decisões lógicas e acionar cargas elétricas por meio de circuitos intermediários, como módulos de relés ou transistores, quando a corrente exigida pelos componentes for superior à capacidade das portas do microcontrolador.

Além do comando dos atuadores, o controle eletrônico também pode ser utilizado para apresentar informações ao operador, receber parâmetros de operação e indicar estados do sistema. Essa interação ocorre por meio de dispositivos de interface, como displays, encoders ou sinalizadores sonoros, permitindo que o usuário acompanhe o funcionamento do sistema e realize ajustes conforme a aplicação.

2.4.1 Microcontroladores

Os microcontroladores são dispositivos eletrônicos que reúnem, em um único chip, componentes essenciais de um sistema computacional: unidade de processamento (CPU), memórias (RAM, ROM e EEPROM) e interfaces de entrada e saída (I/O) (Kerschbaumer, 2022). Essa integração permite que eles monitorem variáveis do ambiente, processem informações e comandem atuadores de forma autônoma e eficiente.

Ao contrário dos computadores tradicionais, projetados para múltiplas aplicações, os microcontroladores são destinados a tarefas específicas, operando de forma dedicada e contínua em sistemas embarcados. Eles são amplamente utilizados em automação industrial, automóveis, eletrodomésticos, sistemas de segurança, dispositivos médicos e equipamentos de consumo.

Um sistema embarcado é um conjunto de hardware e software dedicado a realizar funções específicas dentro de um equipamento maior, operando de forma automática e integrada (Kerschbaumer, 2022).

No projeto deste trabalho, o microcontrolador tem como papel central a leitura dos sinais enviados pelos sensores, o processamento lógico dessas informações e o comando dos

atuadores do sistema, além da gestão da interface de usuário. Essa atuação permite que o controle do processo ocorra de acordo com as condições medidas e com os parâmetros definidos pelo usuário.

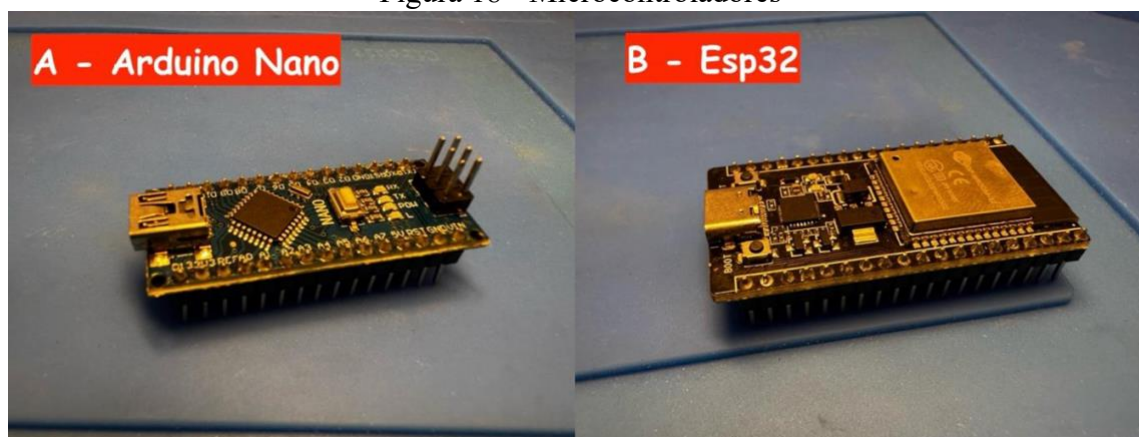
O Arduino Nano se destaca pela sua reduzida dimensão física e pela possibilidade de integração em protótipos com espaço limitado. Apesar de seu tamanho compacto, o Nano oferece funcionalidades similares ao Arduino Uno, incluindo múltiplas entradas e saídas digitais e analógicas, além de comunicação serial. Opera com tensão de 5 V e pode ser aplicado em sistemas embarcados que exigem controle de sensores, atuadores e dispositivos de interface (Ashely, 2021).

Além das entradas e saídas digitais e analógicas, microcontroladores também podem utilizar protocolos de comunicação para troca de dados com periféricos. Um exemplo é o barramento I2C, utilizado para comunicação entre o microcontrolador e dispositivos como displays, sensores e módulos eletrônicos. Esse tipo de comunicação permite a troca de informações por meio de um número reduzido de conexões, sendo comum em sistemas embarcados que utilizam periféricos de visualização ou leitura de dados.

Já o ESP32 é uma opção mais avançada, oferecendo processamento mais rápido, maior número de pinos e conectividade Wi-Fi e Bluetooth nativas. Opera em 3,3 V e é indicado para projetos que demandam comunicação sem fio ou maior capacidade de processamento (Tutorials, 2016).

A Figura 18 - A, apresenta um exemplo de microcontrolador Arduino Nano, enquanto a Figura 18 - B mostra um ESP32, ambos aptos a desempenhar as funções de controle necessárias para o sistema de talonamento de pneus sem câmara.

Figura 18 - Microcontroladores



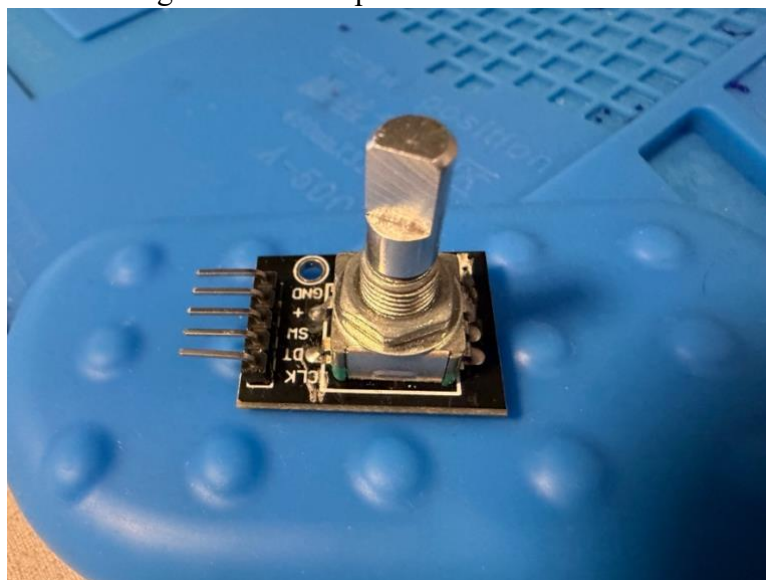
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

2.4.2 Interface de Usuário

Em sistemas de automação e controle, os dispositivos de entrada são utilizados para permitir que o usuário selecione parâmetros, navegue entre opções ou confirme comandos. Entre esses dispositivos, pode-se citar o encoder rotativo, componente eletromecânico capaz de transformar movimentos rotativos em impulsos elétricos interpretáveis por um microcontrolador. De acordo com Cia (2015), o encoder rotativo pode ser utilizado para converter movimentos rotativos ou lineares em impulsos elétricos, gerando sinais que podem ser lidos por placas como o Arduino. Esse tipo de componente permite identificar o sentido de giro e a quantidade de deslocamento angular, possibilitando o aumento ou a redução de valores em uma interface de controle.

Além da rotação, muitos encoders rotativos possuem um botão integrado ao próprio eixo, que pode ser utilizado como comando de seleção ou confirmação. Essa característica torna o componente útil em interfaces compactas, pois permite reunir navegação e acionamento em um único dispositivo. A Figura 19 apresenta um exemplo de encoder rotativo utilizado em sistemas eletrônicos de controle.

Figura 19 - Exemplo de encoder rotativo

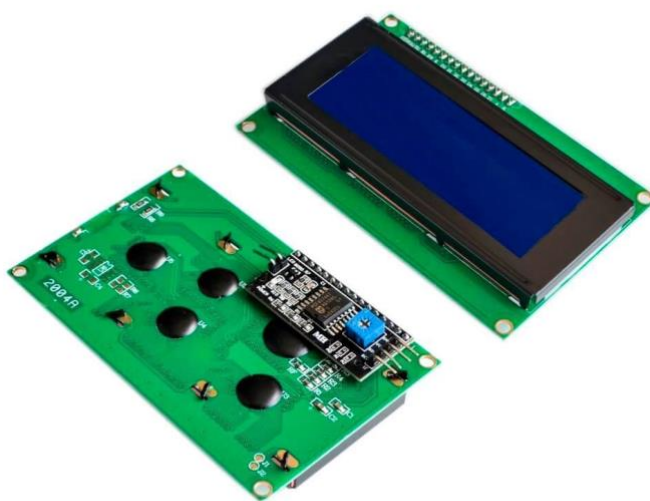


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Em sistemas automatizados, a visualização de informações é essencial para o monitoramento das condições de operação e a tomada de decisões. Para isso, são utilizados dispositivos eletrônicos que apresentam dados de forma visual, permitindo a interação eficiente

entre o sistema e o usuário (Mello, 2023). Entre esses dispositivos, destacam-se os displays de cristal líquido (LCD), que possibilitam a apresentação de textos, símbolos e valores numéricos, sendo empregados quando há necessidade de exibir informações de operação de forma clara ao usuário. A Figura 20 apresenta um exemplo de display LCD utilizado em sistemas eletrônicos.

Figura 20 - Display LCD



Fonte: Mss Eletrônica (2025).

Além dos dispositivos de entrada e visualização, a interface também pode contar com elementos de sinalização sonora, como buzzers. Esses componentes são utilizados para emitir sinais audíveis em determinadas condições de operação, como confirmação de comandos, alertas, erros ou finalização de uma etapa do processo. Em sistemas embarcados, o buzzer atua como um recurso auxiliar de comunicação com o operador, complementando as informações apresentadas visualmente pelo display.

2.5 ELEMENTOS AUXILIARES

Nesta seção são apresentados os elementos complementares necessários para o desenvolvimento do projeto, como cilindros de ar comprimido e compressores de ar.

2.5.1 Cilindros de ar comprimido

O armazenamento de ar sob pressão é essencial para sistemas pneumáticos que exigem

rápida liberação de grandes volumes de ar.

Os cilindros de ar comprimido são componentes responsáveis por armazenar ar ou outros gases sob alta pressão, permitindo seu uso posterior de maneira controlada. Eles são fundamentais em sistemas pneumáticos industriais, automotivos e de automação, pois possibilitam a liberação rápida de energia acumulada para realizar diferentes tipos de trabalho (Equipe Nepin, 2022).

Esses reservatórios têm a função de acumular o ar comprimido gerado por um compressor, garantindo que o sistema mantenha uma reserva suficiente para acionamentos de alta demanda ou para fornecer fluxo imediato de ar, sem depender exclusivamente da compressão no instante da utilização.

As principais características dos cilindros de ar comprimido estão relacionadas à capacidade de armazenamento, ao limite seguro de operação, ao material de construção e aos dispositivos de segurança. A capacidade volumétrica, definida em litros, determina a quantidade de ar que pode ser armazenada no interior do cilindro. A pressão de trabalho especifica o limite seguro de operação do reservatório, sendo geralmente indicada em bar ou PSI. O material de construção normalmente é aço carbono ou alumínio, pois esses materiais apresentam resistência mecânica e durabilidade adequadas para aplicações com ar comprimido. Além disso, os cilindros devem contar com dispositivos de segurança, como válvulas de alívio e manômetros, essenciais para garantir a operação segura do sistema em situações de sobrepressão.

Além dessas características, a seleção adequada de um cilindro deve considerar as necessidades específicas da aplicação, como o volume necessário de ar, a pressão de operação e a frequência de uso (Equipe Nepin, 2022). A Figura 21 apresenta um exemplo de tanque pressurizado com indicação da pressão máxima de trabalho.

No sistema de talonamento automático para pneus sem câmara desenvolvido neste projeto, o uso de um cilindro de ar comprimido desempenha um papel fundamental. Ele é responsável por armazenar o ar pressurizado que será liberado de forma súbita no momento do talonamento, possibilitando que o pneu se expanda rapidamente e se encaixe corretamente nas bordas do aro.

A necessidade de uma reserva de ar sob pressão decorre do fato de que, para o talonamento ocorrer de maneira eficaz, é essencial uma alta vazão de ar em um curto espaço de tempo. A utilização direta de compressores convencionais de pequeno porte, como os usados para encher pneus de carros ou bolas, muitas vezes não fornece a vazão necessária para esse

processo, o que pode resultar em falhas no encaixe ou em tentativas repetidas.

Figura 21 - Cilindro de ar comprimido



Fonte: Adaptado de Poly Belt (2025).

Dessa forma, o cilindro atua como reservatório de energia pneumática, acumulando a pressão necessária ao longo do tempo e permitindo sua liberação controlada mediante o acionamento da válvula solenoide.

2.5.2 Compressores de Ar

O fornecimento de ar comprimido é essencial para o funcionamento de uma ampla variedade de sistemas pneumáticos, possibilitando o acionamento de ferramentas, dispositivos de automação e processos industriais. Os compressores são os equipamentos responsáveis por captar o ar atmosférico e elevar sua pressão, permitindo seu armazenamento em reservatórios ou aplicação direta em sistemas que demandam força mecânica — como no caso do presente projeto, voltado ao talonamento de pneus sem câmara (Sales, 2024).

Os compressores podem ser classificados conforme o princípio de funcionamento e o tipo de mecanismo utilizado na compressão do ar. Entre os principais tipos, destacam-se os compressores alternativos, também conhecidos como compressores de pistão, que convertem o movimento rotativo de um eixo em movimento linear de um pistão por meio de um sistema biela-manivela. Durante o ciclo de operação, o pistão realiza as etapas de admissão, compressão, descarga e expansão do ar. Esse tipo de compressor é amplamente utilizado em aplicações de pequeno e médio porte, como oficinas e sistemas portáteis. Seu funcionamento

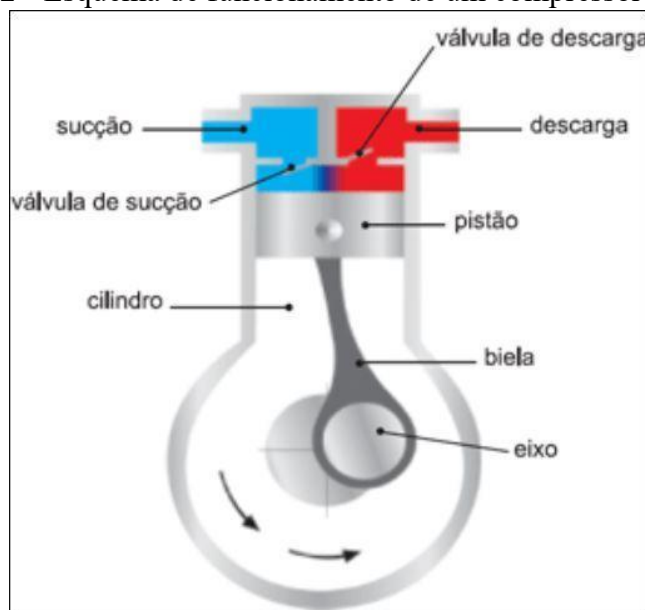
baseia-se no controle automático das válvulas de sucção e descarga, que abrem ou fecham conforme a pressão interna do cilindro (Fialho, 2004, p. 43-44).

Outro tipo é o compressor de parafuso rotativo, que utiliza dois parafusos helicoidais entrelaçados. Durante o giro desses elementos, o ar é comprimido de forma contínua, o que torna esse tipo de compressor adequado para sistemas industriais que demandam fluxo constante e maior eficiência operacional.

Também existem os compressores centrífugos, que operam com base na força centrífuga gerada por um impelidor rotativo. Nesse processo, a energia cinética do ar é convertida em pressão, sendo esse tipo de compressor mais indicado para instalações de grande porte e aplicações que exigem elevada vazão de ar comprimido.

O ciclo de funcionamento de um compressor alternativo envolve a admissão do ar, compressão por deslocamento do pistão, descarga e expansão. Na Figura 22, observa-se o princípio de funcionamento básico de um compressor de pistão.

Figura 22 - Esquema de funcionamento de um compressor de pistão



Fonte: Arc Ar Comprimido (2022).

No sistema de talonamento automático proposto, o fornecimento de ar comprimido é necessário para carregar o reservatório que posteriormente será utilizado para expandir o pneu e encaixar o talão no aro.

O carregamento do reservatório poderia, em teoria, ser realizado utilizando bombas manuais, como bombas de mão ou bombas de pé. No entanto, essa abordagem apresentaria limitações operacionais. O processo de enchimento manual demandaria maior esforço do

operador e tempo de preparação, especialmente considerando a necessidade de atingir pressões mais elevadas para garantir o volume de ar necessário ao talonamento.

Além da dificuldade física, a utilização de uma bomba manual comprometeria o conceito de automação do sistema. Enquanto a liberação do ar seria comandada eletronicamente por meio de válvula solenoide e controle eletrônico, o carregamento do reservatório permaneceria dependente da atuação manual do operador. Dessa forma, parte do processo continuaria sendo manual, reduzindo a autonomia do sistema.

Por esse motivo, para preservar a proposta de operação automatizada, considera-se o uso de compressores de pequeno porte, capazes de realizar o carregamento do reservatório de forma controlada. Assim, o compressor atua como elemento responsável por fornecer o ar comprimido necessário para que o sistema mantenha uma reserva adequada antes da etapa de liberação para o pneu.

3 METODOLOGIA DE PROJETO

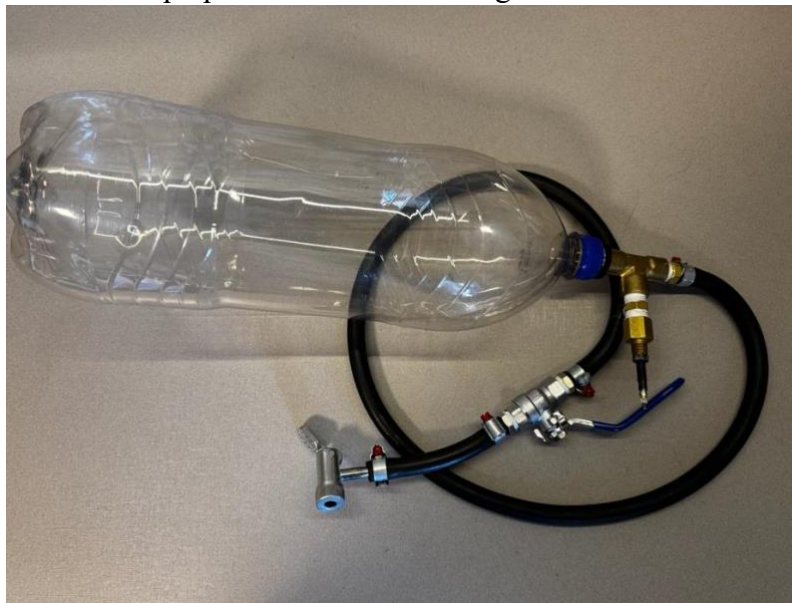
Este capítulo descreve os elementos que compõem o sistema, as justificativas técnicas para sua escolha e a proposta de implementação do conjunto automatizado.

3.1 VALIDAÇÃO PRÉVIA COM PROTÓTIPO MANUAL

Como parte do estudo, foi desenvolvido um protótipo manual com o objetivo de verificar se a ideia de talonar pneus sem câmara utilizando ar pressurizado liberado de forma rápida funcionaria na prática. A proposta era validar o conceito antes da construção do sistema automatizado.

O teste foi realizado, utilizando uma garrafa PET como reservatório de ar, conectores e uma válvula manual para permitir a liberação rápida da pressão acumulada. Após pressurizar o reservatório a 80 PSI, o ar era liberado instantaneamente, simulando o funcionamento que se espera do sistema final. A Figura 23 demonstra o protótipo construído.

Figura 23 - Protótipo para talonamento com garrafa PET e válvula manual



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Durante o teste, foi utilizado um aro da marca Specialized, com perfil interno reto, mas adaptado para o sistema *tubeless* por meio da aplicação de fita de vedação, conforme mostra a Figura 1. O pneu utilizado foi o Chaoyang Phantom Speed Elite 29", compatível com sistemas sem câmara, apresentado na Figura 5.

Mesmo com o uso de um aro de parede reta (sem ganchos *tubeless*), o sistema se mostrou eficiente: a liberação súbita do ar foi suficiente para que o talão do pneu encaixasse corretamente nas bordas do aro, gerando a vedação necessária. O resultado do teste serviu como base para confirmar a viabilidade da proposta e seguir para a fase de desenvolvimento automatizado.

3.2 SENSOR DE PRESSÃO

A seleção dos sensores de pressão foi baseada na necessidade de monitorar a pressão em diferentes pontos do sistema automatizado de talonamento. Com base nos testes manuais realizados previamente (descritos na Seção 3.1), verificou-se que pressões próximas a 100 PSI foram suficientes para garantir o encaixe adequado do pneu no aro. No entanto, com a utilização de um reservatório mais robusto e seguro no sistema automatizado, considerou-se prudente trabalhar com uma margem de segurança maior. Por isso, foram adotados sensores com faixa de operação de 0 a 150 PSI, equivalente a aproximadamente 0 a 10 BAR. Os sensores selecionados possuem saída analógica de 0,5 a 4,5 V, característica que permite sua integração com microcontroladores que operam com sinais analógicos, como o Arduino Nano, que será detalhado em seção posterior. Essa característica permite ao sistema interpretar, com resolução adequada, a variação da pressão do reservatório e do trecho de saída do ar, auxiliando no acionamento das válvulas solenoides e no acompanhamento da pressão durante o funcionamento.

Entre as características técnicas mais relevantes do sensor de pressão utilizado, destaca-se a precisão de $\pm 0,5\%$ FS, que contribui para a confiabilidade das leituras realizadas durante o monitoramento da pressão. O sensor apresenta saída linear, variando de 0,5 V para 0 PSI até 4,5 V para 150 PSI, o que facilita sua leitura pelo microcontrolador e permite a conversão do sinal elétrico em valores de pressão.

Outro aspecto importante é a conexão por rosca 1/8" NPT, compatível com conexões amplamente disponíveis no mercado e de fácil adaptação à linha pneumática do sistema. A tensão de alimentação de 5 VCC é fornecida por meio de um conversor DC-DC conectado à alimentação principal do protótipo, possibilitando a integração do sensor com o circuito eletrônico desenvolvido. Além disso, o sensor possui proteção IP67, o que assegura resistência contra poeira e contato com água, contribuindo para maior robustez em aplicações práticas.

O sensor escolhido é apresentado na Figura 24.

No protótipo desenvolvido, foram utilizados dois sensores com as mesmas especificações técnicas. Um deles foi instalado no trecho de alta pressão, responsável pelo monitoramento da pressão acumulada no reservatório, enquanto o outro foi aplicado no trecho de saída, permitindo acompanhar a pressão relacionada ao pneu durante o processo. Essa leitura é fundamental para que o sistema determine as condições de atuação com base nos valores de pressão definidos na lógica de controle.

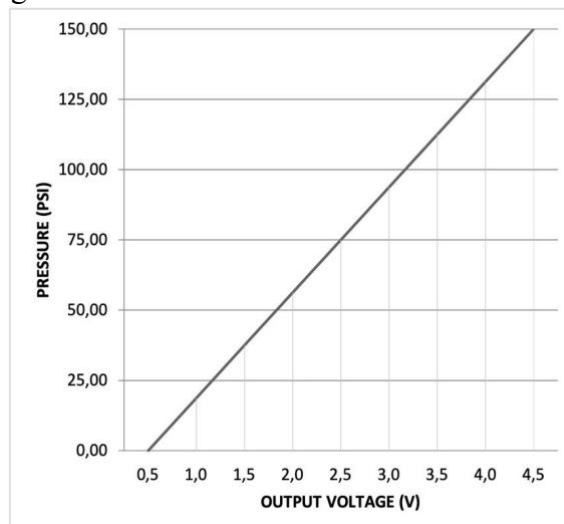
Figura 24 - Sensor de pressão escolhido



Fonte: Aliexpress (2025).

O modelo adotado possui três fios de conexão: o vermelho para alimentação em 5 VDC, o preto para o terra (GND) e o verde destinado ao envio de um sinal analógico de saída, cuja faixa varia de 0,5 a 4,5 V em função da pressão detectada. Essa relação linear entre a pressão e a tensão de saída é ilustrada na Figura 25.

Figura 25 - Curva de tensão do sensor escolhido



Fonte: Reveltronics (2024).

3.3 VÁLVULA SOLENOIDE

As válvulas solenoides são os componentes responsáveis por controlar a passagem de ar no sistema. Para este projeto, foram utilizadas duas válvulas com funções distintas: uma válvula solenoide de alta pressão, responsável por liberar o ar armazenado no momento do talonamento, e uma válvula solenoide de alívio, utilizada para auxiliar no controle da pressão no trecho de saída. Ambas são normalmente fechadas (NF), ou seja, permanecem fechadas enquanto não recebem sinal elétrico, liberando o fluxo de ar apenas quando energizadas.

A escolha por esse modelo se deu por diversos motivos. Primeiro, por permitir controle elétrico por meio de um sinal vindo do microcontrolador. Segundo, por oferecer uma resposta rápida, o que é essencial para que o ar seja liberado de forma súbita e consiga talonar o pneu corretamente. E terceiro, por não depender de pressão mínima para funcionar, característica importante neste projeto, já que o sistema deve operar com pressões entre 0 e 150 PSI, equivalente a aproximadamente 0 a 10 bar.

A válvula solenoide de alta pressão foi escolhida considerando a necessidade de liberar um grande volume de ar em curto intervalo de tempo durante o processo de talonamento. Para isso, foi adotado o modelo 2W160-15, que possui orifício interno de 15 mm, rosca padrão de 1/2" NPT e alimentação com 12 VDC, permitindo sua integração ao sistema pneumático e eletrônico. Embora esse modelo apresente dimensões superiores às de válvulas menores utilizadas em aplicações pneumáticas, sua escolha foi priorizada nesta etapa do protótipo em função da maior passagem interna e da necessidade de vazão elevada para o talonamento. A válvula de alta pressão utilizada no sistema é mostrada na Figura 26.

Além da válvula de alta pressão, foi utilizada uma segunda válvula solenoide para alívio da pressão. Para essa função, foi adotado o modelo 2W-025-08D, normalmente fechado, com alimentação em 12 VDC, orifício interno de 2,5 mm e conexão de 1/4". Como essa válvula não tem a função de liberar grande volume de ar para o talonamento, mas sim auxiliar no alívio e no ajuste da pressão no trecho de saída, suas dimensões são menores em relação à válvula principal. Dessa forma, enquanto a válvula de alta pressão é responsável pela liberação súbita do ar comprimido, a válvula de alívio contribui para o controle da pressão após o processo. A Figura 27 apresenta o modelo de válvula solenoide utilizado para alívio da pressão.

As válvulas possuem dois fios para alimentação, sendo um conectado ao positivo (12 V) e o outro ao negativo (GND). O controle do acionamento é feito por meio de um sinal enviado pelo microcontrolador, utilizando um circuito intermediário, como relés, capaz de

comutar a corrente necessária para o funcionamento das válvulas.

Figura 26 - Válvula solenoide de alta pressão escolhida (modelo 2W160-15)



Fonte: Aliexpress (2025).

Figura 27 - Solenoide utilizada para alívio



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

No sistema desenvolvido, a válvula de alta pressão foi posicionada entre o reservatório de ar comprimido e o trecho de saída conectado ao pneu. Sua função é permitir que, no momento adequado, o ar pressurizado seja liberado de forma súbita e direta para o pneu. A válvula de

alívio foi posicionada no trecho de saída do sistema, possibilitando a liberação controlada de ar quando houver necessidade de reduzir ou ajustar a pressão do pneu.

3.4 MICROCONTROLADOR

O microcontrolador atua como unidade central do sistema, realizando a leitura dos sensores, interpretando os comandos do usuário e acionando os componentes conforme a lógica programada. Para este projeto, foi adotado o Arduino Nano, um microcontrolador de pequeno porte baseado no chip ATmega328P com tensão de operação: 5 V e entrada de alimentação: 7–12 V. A Figura 18 – A (anterior), ilustra o microcontrolador.

O Arduino Nano será responsável por gerenciar toda a lógica de operação do sistema, realizando a leitura dos sensores de pressão instalados no protótipo, interpretando os comandos inseridos por meio do encoder rotativo e acionando as cargas do sistema por meio de relés. Além disso, ele também enviará os valores de pressão lidos e as informações de operação para um display LCD com comunicação I2C, permitindo ao usuário o monitoramento em tempo real. A Figura 20 (anterior), demonstra o display escolhido.

A quantidade de portas disponíveis no microcontrolador é adequada para todas essas funções, com possibilidade de expansão futura, caso seja necessário integrar novos elementos ao sistema, como módulos de comunicação ou interfaces adicionais. No protótipo desenvolvido, as entradas analógicas são utilizadas para a leitura dos sensores de pressão e do monitoramento da bateria, enquanto as saídas digitais são destinadas ao acionamento dos relés, buzzer, ventoinha e demais componentes de controle.

Além dos sensores de pressão, o microcontrolador também recebe o sinal de um sensor fotoelétrico utilizado como recurso auxiliar de segurança. O modelo empregado é do tipo E18-D80NK, com alimentação em 5 VDC, saída NPN normalmente aberta e distância de detecção ajustável entre 3 e 80 cm. No protótipo, esse sensor é utilizado para identificar uma condição inadequada de posicionamento do equipamento, permitindo que a lógica de controle interrompa os acionamentos quando necessário.

3.5 INTERFACE COM O USUÁRIO

O sistema foi projetado para oferecer uma interface objetiva, permitindo que o usuário acompanhe as informações do protótipo e realize a seleção dos parâmetros necessários para o

processo de talonamento e calibração. Para isso, a interface é composta por um encoder rotativo, um display LCD e um buzzer de sinalização.

O encoder rotativo é utilizado como principal dispositivo de entrada do sistema. Por meio dele, o usuário pode navegar entre as opções apresentadas no display, ajustar valores e confirmar seleções utilizando o botão integrado ao próprio componente. Dessa forma, as funções de navegação, incremento, decremento e confirmação ficam concentradas em um único elemento de comando, reduzindo a quantidade de botões físicos no painel.

O display LCD tem como função apresentar as informações necessárias para a operação do sistema, como pressão medida, tensão da bateria, parâmetros selecionados e mensagens de estado durante o funcionamento. Essas informações permitem que o usuário acompanhe as etapas do processo e verifique as condições principais do protótipo em tempo real.

O buzzer é utilizado como elemento auxiliar de sinalização sonora, indicando eventos importantes durante a operação, como confirmação de comandos, início de acionamento, finalização do processo ou ocorrência de condição de alerta. Esse recurso contribui para a comunicação entre o sistema e o usuário, principalmente durante os ensaios em que a atenção também está voltada ao conjunto pneu-roda.

A operação do sistema inicia com a apresentação das informações básicas no display. Em seguida, o usuário realiza a seleção dos parâmetros de operação por meio do encoder, como a largura do pneu e a pressão final desejada. Após a confirmação dos dados, o sistema passa a executar automaticamente as etapas necessárias, realizando a leitura dos sensores de pressão e o acionamento dos componentes conforme a lógica programada no microcontrolador.

Para complementar a descrição da interface, a Figura 28 apresenta a sequência de telas utilizadas durante a operação do sistema. A interface inicia com a apresentação da tensão da bateria e da opção de início. Em seguida, o usuário seleciona a largura do pneu, baseada na classificação comercial, ajusta a pressão final desejada e confirma o início do processo. Durante a operação, o display também apresenta mensagens relacionadas ao estado do sistema, como conclusão do processo ou ocorrência de falha.

Durante o funcionamento, o Arduino Nano interpreta os sinais enviados pelos sensores de pressão e pelo encoder rotativo, processa as informações e comanda os atuadores por meio dos relés. A interface permite que o usuário acompanhe o processo pelo display LCD, enquanto o sistema gerencia o acionamento do compressor, da válvula solenoide de alta pressão e da válvula solenoide de alívio de acordo com as condições medidas.

Figura 28 - Sequência de telas da interface do sistema



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Figura 29 apresenta o diagrama em blocos do funcionamento do sistema, dividido em três partes principais: diagrama geral, diagrama de telas e diagrama de processo. Essa divisão foi adotada para facilitar a compreensão da lógica de funcionamento do protótipo, separando a visão geral do sistema, a interação do usuário com a interface e a tomada de decisão executada durante o processo automático.

O diagrama geral representa a sequência principal de operação do sistema. O bloco (Início) corresponde à energização do protótipo e à inicialização do microcontrolador, do display e dos demais elementos de interface. Em seguida, o bloco (Seleção de parâmetros) indica a etapa em que o usuário define as informações necessárias para a operação, como a largura do pneu e a pressão final desejada. Após essa seleção, o sistema passa pelo bloco (Segurança), no qual são verificadas as condições necessárias para permitir o funcionamento, como leitura dos sensores, ausência de falhas e limites de pressão. Caso as condições estejam adequadas, o fluxo segue para o bloco (Processo automático), em que o sistema executa as ações de talonamento, calibração ou alívio conforme os valores medidos.

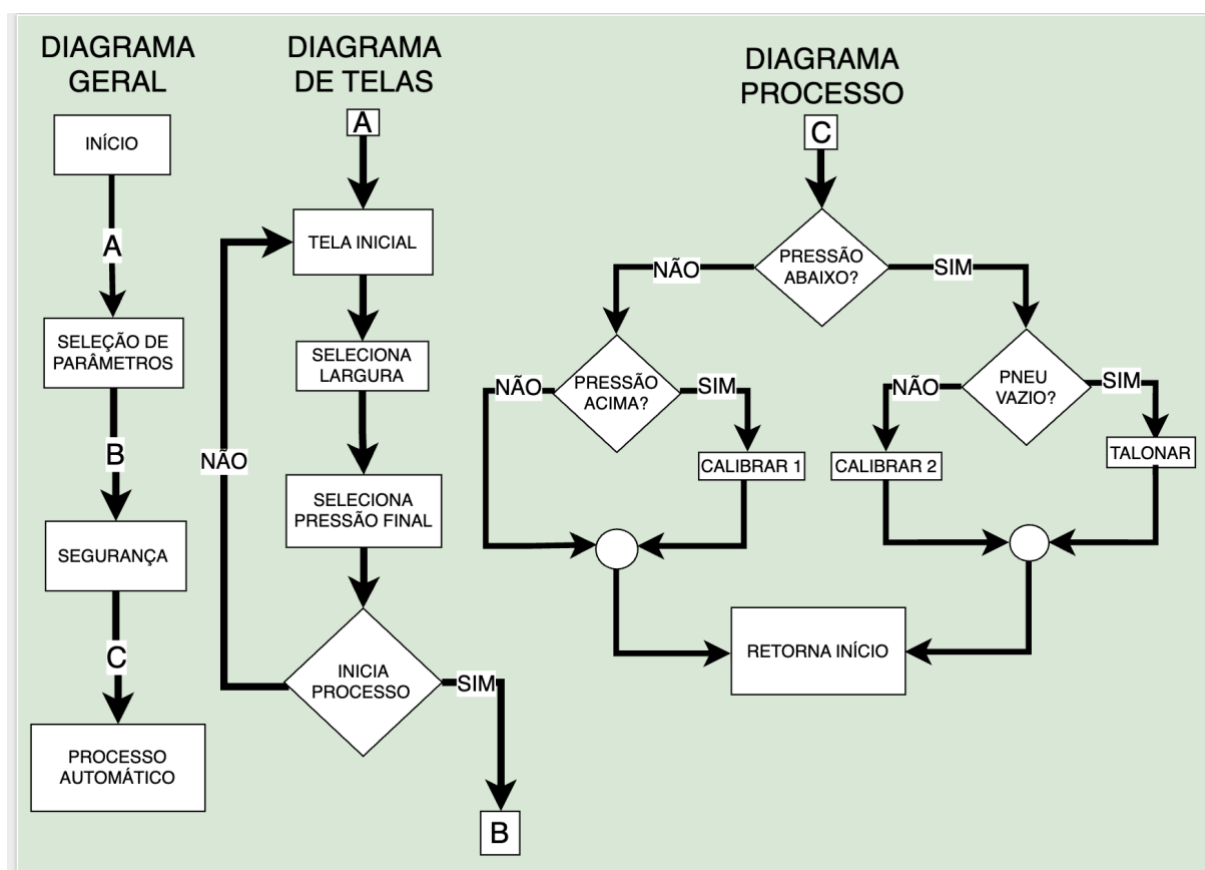
O diagrama de telas detalha a interação do usuário com a interface homem-máquina. A partir da (Tela inicial), o usuário navega pelo display utilizando o encoder rotativo. No bloco (Seleciona largura), é escolhida a largura ou classificação do pneu, parâmetro utilizado como referência para o processo. Em seguida, no bloco (Seleciona pressão final), o usuário define a pressão desejada ao final da calibração. Após essas etapas, o bloco (Inicia processo) representa a confirmação do usuário para que o sistema avance para a execução automática. Caso o usuário

não confirme o início, o sistema retorna à tela inicial. Caso confirme, o fluxo segue para a etapa de segurança e, posteriormente, para o processo automático.

O diagrama de processo representa a lógica de decisão executada após o início do processo. Inicialmente, o sistema avalia se a pressão medida está abaixo da pressão final selecionada. Caso esteja abaixo, o sistema verifica se o pneu está vazio. Quando o pneu está vazio ou com pressão próxima de zero, o bloco (Talonar) é executado, realizando a liberação de ar comprimido do reservatório por meio da válvula solenoide de alta pressão. Caso o pneu não esteja vazio, o sistema realiza o complemento de pressão, representado pelo bloco (Calibrar 2), até aproximar a pressão do valor desejado.

Se a pressão não estiver abaixo da pressão final, o sistema verifica se ela está acima do valor definido. Caso esteja acima, o bloco (Calibrar 1) representa a etapa de alívio, na qual a válvula solenoide de baixa pressão é acionada para reduzir a pressão do pneu de forma controlada. Caso a pressão não esteja abaixo nem acima do valor final, entende-se que a pressão está dentro da faixa desejada, e o sistema segue para o bloco (Retorna início), encerrando a operação e voltando à tela inicial.

Figura 29 - Diagrama em blocos do funcionamento do sistema



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os conectores (A), (B) e (C) foram utilizados para indicar a continuidade entre as partes do diagrama. O conector (A) relaciona a inicialização do sistema com a tela inicial da interface. O conector (B) representa a passagem da confirmação dos parâmetros para a etapa de segurança do sistema. Já o conector (C) indica a entrada no processo automático após a validação das condições de operação.

3.6 ALIMENTAÇÃO ELÉTRICA E ACIONAMENTO DAS CARGAS

A alimentação elétrica do protótipo foi organizada considerando dois níveis principais de tensão: 12 VDC para as cargas de maior potência e 5 VDC para o circuito de controle. A linha de 12 V é responsável por alimentar o compressor, as válvulas solenoides, a ventoinha e os módulos de relé. Já a linha de 5 V é utilizada para alimentar o Arduino Nano, os sensores de pressão, o display LCD com comunicação I2C, o encoder rotativo, o buzzer e os demais componentes de controle.

Para a alimentação principal do sistema, foi utilizada uma bateria Pioneiro MBR 4-BS de 12 V. Esse modelo possui capacidade nominal de 3,7 Ah e corrente de partida de 37 A, conforme especificações do fabricante. A Figura 30 apresenta as principais características da bateria utilizada no protótipo.

Figura 30 - Características da bateria Pioneiro MBR 4-BS

Características

C10 (Ah)	3,7 Ah
CCA -10°C Corrente (A)	37 A
Tempo até 6V (Seg)	40 s
Peso (kg) (+/- 5%)	1,39 kg
Dimensão	114x71x86 mm

Fonte: Pioneiro Baterias (2026).

correntes das válvulas solenoides e compatível com a corrente nominal estimada do compressor. No caso do compressor, por se tratar de um motor de corrente contínua, deve-se considerar que a corrente de partida pode ser superior à corrente nominal. Por esse motivo, o uso de relés contribui para manter o circuito de potência separado do circuito lógico do microcontrolador. A Figura 32 apresenta o módulo de relés utilizado para acionamento das cargas.

Figura 32 - Módulo de relés utilizado



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.7 ELEMENTOS AUXILIARES

3.7.1 Cilindro de ar comprimido

Para armazenar o ar comprimido necessário ao processo de talonamento, é indispensável a utilização de um reservatório que suporte a pressão exigida e mantenha a integridade do sistema. No protótipo inicial, foi utilizada uma garrafa PET de aproximadamente 3 litros. Essa configuração demonstrou ser funcional em testes práticos, permitindo o talonamento de apenas um pneu por vez, sendo necessário recarregar completamente o sistema após cada despressurização, o que comprometia a eficiência em aplicações sequenciais.

Considerando a necessidade de maior robustez, autonomia e segurança do sistema, a garrafa PET usada nos testes iniciais foi substituída por um cilindro metálico reaproveitado de um extintor de incêndio com carga nominal de 4 kg. Esse tipo de cilindro é feito em aço e já é projetado para suportar até 27 bar, seguindo os padrões da norma ABNT NBR 15808:2017, que especifica os requisitos de segurança, confiabilidade e desempenho dos extintores de incêndio

portáteis (ABNT, 2017). Isso contribui para que o reservatório escolhido seja adequado para armazenar ar comprimido no sistema.

Esse modelo de extintor apresenta volume interno de 4,3 litros conforme mostrado na tabela da Figura 33. Essas dimensões permitem uma reserva de ar suficiente para realizar mais de um talonamento em sequência, dependendo da pressão de operação e do tipo/tamanho de pneu.

De acordo com as especificações técnicas fornecidas pelo fabricante, o cilindro é projetado para operar com pressão interna de até 27 bar, o que oferece uma ampla margem de segurança frente às condições de operação deste projeto (que trabalha com pressões entre 100 e 150 PSI, ou cerca de 7–10 bar). A Figura 34 mostra um exemplo de extintor de carga 4 kg.

Figura 33 - Tabela de especificações do cilindro (extintor de incêndio 4 kg)

CLASSE DE FOGO	21 A 183 B C
AGENTE EXTINTOR	Pó Químico EPB 0351
PROPULSOR	Ar desumidificado ou N ₂ , 15 bar a 20 °C
TEMPERATURA DE FUNCIONAMENTO	-20 °C a +60 °C
CARGA NOMINAL REAL	4 kg
PESO TOTAL	~6,5 kg
DIMENSÕES	Altura 470 mm / Diâmetro 130 mm
TEMPO DE DESCARGA	15,5 segundos
TORQUE MÁX. DE APERTO DA VÁLVULA	Entre 40 e 50 Nm
PRESSÃO DE TESTE DO RECIPIENTE	PT 27 bar
VOLUME DO RECIPIENTE	4,3 L
VÁLVULA DE SEGURANÇA	Operação entre 20 e 26 bar
MATERIAL DO RECIPIENTE	Liga de aço / Jateamento e pintura epóxi-poliéster RAL 3000

Fonte: Adaptado de Emme Antincendio S.R.L. (2017)

Figura 34 - Extintor reutilizado como cilindro de ar comprimido



Fonte: Emme Antincendio S.R.L. (2017)

3.7.2 Compressor de ar

Para pressurizar o reservatório e garantir a quantidade de ar necessária ao talonamento do pneu, foi escolhido um compressor de ar 12 V, compatível com o restante do sistema elétrico do projeto. O modelo selecionado (CAV12, da Vonder) possui manômetro integrado, permitindo o acompanhamento da pressão durante os testes e eventuais ajustes. A Figura 35 apresenta o modelo do compressor utilizado.

Figura 35 - Compressor de ar CAV12 utilizado no sistema



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Este compressor apresenta uma capacidade de produção de ar de 18 L/min e uma pressão máxima de trabalho de 150 PSI, atendendo adequadamente à faixa de pressão esperada para o sistema de talonamento. Além disso, seu tempo máximo de operação contínua é de 10 minutos, com recomendação de pausa de 8 a 10 minutos para evitar superaquecimento.

Com base nessas informações é possível estimar a quantidade de ar ambiente necessária para pressurizar o reservatório de 4,3 litros até 150 PSI utilizando a Lei de Boyle como aproximação teórica. Essa relação considera uma transformação isotérmica, ou seja, com temperatura constante, na qual a pressão e o volume de um gás são inversamente proporcionais: “Numa transformação isotérmica (temperatura constante) sofrida por certa massa de gás, a pressão e o volume são inversamente proporcionais” (Calçada; Sampaio, 2012, p. 123). No entanto, como o processo real de compressão pode envolver variação de temperatura, perdas no sistema e rendimento do compressor, o cálculo deve ser interpretado como uma estimativa

inicial. Segundo esta lei, em uma transformação à temperatura constante, a pressão e o volume de um gás são inversamente proporcionais, conforme descrito na equação:

$$P1 \times V1 = P2 \times V2 \quad (2)$$

Onde:

- P1: pressão ambiente (14,7 PSI ao nível do mar),
- V1: volume de ar ambiente necessário,
- P2: pressão final absoluta (150 PSI + 14,7 PSI = 164,7 PSI),
- V2: volume do reservatório (4,3 litros).

Substituindo os valores na equação:

$$\begin{aligned} V1 &= \frac{(P2 \times V2)}{P1} = \frac{(164,7 \times 4,3)}{14,7} \\ &= 48,18 \text{ litros} \end{aligned}$$

Portanto, para encher completamente o reservatório até 150 PSI, o compressor precisa comprimir aproximadamente 48,2 litros de ar ambiente, o que leva cerca de 2 minutos e 40 segundos, considerando sua vazão de 18 L/min. Esse tempo permanece dentro do limite de operação contínua do compressor, garantindo segurança térmica durante o processo.

Considerando que o compressor é o componente que mais consome energia elétrica em todo o sistema, é possível estimar seu consumo energético durante um ciclo completo de pressurização.

Conforme explicado por Gaspar (2009, p. 93), a energia elétrica consumida por um aparelho pode ser determinada pela expressão:

$$E = P \times \Delta t \quad (3)$$

Onde:

- E: energia consumida em Wh;
- P: potência do compressor (90 W);
- Δt : tempo de funcionamento em horas (2 minutos e 40 segundos $\approx 0,0445$ h).

Substituindo os valores:

$$E = 90 \times 0,0445 = 4,005 \text{ Wh}$$

Esse valor corresponde apenas ao consumo do compressor em um ciclo de enchimento até 150 PSI, sem considerar perdas elétricas, variações de carga, estado de carga da bateria ou acionamento simultâneo de outros componentes.

A conexão do compressor com o sistema foi definida por meio de duas interfaces principais. A primeira é uma conexão pneumática fixa, realizada por mangueira e conexões compatíveis com a linha de ar do protótipo. Essa conexão permite que o compressor envie ar comprimido diretamente para o interior do reservatório sempre que for necessário realizar o processo de pressurização. A segunda é uma conexão elétrica, responsável por alimentar o compressor com tensão de 12 V. Essa entrada elétrica é acionada conforme a lógica de controle do sistema, permitindo que o compressor seja energizado quando houver necessidade de reposição de pressão no reservatório.

Essas conexões permitem integrar o compressor ao conjunto pneumático e elétrico do protótipo, mantendo sua função de carregar o reservatório de ar comprimido antes da liberação controlada para o processo de talonamento. A montagem final dessas ligações é apresentada no capítulo seguinte, durante a descrição dos testes e da integração do sistema.

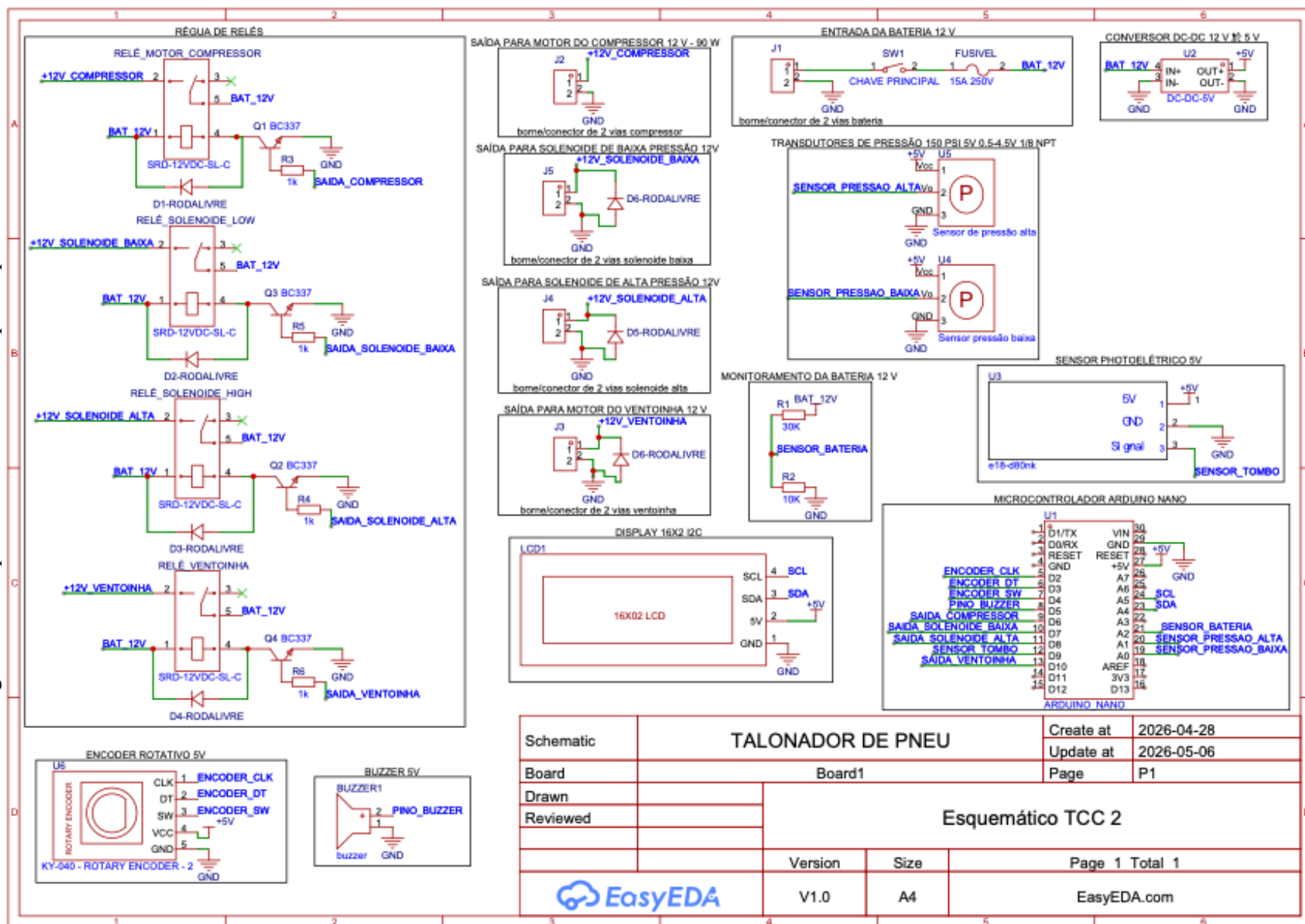
3.8 ESQUEMÁTICO ELETRÔNICO DO PROTÓTIPO

Após a definição dos componentes principais, foi elaborado o esquemático eletrônico do protótipo, com o objetivo de organizar as conexões entre o microcontrolador, sensores, atuadores, interface de usuário e sistema de alimentação. A Figura 36 apresenta o esquemático geral desenvolvido para o sistema.

No esquemático, o Arduino Nano atua como unidade central de controle, recebendo os sinais dos sensores de pressão, do sensor fotoelétrico e do encoder rotativo. As informações são apresentadas ao usuário por meio do display LCD com comunicação I2C e pelo buzzer de sinalização.

O circuito também inclui o monitoramento da bateria por divisor resistivo, o conversor DC-DC responsável pela alimentação em 5 V, a chave principal e o fusível de proteção. O acionamento das cargas de 12 V, como compressor, válvulas solenoides e ventoinha, é realizado por meio de relés comandados pelo microcontrolador. Dessa forma, o esquemático permite visualizar a separação entre o circuito de controle em 5 V e o circuito de potência em 12 V.

Figura 36 - Esquemático eletrônico do protótipo

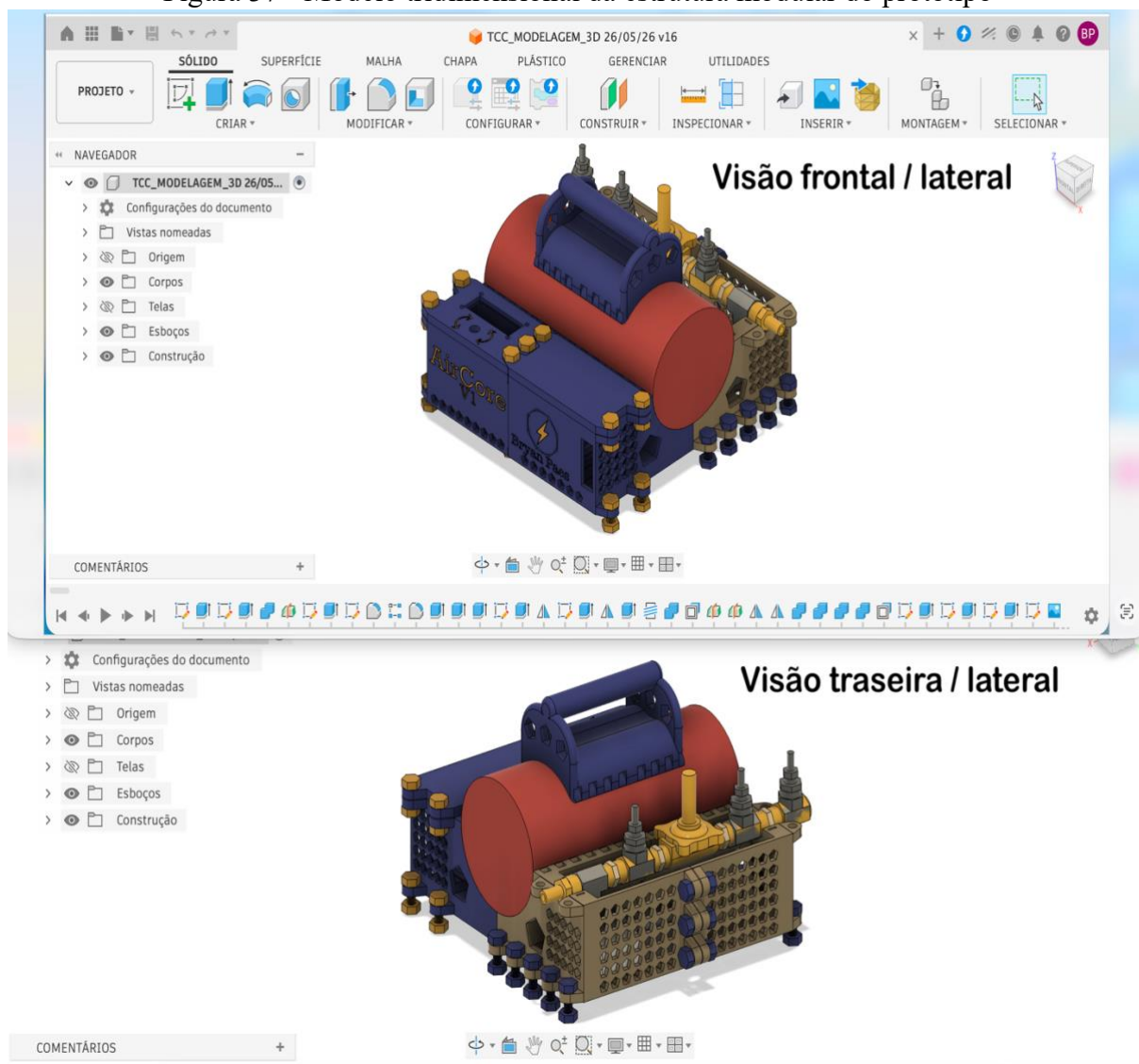


3.9 MODELAGEM CAD E ESTRUTURA MODULAR DO PROTÓTIPO

Após a definição dos principais componentes pneumáticos, eletrônicos e de controle, foi desenvolvida a modelagem tridimensional da estrutura física do protótipo. Essa etapa teve como objetivo organizar os componentes no conjunto, prever os pontos de fixação e possibilitar a fabricação das peças por meio de impressão 3D.

Figura 37 apresenta o modelo tridimensional do protótipo, com vistas frontal e traseira, evidenciando a disposição geral do reservatório, da linha pneumática e dos módulos estruturais.

Figura 37 - Modelo tridimensional da estrutura modular do protótipo



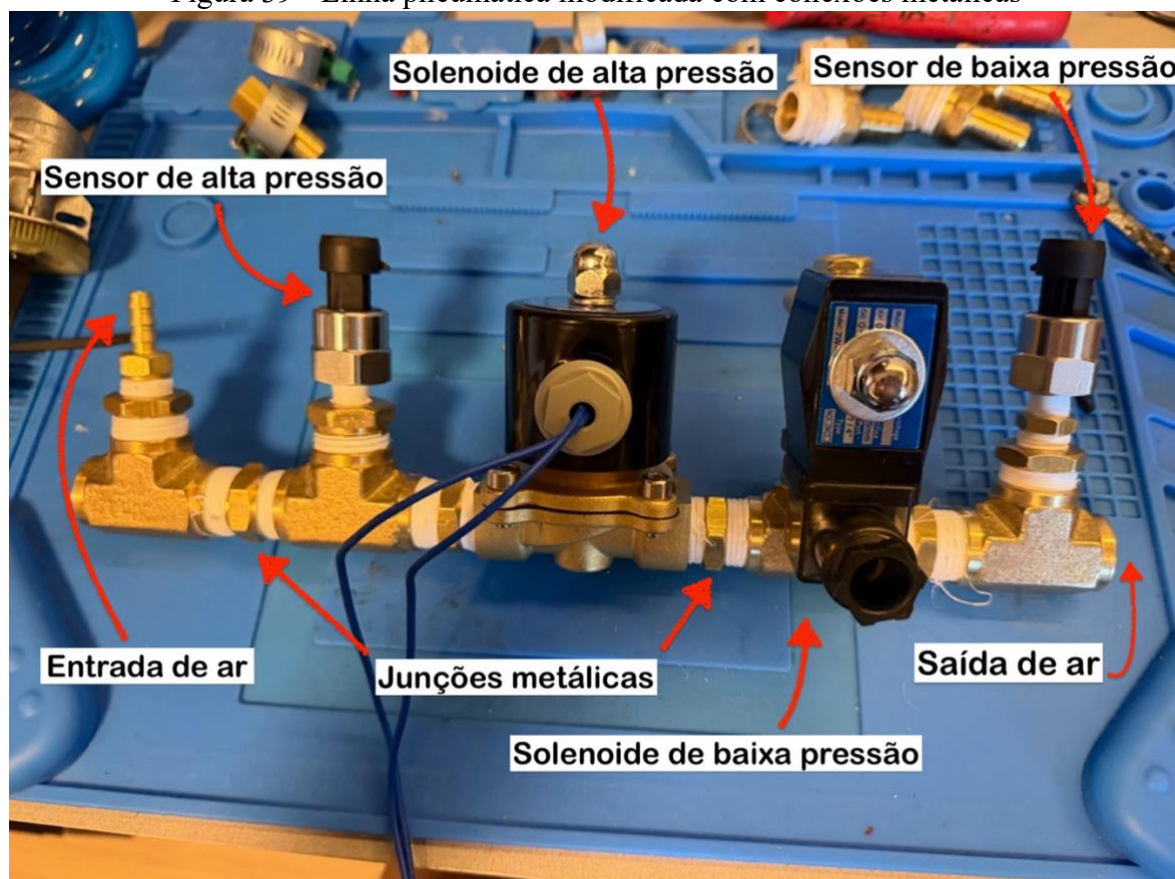
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A estrutura foi projetada no software Autodesk Fusion de forma modular, separando o protótipo em regiões específicas para acomodar os diferentes subconjuntos do sistema. O módulo central foi destinado ao conjunto de controle, concentrando os principais elementos de interface e processamento, como o Arduino Nano, o display LCD e o encoder rotativo. Na região traseira, foi previsto um módulo para acomodar a linha pneumática, os sensores de pressão, as válvulas solenoides, os relés de acionamento e o compressor, mantendo os componentes responsáveis pelo controle do fluxo de ar próximos entre si. Além disso, foi desenvolvido um módulo específico para a bateria e para as chaves de acionamento, permitindo organizar a alimentação elétrica do protótipo e facilitar o acesso aos comandos principais. Essa divisão em módulos contribuiu para a organização interna do sistema, separando as partes de controle, alimentação e pneumática, além de facilitar a montagem, a manutenção e a fabricação das peças por impressão 3D. A modelagem em CAD permitiu verificar previamente o posicionamento dos componentes, reduzir interferências mecânicas e definir uma estrutura compatível com a fabricação em impressora 3D.

Os primeiros testes de pressurização foram realizados com uma bomba manual de suspensão de bicicleta, escolhida por permitir atingir pressões elevadas de forma controlada. Nessa etapa, o sistema foi pressurizado até aproximadamente 80 PSI, possibilitando observar o comportamento das conexões, mangueiras e pontos de vedação antes da integração com a eletrônica de controle. Durante esses ensaios, foram identificadas perdas de ar em alguns pontos da linha pneumática, principalmente nas regiões em que as mangueiras eram fixadas por abraçadeiras metálicas. Mesmo com a aplicação de fita veda-rosca nas conexões rosçadas e com o reaperto das abraçadeiras, a vedação dos trechos flexíveis não se mostrou satisfatória para a pressão aplicada.

A partir desses resultados, a montagem foi modificada, mantendo-se a mangueira apenas no trecho entre a saída do reservatório e o primeiro ponto de derivação. A partir desse ponto, a linha passou a ser composta por conexões metálicas rosçadas, reduzindo a quantidade de uniões flexíveis e melhorando a retenção de pressão. Nessa nova configuração, também foram instalados os dois sensores de pressão e as duas válvulas solenoides utilizadas no sistema. A Figura 39 mostra parte da linha pneumática após a substituição das conexões.

Figura 39 - Linha pneumática modificada com conexões metálicas



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Após a alteração, novos testes de pressurização foram realizados e a configuração apresentou melhor desempenho, sem vazamentos significativos nos pontos avaliados. Com isso, a linha pneumática passou a apresentar condições adequadas para os testes seguintes, envolvendo o acionamento do compressor, das válvulas solenoides e a integração com a eletrônica de controle.

4.2 VERIFICAÇÃO DOS COMPONENTES DO SISTEMA

Os componentes eletrônicos foram avaliados de forma individual e posteriormente em conjunto, conforme a evolução da montagem em bancada. Alguns elementos, como válvulas solenoides, sensores de pressão, compressor e alimentação elétrica, foram verificados separadamente por estarem diretamente relacionados ao funcionamento do sistema. Já outros componentes, como display LCD, encoder e buzzer, foram observados durante a operação integrada, pois sua função está associada à interação com o usuário e à execução do código no microcontrolador.

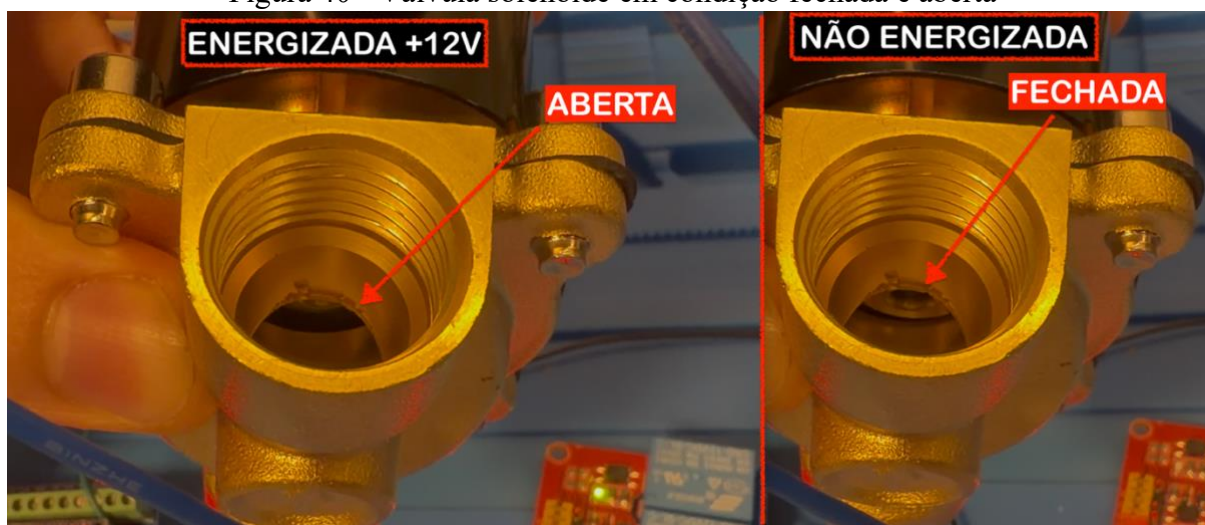
Essa etapa teve como objetivo confirmar se os principais componentes respondiam corretamente antes da montagem completa do protótipo. Dessa forma, foi possível verificar o acionamento das válvulas, o comportamento dos sensores de pressão, a estabilidade da alimentação elétrica e o funcionamento da régua de relés, reduzindo a possibilidade de falhas durante os ensaios integrados.

4.2.1 Ensaio Válvulas solenoides

As válvulas solenoides utilizadas no sistema foram verificadas inicialmente de forma individual, antes da integração completa com o circuito de controle. Como esses componentes atuam de forma liga/desliga, ou seja, com comportamento do tipo on/off, sua operação depende da aplicação de tensão elétrica na bobina. No modelo normalmente fechado, a passagem de ar permanece bloqueada quando não há alimentação. Ao aplicar tensão de 12 V, ocorre o deslocamento interno do êmbolo, permitindo a abertura da passagem de ar.

O ensaio foi realizado aplicando-se tensão diretamente nas válvulas, observando a resposta de abertura e fechamento. No caso da válvula solenoide de alta pressão, foi possível visualizar a abertura do orifício interno quando energizada e o fechamento após a retirada da alimentação. A Figura 40 apresenta a comparação entre a condição fechada e aberta da válvula de alta vazão.

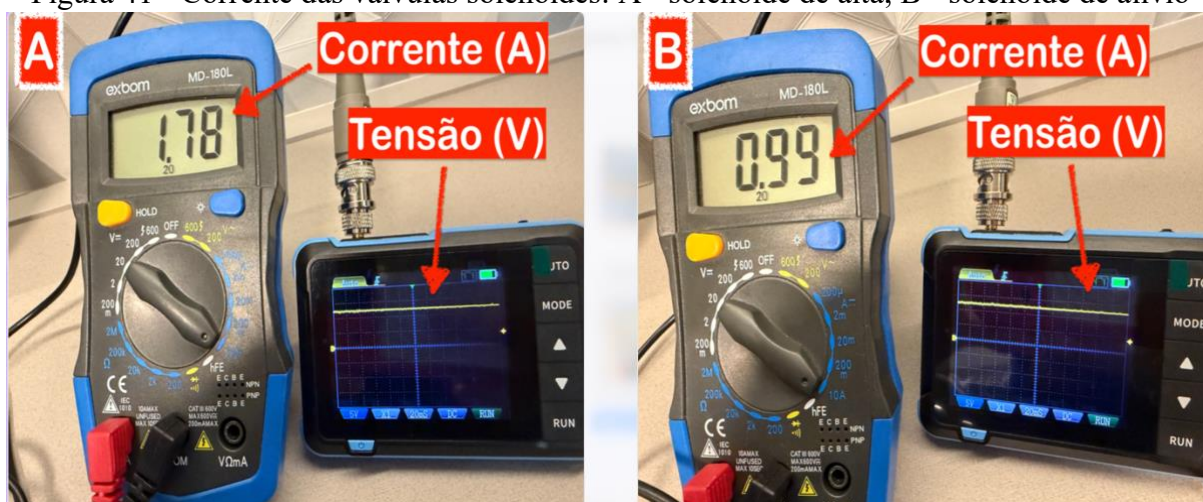
Figura 40 - Válvula solenoide em condição fechada e aberta



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Além da verificação do acionamento mecânico, foi medida a corrente consumida por cada válvula durante a operação. A solenoide de alta pressão apresentou corrente aproximada de 1,78 A com alimentação de 12,8 V, enquanto a solenoide de alívio apresentou corrente aproximada de 0,99 A na mesma tensão de alimentação. Em seguida, a Figura 41 e Tabela 1 apresentam as medições realizadas nas duas válvulas.

Figura 41 - Corrente das válvulas solenoides: A - solenoide de alta; B - solenoide de alívio



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A partir desses valores, foi possível confirmar que a bateria escolhida possui capacidade para alimentar as válvulas solenoides durante acionamentos de curta duração, enquanto os relés utilizados apresentam capacidade de comutação suficiente para acionar essas cargas com segurança.

Tabela 1 - Corrente consumida pelas válvulas solenoides

Componente	Tensão de alimentação	Corrente medida	Potência aproximada
Solenóide de alta pressão	12,8 V	1,78 A	22,8 W
Solenóide de alívio	12,8 V	0,99 A	12,7 W

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.2.2 Ensaio dos sensores de pressão

Os sensores de pressão utilizados no sistema possuem faixa nominal de medição de 0 a 150 PSI, alimentação de 5 VDC e sinal analógico de saída especificado entre 0,5 V e 4,5 V. Como os dois transdutores instalados no protótipo possuem as mesmas características técnicas, foi avaliado o comportamento do modelo selecionado, relacionando-se a pressão aplicada ao sistema com a tensão de saída obtida.

Para a realização do ensaio, a linha pneumática foi pressurizada gradualmente e a tensão de saída do sensor foi medida com um multímetro. A pressão aplicada foi acompanhada por meio de um manômetro analógico, cuja escala apresenta divisões de 5 PSI. Dessa forma, os valores de pressão utilizados na avaliação devem ser considerados aproximados. A Figura 42 apresenta uma das medições realizadas, na qual foi obtida tensão de saída de aproximadamente 1,75 V para uma pressão indicada de 50 PSI.

Figura 42 - Medição da tensão de saída do sensor de pressão para 50 PSI



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

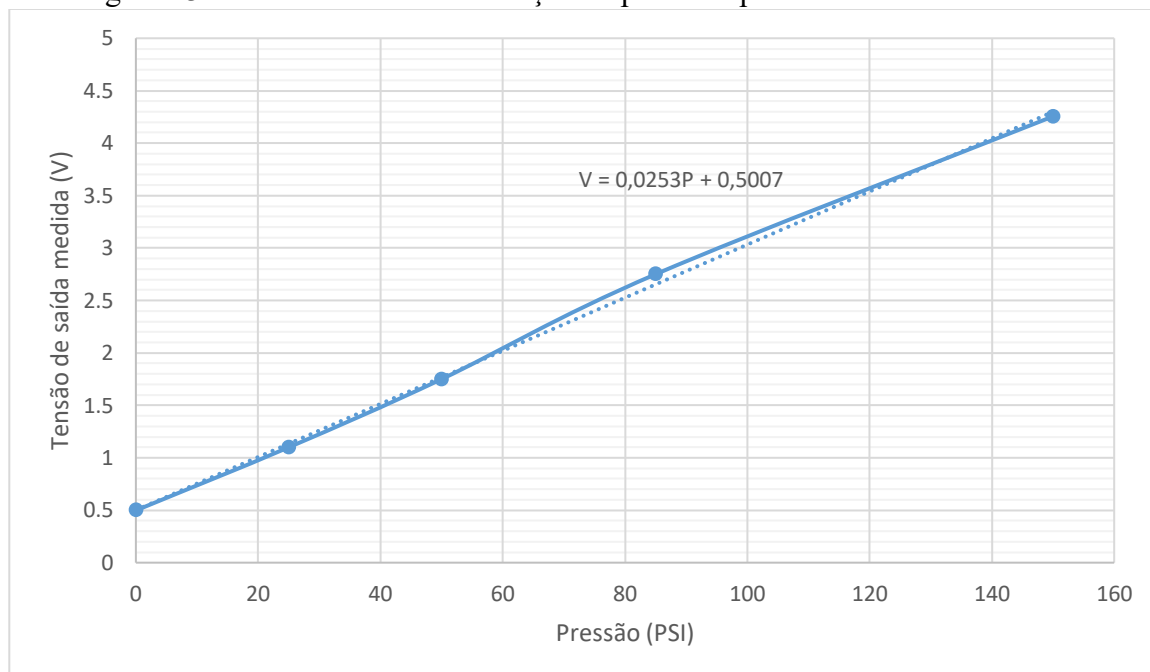
Durante as medições, observou-se que os valores obtidos apresentaram diferença em relação à resposta nominal informada para o sensor. Para a condição sem pressão aplicada, foi medida tensão de aproximadamente 0,498 V, valor próximo aos 0,5 V especificados. Entretanto, para a pressão máxima avaliada, indicada em aproximadamente 150 PSI, foi medida tensão de 4,255 V, inferior ao valor nominal de 4,5 V. Os valores registrados durante o ensaio são apresentados na Tabela 2 e Figura 43.

Tabela 2 - Relação entre pressão aplicada e tensão de saída do sensor

Pressão aproximada indicada no manômetro (PSI)	Tensão de saída medida (V)	Tensão nominal esperada (V)
0	0,498	0,500
25	1,10	1,167
50	1,75	1,833
85	2,75	2,767
150	4,255	4,500

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 43 - Tensão de saída em função da pressão aplicada no sensor escolhido



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Como a relação entre a tensão de saída e a pressão aplicada ao sensor tem um comportamento linear, foi obtida a expressão da curva de tendência e, a partir dela, foi determinada a seguinte equação:

$$P = a \times V + b \quad (4)$$

Onde:

- P corresponde à pressão medida, em PSI;
- V corresponde à tensão de saída do sensor, em volts;
- a corresponde ao coeficiente angular da reta;
- b corresponde ao coeficiente linear.

Dessa forma, a equação experimental adotada para converter a tensão de saída do sensor em pressão foi:

$$P = 39,5257 \times V - 19,7905 \quad (5)$$

A equação obtida foi utilizada como referência para a leitura dos sensores no sistema de controle, permitindo converter o sinal analógico de tensão em valores de pressão compatíveis com o comportamento observado durante os ensaios.

4.2.3 Verificação do compressor de ar

O compressor de ar foi verificado em bancada com o objetivo de confirmar seu funcionamento em alimentação de 12 V e sua capacidade de pressurizar o reservatório utilizado no sistema. Conforme especificação do fabricante, o modelo CAV12, possui pressão máxima de trabalho de 150 PSI.

Durante a verificação, o compressor foi conectado ao conjunto pneumático e utilizado para pressurizar o sistema. Observou-se que o equipamento foi capaz de atingir aproximadamente 140 PSI, valor correspondente próximo ao limite máximo informado pelo fabricante. A Figura 44 apresenta o manômetro indicando a pressão obtida durante o ensaio.

Também foi observada a corrente consumida pelo compressor durante a pressurização. Em uma condição próxima de 85 PSI, a corrente medida foi de aproximadamente 6,82 A, aumentando gradualmente com a elevação da pressão do sistema. Esse comportamento está relacionado ao maior esforço mecânico exigido do compressor à medida que a pressão no reservatório aumenta. Considerando a potência nominal de 90 W informada pelo fabricante, a corrente estimada para alimentação em 12 V é de aproximadamente 7,5 A, valor dentro do

limite, observado durante os ensaios. A Figura 45 apresenta a medição realizada durante esse ensaio.

Figura 44 - Pressurização do sistema com o compressor de ar até 140 PSI



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 45 - Medição da corrente consumida pelo compressor durante a pressurização



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

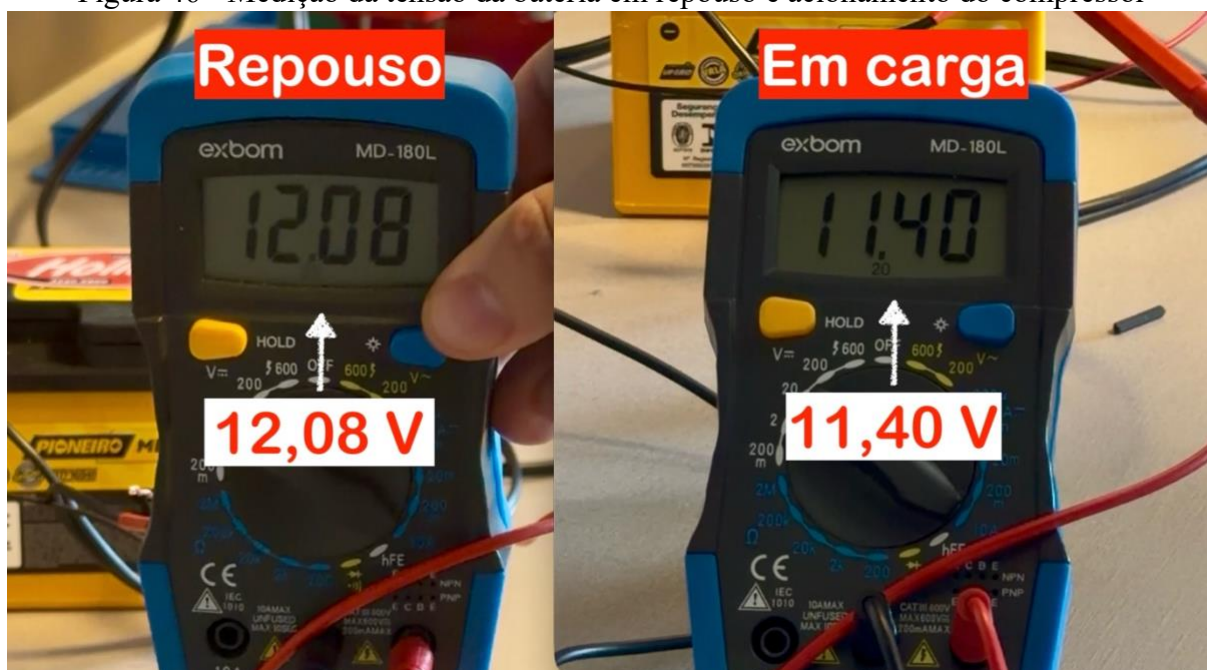
Durante os acionamentos, verificou-se aquecimento do compressor ao longo do tempo de operação. Por esse motivo, foi prevista a utilização de ventilação auxiliar no protótipo, com o objetivo de melhorar a dissipação térmica durante os ciclos de pressurização.

4.2.4 Alimentação elétrica e acionamento das cargas

A alimentação elétrica do protótipo foi verificada considerando duas linhas principais: a tensão primária e a tensão secundária. A tensão primária corresponde à alimentação de 12 V proveniente da bateria, responsável por energizar as cargas de maior potência, como o compressor, as válvulas solenoides e a ventoinha. Já a tensão secundária corresponde à saída de 5 V do conversor DC-DC, utilizada para alimentar o circuito de controle, composto pelo Arduino Nano, sensores de pressão, display LCD, encoder e demais componentes de baixa tensão.

Durante essa etapa, foram observadas as condições de tensão da bateria em repouso e durante o acionamento do compressor, por ser o componente de maior consumo elétrico do sistema. No momento do ensaio, a bateria apresentou tensão de aproximadamente 12,08 V em repouso. Durante o funcionamento do compressor, a tensão reduziu para cerca de 11,40 V, indicando a queda natural de tensão causada pela carga aplicada. A Figura 46 apresenta a comparação entre a tensão medida antes e durante o acionamento do compressor.

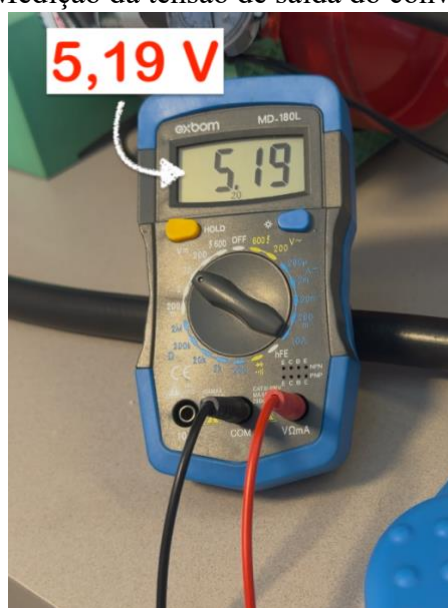
Figura 46 - Medição da tensão da bateria em repouso e acionamento do compressor



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Além da alimentação das cargas em 12 V, foi verificada a tensão fornecida ao circuito de controle por meio do conversor DC-DC. Durante as medições, mesmo com o acionamento de cargas como compressor e válvulas solenoides, a tensão secundária permaneceu próxima de 5 V, sem variação significativa. Esse comportamento é importante porque os sensores de pressão e o Arduino dependem de uma alimentação estável para manter leituras confiáveis e evitar instabilidades durante a operação. A Figura 47 apresenta a medição da tensão de saída do conversor DC-DC.

Figura 47 - Medição da tensão de saída do conversor DC-DC



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 3 - Verificação das tensões primária e secundária do sistema

Condição avaliada	Tensão primária – bateria 12 V	Tensão secundária – conversor DC-DC	Observação
Sistema em repouso	12,08 V	5,19 V	Sem acionamento do compressor
Compressor acionado	11,40 V	5,19 V	Queda de tensão na linha de 12 V, mantendo a alimentação do controle

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O acionamento das cargas de 12 V foi realizado por meio de relés, permitindo que o microcontrolador enviasse apenas o sinal de comando, enquanto a alimentação de potência

permanecia fornecida pela bateria. Com a alimentação e o acionamento das cargas verificados, a próxima etapa consistiu na avaliação do funcionamento integrado do protótipo em bancada.

4.3 MONTAGEM INTEGRADA EM BANCADA

Após a verificação individual dos principais componentes do sistema, foi realizada a montagem integrada em bancada. Essa etapa teve como objetivo reunir os subconjuntos eletrônicos e pneumáticos em uma mesma disposição de teste, assim, avaliando o funcionamento conjunto dos componentes antes da instalação definitiva na estrutura impressa em 3D.

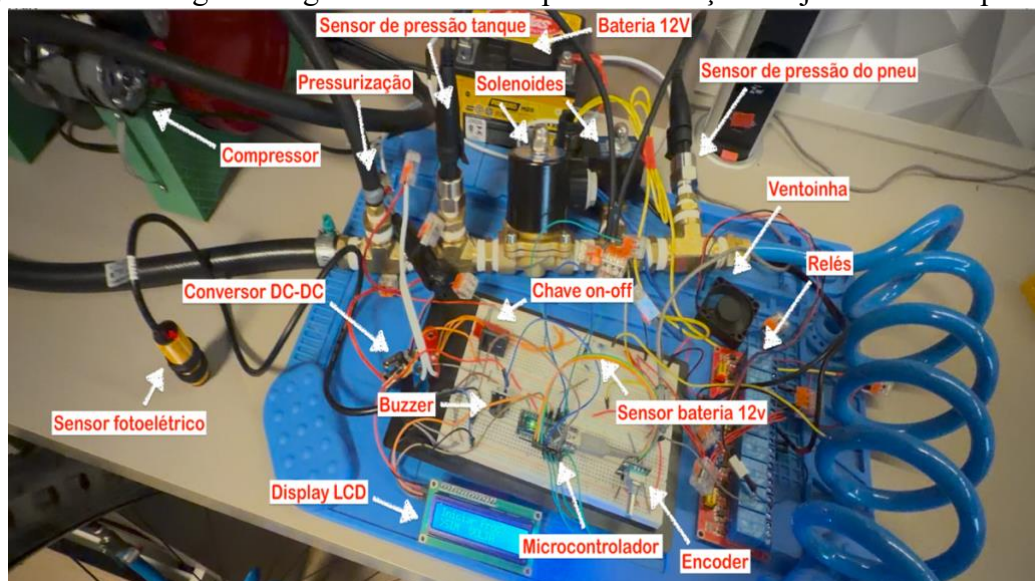
A montagem em bancada foi realizada com base no esquemático eletrônico desenvolvido para o protótipo, apresentado na Figura 36. Dessa forma, a disposição dos componentes seguiu a mesma lógica de ligação prevista para o sistema final, incluindo o Arduino Nano, display LCD, encoder rotativo, buzzer, conversor DC-DC, módulo de relés, sensores de pressão, válvulas solenoides, compressor e bateria de 12 V. Essa montagem permitiu reproduzir, em bancada, a integração elétrica e pneumática do protótipo, mantendo os componentes expostos para facilitar medições, ajustes e verificações durante os ensaios.

Nessa etapa, foram realizados testes de acionamento das cargas por meio dos relés, incluindo a comutação das válvulas solenoides e do compressor. Também foi verificado o funcionamento do display LCD, a alimentação do circuito de controle em 5 V pelo conversor DC-DC e a leitura dos sensores de pressão instalados nos trechos de alta e baixa pressão. A Figura 48 apresenta a montagem integrada em bancada utilizada para a verificação conjunta dos componentes.

Um dos testes realizados nessa etapa foi a verificação da leitura da tensão da bateria pelo sistema. Para isso, foi utilizado um divisor resistivo conectado à entrada analógica do Arduino Nano, permitindo reduzir a tensão da bateria para um valor compatível com a leitura do microcontrolador. A tensão real da bateria foi medida com multímetro e comparada com o valor interpretado pelo Arduino e apresentado no display LCD.

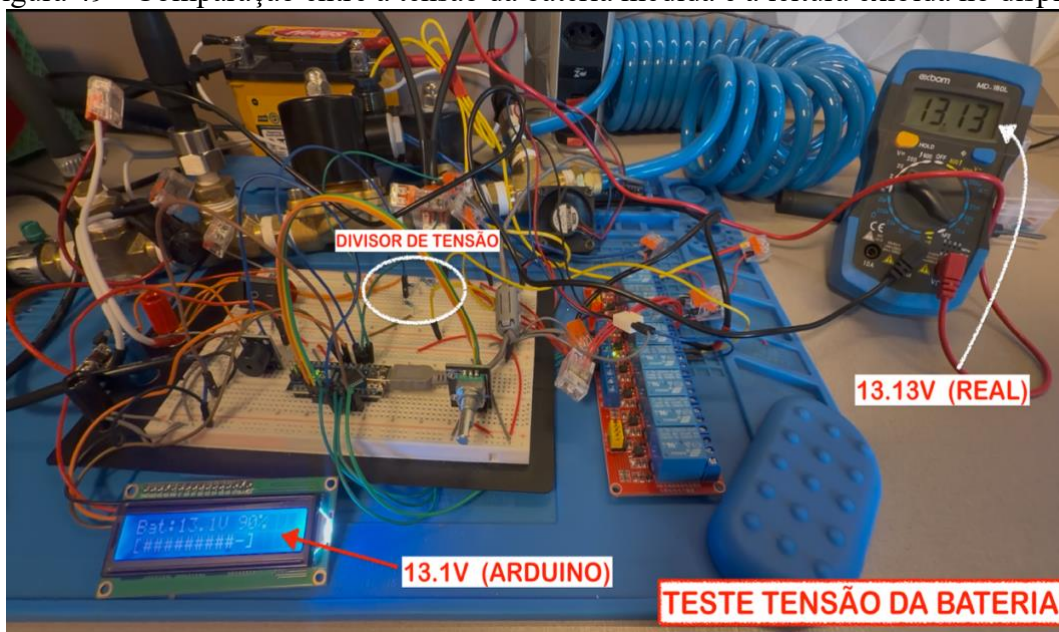
No ensaio realizado, o multímetro indicou aproximadamente 13,13 V na bateria, enquanto o display do sistema apresentou uma leitura de aproximadamente 13,1 V. A proximidade entre os valores demonstrou coerência entre a tensão real medida e a tensão calculada pelo sistema de controle. A Figura 49 apresenta o teste de leitura da tensão da bateria, com a comparação entre o valor medido pelo multímetro e o valor exibido no display.

Figura 48 - Montagem integrada em bancada para verificação conjunta dos componentes



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 49 - Comparação entre a tensão da bateria medida e a leitura exibida no display



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Além da verificação da tensão da bateria, também foram realizados testes de acionamento das válvulas solenoides por meio dos relés. Esses testes confirmam que os sinais enviados pelo Arduino eram capazes de comandar os relés e, conseqüentemente, energizar as válvulas de alta pressão e de alívio. Essa etapa foi importante para verificar a integração entre o circuito de controle e as cargas de 12 V, mantendo o microcontrolador responsável apenas pelo envio dos sinais de comando.

Com a linha pneumática conectada ao conjunto, foram testadas a pressurização e liberação de ar. O compressor foi acionado pelo sistema de relés, permitindo pressurizar o reservatório e a linha pneumática. Em seguida, as válvulas solenoides foram acionadas para verificar a passagem e o alívio do ar comprimido. Durante esses testes, os sensores de pressão foram utilizados para acompanhar a variação de pressão nos dois pontos de medição do sistema, sendo um deles destinado ao reservatório e o outro ao trecho de saída/pneu.

A montagem integrada em bancada permitiu verificar que os principais componentes do sistema poderiam operar de forma conjunta. Foram observados o funcionamento da alimentação elétrica, da interface com o usuário, da leitura da bateria, da leitura dos sensores de pressão, do acionamento das válvulas solenoides e do comando do compressor. Essa etapa também possibilitou identificar ajustes necessários na organização dos cabos, na passagem das mangueiras e na disposição dos componentes antes da montagem final na estrutura impressa em 3D.

Dessa forma, a montagem em bancada representou uma etapa intermediária entre os ensaios individuais dos componentes e a montagem final do protótipo. A partir dela, foi possível validar a integração elétrica e pneumática do sistema em condições controladas, reduzindo a possibilidade de falhas durante a instalação dos componentes na estrutura definitiva.

4.4 MONTAGEM FINAL DO PROTÓTIPO

Após a verificação dos componentes individuais e da montagem integrada em bancada, foi realizada a montagem final do protótipo na estrutura fabricada por impressão 3D. Essa etapa teve como objetivo transferir os subconjuntos testados anteriormente para a estrutura física definitiva, mantendo a organização modular definida na etapa de modelagem CAD mostrado na

Figura 37.

A estrutura final foi organizada em módulos, de forma a acomodar os principais subconjuntos do sistema. Na região frontal foi posicionado o módulo de controle, responsável por abrigar o Arduino Nano, o display LCD e o encoder rotativo. Esse módulo permite o acesso direto à interface de operação, possibilitando ao usuário visualizar as informações do sistema e realizar a seleção dos parâmetros de funcionamento.

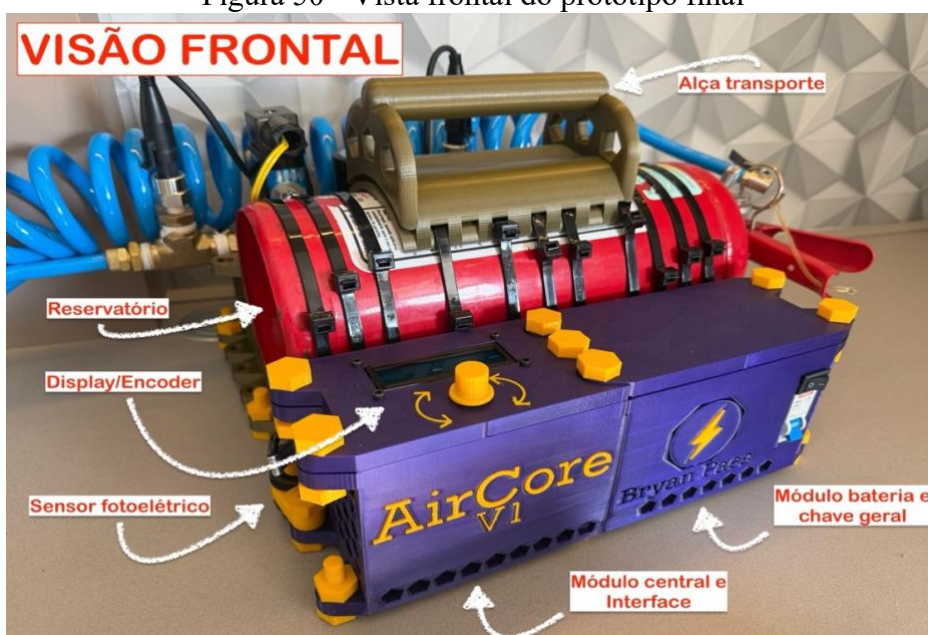
Ao lado do módulo de controle foi destinado um compartimento para a bateria e para as chaves de acionamento, concentrando os elementos relacionados à alimentação elétrica do

protótipo. Essa separação contribui para a organização dos cabos e para o acesso aos comandos principais do sistema.

Na região traseira foi montado o conjunto pneumático, composto pela linha de ar, sensores de pressão, válvulas solenoides, conexões, entrada de ar do compressor, saída do reservatório e saída para o pneu por meio da mangueira helicoidal. Também foram alojados nessa região o módulo de relés e demais conexões necessárias para o acionamento das cargas. A proximidade entre esses componentes contribui para reduzir o comprimento das ligações pneumáticas e facilitar a integração entre os sensores, atuadores e conexões de ar comprimido.

A Figura 50 apresenta a vista frontal do protótipo montado, evidenciando o módulo de controle, o compartimento da bateria, o reservatório de ar comprimido e a alça superior de transporte.

Figura 50 - Vista frontal do protótipo final

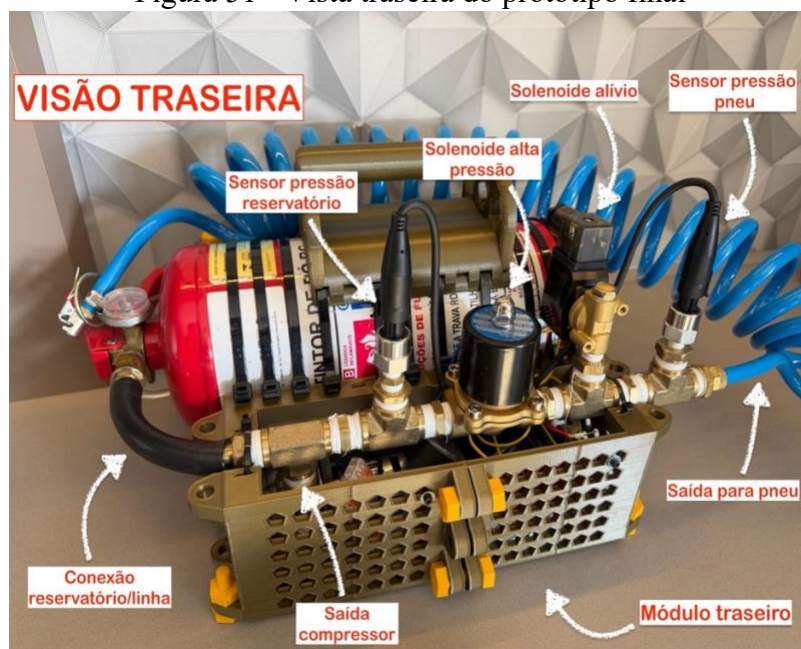


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Figura 51 apresenta a região traseira do protótipo, destacando a disposição da linha pneumática, das válvulas solenoides, dos sensores de pressão, das conexões de ar e da mangueira helicoidal utilizada para conexão ao pneu da bicicleta.

O reservatório de ar comprimido foi fixado à estrutura por meio de abraçadeiras plásticas, mantendo-o integrado ao conjunto e possibilitando sua remoção em caso de manutenção. A estrutura também recebeu pés de apoio, que contribuem para a estabilidade do protótipo durante sua utilização em bancada, no piso ou em superfícies com pequenas irregularidades. Além disso, a alça superior permite o transporte do conjunto, reforçando a proposta de um equipamento portátil.

Figura 51 - Vista traseira do protótipo final



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O sensor fotoelétrico utilizado como recurso auxiliar de segurança foi posicionado externamente à estrutura, permitindo sua atuação sem interferir diretamente na linha pneumática ou nos módulos internos. Essa disposição facilita o acesso ao componente e mantém sua função integrada à lógica de segurança do sistema.

Com a montagem final, foi possível verificar a disposição dos principais componentes na estrutura impressa em 3D. A divisão em módulos permitiu separar as regiões de controle, alimentação e pneumática, mantendo o Arduino Nano, o display LCD e o encoder rotativo na região frontal, a bateria e as chaves em um compartimento específico, e a linha pneumática na região traseira. Essa organização auxiliou na passagem dos cabos, na conexão das mangueiras e no acesso aos componentes durante os ajustes finais do protótipo. Dessa forma, a montagem final possibilitou integrar fisicamente os subconjuntos desenvolvidos e preparar o sistema para a etapa de validação prática.

4.5 VALIDAÇÃO DO SISTEMA

Foram realizados ensaios com conjuntos diferentes de pneus e rodas de MTB. Em todos os casos, os pneus estavam inicialmente destalonados, condição em que era possível observar a fita *tubeless* na região interna do aro. Na sequência são apresentados os resultados observados com dois conjuntos de pneus e rodas: o primeiro conjunto utilizava pneu de largura

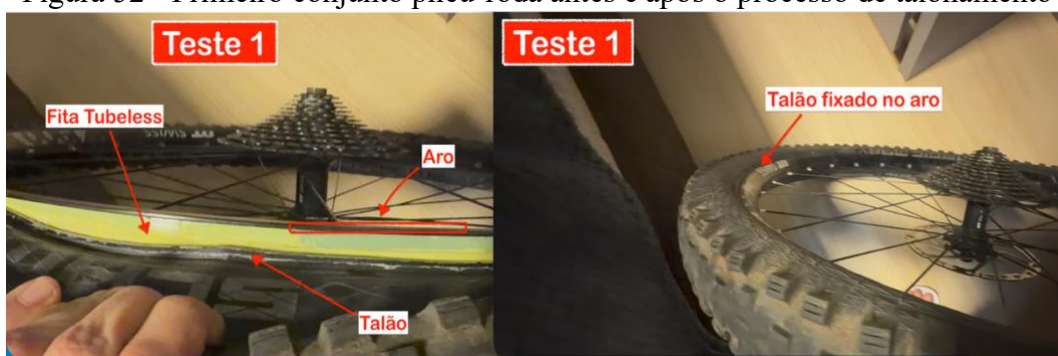
2.4, montado em aro mais largo, enquanto o segundo conjunto utilizava pneu de largura 2.2, montado em aro mais estreito.

Durante os testes, o reservatório foi pressurizado em aproximadamente 75 PSI. Esse valor ficou abaixo do limite máximo de operação definido para o protótipo, de 150 PSI, e também abaixo da pressão considerada nos testes preliminares realizados com o protótipo manual apresentado na Figura 23. Mesmo assim, a pressão armazenada e o volume de ar disponível foram suficientes para promover a expansão dos pneus e o encaixe do talão nas paredes internas dos aros.

A Figura 52 apresenta o primeiro conjunto pneu-roda utilizado na validação. Na condição inicial, o pneu encontrava-se destalonado, com a fita *tubeless* visível na parte interna do aro. Após o acionamento do sistema, foi possível observar o pneu com maior volume interno e o talão encaixado no aro, caracterizando o talonamento.

A Figura 53 apresenta o segundo conjunto pneu-roda utilizado no ensaio. Assim como no primeiro caso, o pneu encontrava-se inicialmente destalonado e, após a aplicação do ar comprimido pelo sistema, ocorreu o encaixe do talão no aro.

Figura 52 - Primeiro conjunto pneu-roda antes e após o processo de talonamento



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 53 - Segundo conjunto pneu-roda antes e após o processo de talonamento



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um sistema eletrônico automatizado para auxiliar no talonamento de pneus sem câmara em bicicletas. Para isso, foram identificados os requisitos necessários ao processo, selecionados os componentes principais e desenvolvido um protótipo funcional composto por reservatório de ar comprimido, compressor, sensores de pressão, válvulas solenoides, microcontrolador, interface de operação e sistema de alimentação elétrica.

A partir dos testes realizados, foi possível verificar o funcionamento dos principais componentes do sistema, tanto de forma individual quanto integrada. A montagem final do protótipo permitiu reunir os subconjuntos de controle, alimentação e pneumática em uma estrutura portátil, possibilitando a realização dos ensaios práticos com conjuntos reais de rodas e pneus.

Na validação prática, o sistema realizou o talonamento de diferentes conjuntos de pneus e rodas de MTB, utilizando aproximadamente 75 PSI no reservatório, valor inferior ao limite máximo de 150 PSI definido para o protótipo. Em comparação com o protótipo manual, o uso de um reservatório de maior volume, associado a conexões e tubulação de maior bitola, contribuiu para uma liberação de ar mais eficiente, favorecendo o encaixe do talão nas paredes internas do aro.

Além do talonamento, foram verificadas funções auxiliares do sistema, como a alimentação por bateria, a estabilidade da tensão secundária próxima de 5 V, a sinalização sonora por buzzer, a indicação de mensagens no display e a atuação das proteções por tombamento e sobrepressão. Dessa forma, os ensaios demonstraram o funcionamento conjunto dos subsistemas de armazenamento de ar, pressurização, controle eletrônico, leitura de pressão, acionamento pneumático, alimentação elétrica e interface de operação.

Como melhorias futuras, sugere-se a redução do peso total do protótipo por meio de uma estrutura impressa em 3D mais leve, a substituição da bateria por uma opção de lítio, com menor massa e maior autonomia, e a otimização da disposição dos componentes para reduzir o volume total do conjunto. Também pode ser estudado o refinamento da lógica de controle para melhorar o ajuste da pressão final após o talonamento.

Conclui-se que o protótipo desenvolvido atendeu ao objetivo principal do trabalho, demonstrando viabilidade técnica para auxiliar no talonamento automatizado de pneus sem câmara em bicicletas.

REFERÊNCIAS

ALIEXPRESS. **Transdutor de Pressão 1/2X 150Psi DC5V 1/8NPT**. Disponível em: https://pt.aliexpress.com/item/1005006237087995.html?pdp_ext_f=%7B%22sku_id%22%3A%2212000036411139095%22%7D&sourceType=1&spm=a2g0o.wish-manage-home.0.0&gatewayAdapt=glo2bra. Acesso em: 19 maio 2025.

ALIEXPRESS. **Válvula solenóide elétrica 1/4 "3/8" 1/2 "3/4" 1 "**. 2025. Disponível em: https://pt.aliexpress.com/item/1005007317896847.html?pdp_ext_f=%7B%22sku_id%22%3A%2212000040238276518%22%7D&sourceType=1&spm=a2g0o.wish-manage-home.0.0&gatewayAdapt=glo2bra. Acesso em: 28 maio 2025.

ARC AR COMPRIMIDO (Belo Horizonte). **Saiba como a manutenção de compressores aumenta a vida útil**. 2022. Disponível em: <https://arcomprimido.com.br/saiba-como-a-manutencao-de-compressores-aumenta-a-vida-util/>. Acesso em: 28 abr. 2025.

ASHELY, Emma. **What is Arduino Nano?** 2021. Disponível em: <https://www.rs-online.com/designspark/what-is-arduino-nano-a-getting-started-guide>. Acesso em: 28 abr. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15808: extintores de incêndio portáteis. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

BALBINOT, Alexandre et al. **Instrumentação e Fundamentos de Medida**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ltc — Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2007.

BATERIAS, Pioneiro. MBR 4-BS: pioneiro mbr 4-bs 12v. Pioneiro MBR 4-BS 12V. 2026. Disponível em: <https://bateriaspioneiro.com.br/produto/mbr-4-bs-bateria-automotiva-pioneiro-mbr-4-bs-12v/>. Acesso em: 07 jun. 2026.

BIOPDI (São Carlos). **Soluções em Ensaios de Materiais**. 2024. Disponível em: <https://biopdi.com.br/artigos/propriedades-mecanicas-dos-materiais/>. Acesso em: 22 abr. 2025.

CANAL DA PEÇA (Itaim Bibi São Paulo). **Tudo sobre o funcionamento e diagnóstico do sensor MAP**. Disponível em: <https://www.canaldapeca.com.br/blog/como-funciona-sensor-de-pressao/>. Acesso em: 12 maio 2025.

CASA DAS VÁLVULAS (Contagem). **O que é uma válvula solenoide e onde ela é usada?** 2022. Casa das Válvulas. Disponível em: <https://casadasvalvulasmg.com.br/o-que-valvula-solenoide-e-onde-e-usada/>. Acesso em: 24 abr. 2025.

CIA, Arduino e. Como utilizar um encoder rotativo com Arduino. 2015. Disponível em: https://arduinoocia.com.br/como-usar-encoder-rotativo-ky-040-arduino/?srsltid=AfmBOop-79JvE9qD5UAF_JqSA69qDQ3hFCEMI-BdKSpavAC9JgTWuW4y. Acesso em: 07 jun. 2026.

CICLES JAIME (Curitiba). **Pneu 26x1.1/2x2 Levorin Vereda Convencional**. 2025. Disponível em: <https://www.ciclesjaime.com.br/pneu-26x1-1-2x2-levorin-vereda->

convencional?srsId=AfmBOooEJhNJGyqZgSvemE57kZecMeqYxRgazhuHnYoL33FHjNtgAPEg. Acesso em: 22 abr. 2025.

CIM AUTOMAÇÃO (Campinas). **Atuadores: o que é, para que servem e tipos**. 2024. Disponível em: <https://blog.cimautomacao.com.br/atuadores-o-que-e-para-que-servem-e-tipos/>. Acesso em: 23 abr. 2025.

CRAVO, Edilson. Sensor fotoelétrico: o que é, tipos e onde utilizá-lo: o que é um sensor fotoelétrico?. O que é um sensor fotoelétrico?. 2023. Disponível em: <https://blog.kalatec.com.br/sensor-fotoeletrico/>. Acesso em: 04 jun. 2026.

CURY, Pedro. **Como encher o pneu da bicicleta corretamente**. 2020. Disponível em: www.pedal.com.br/a-pressao-certa-do-pneu_texto466.html#1. Acesso em: 11 abr. 2025.

EMME ANTINCENDIO S.R.L. (Italia). **Extintor 4kg De Polvo**. 2017. Disponível em: https://www.emme-italia.com/sites/default/files/2019-02/es_st_21042.pdf. Acesso em: 30 maio 2025.

ENGELOGIC. **Sensores de Pressão**. 2018. Disponível em: <https://www.engellogic.com.br/download/sensores-pressao.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2025.

EQUIPE NEPIN (São Paulo). **O que é um Cilindro de ar Comprimido e para o que ele serve**. 2022. Disponível em: <https://www.nepin.com.br/blog/solucoes-industriais/o-que-e-um-cilindro-de-ar-comprimido-e-para-o-que-ele-serve/>. Acesso em: 28 abr. 2025.

FABRICANTE, Marcoval/Nascimetal -. **Envasamento Simples com Válvula Solenoide 12v**. 2016. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=yfmWnvFgaug>. Acesso em: 25 abr. 2025.

FIALHO, Arivelto Bustamante. **Automação Pneumática: projetos, dimensionamento e análise de circuitos**. 2. ed. São Paulo: Editora Érica Ltda., 2004.

Física clássica, 2: **Termologia, Óptica E Ondas**/Caio Sérgio Calçada, José Luiz Sampaio. - 1. ed. - São Paulo: Atual, 2012

GASPAR, A. **Compreendendo a Física 3** - 3ed. - São Paulo: Ática, 2016.

GLOBAL EQUIPMENT INTERNATIONAL. Tanque de ar Manchester 3 galões. 2025. Disponível em: <https://www.ebay.com/itm/296564495772?epid=738943153&itmmeta=01JSYZQYEEQP0W XF36VXCZ40AZ&hash=item450c9f159c:g:dR8AAOSwfgpmkUlh&itmprp=enc%3AAQAK AAAA4MHg7L1Zz0LA5DYYmRTS30km3tPzFbnTKJpSjwXOhTM3buG2x%2FaC3zxoxD DqE50x84yM%2FDXAKWyKkAV7Bfrm7KfjWfmxoy2w5s%2FIOGtJXOzx%2FXjwCLE %2FBd91M2olmAYdD0U9gVNm%2Bpsmvq7SW8O2yTS%2Be44P50beKzNv6NmqzmdS %2BRqV%2FM6HsIYxKTrMqB96n2YY8CcgJBuBpaWQ9YPEbZJPk%2BHhC3wbK0ata4f 1QuXmj5pKpAsbdO2xjYQHsRQaOiYS8Cf5DxQuWK98TzCpqKYyIkU7O8TmGSxoC0B m3jD%7Ctkp%3ABFBMqOff389l>. Acesso em: 19 jun. 2025.

HIBBELER, R. C. **Mecânica dos Fluidos**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2012.

JEFFERSON (Ribeirão Preto - Sp). **Válvula Solenoide**. 2019. Disponível em: <https://www.jefferson.ind.br/conteudo/valvula-solenoide.html>. Acesso em: 24 abr. 2025.

JEFFERSON (Ribeirão Preto). **Válvulas Solenóides Informação de Engenharia**. 2023. Disponível em: https://api.aecweb.com.br/cls/catalogos/jefferson/jefferson_valvula_selenoide.pdf. Acesso em: 24 abr. 2025.

KERSCHBAUMER, Ricardo. **Microcontroladores**. 2022. Disponível em: <https://professor.luzerna.ifc.edu.br/ricardo-kerschbaumer/wp-content/uploads/sites/43/2018/02/Apostila-Microcontroladores.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2025

LTD, Shenzhen Xinjinshang Electronics Co.. AD85063 Datasheet (PDF): list of unclassified manufacturers. List of Unclassified Manufacturers. 2026. Disponível em: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1748114/ETC/AD85063.html>. Acesso em: 07 jun. 2026.

LUIZ KUCHENBECKER PANIN (Contagem). Tecni-Ar Parker Store. **Válvula Solenoide: O Que É?** 2021. Disponível em: <https://www.tecniar.com.br/noticias/valvula-solenoide-o-que-e-como-funciona/>. Acesso em: 23 abr. 2025.

MALANDRINI, Luiz. **Vantagens e desvantagens: conversão de rodas normais para tubeless**. 2015. Disponível em: <https://bikeelegal.com/2015/03/03/vantagens-e-desvantagens-conversao-de-rodas-normais-para-tubeless/>. Acesso em: 22 abr. 2025.

MANCHA, Alex. **Tubeless or not Tubeless, eis a questão!** 2013. Disponível em: <https://vizionbikes.wordpress.com/2013/10/28/tubeless-or-not-tubeless-eis-a-questao/>. Acesso em: 22 abr. 2025.

MASTER TECNOLOGIA INDUSTRIAL (São Paulo). **Diferença entre válvula 3/2 e 5/2**. 2024. Disponível em: <https://mtibrasil.com.br/blog/pneumatica-geral/valvulas-pneumaticas/diferenca-entre-valvula-3-2-e-5-2/>. Acesso em: 24 abr. 2025.

MATTEDE, Henrique. **O que são sensores e quais as suas aplicações**. 2019. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/o-que-sao-sensores-e-quais-as-suas-aplicacoes/>. Acesso em: 28 abr. 2025.

MELLO, Marcio. **IHM: o que é, para que serve e principais tipos [GUIA]**. 2023. Disponível em: <https://victorvision.com.br/blog/ihm/>. Acesso em: 28 abr. 2025.

MSS ELETRÔNICA (Governador Valadares). **Display LCD 20x4**. 2025. Disponível em: https://www.msseletronica.com.br/detalhes/display-lcd-20x4-com-backlight-azul-letra-branca-i2c_pid1008.html. Acesso em: 28 abr. 2025.

NAUCO (Santo Andre). **O que são válvulas solenóides e quais suas aplicações**. 2022. Nacional de controle e automação. Disponível em: <https://www.nauco.com.br/blog/valvulas/o-que-sao-valvulas-solenoides-e-quais-suas-aplicacoes/>. Acesso em: 25 abr. 2025.

PEDALERIA. **Como fazer um cilindro de ar caseiro para encher pneus tubeless.**

Pedaleria. 2016. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=pVcYmVtgLMY>.

Acesso em: 22 abr. 2025

POLO ELETRÔNICA INDUSTRIAL (Chapecó-Sc). **O que é Botão de Controle?** 2024.

Disponível em: <https://poloeletronica.com.br/glossario/o-que-e-botao-de-controle/>. Acesso em: 06 maio 2025.

POLY BELT (São Paulo). **Bobina Para Solenoide 12v.** 2025. Disponível em:

<https://www.polybelt.com.br/bobina-para-solenoide-12v-furo-14mm-125w-altura-42mm-coilpu14x42dc12v>. Acesso em: 25 abr. 2025.

QUINZE, Chave. **Como usar válvula Presta.** 2016. Disponível em:

<https://www.youtube.com/watch?v=2lseyiVMeyg>. Acesso em: 05 jun. 2025.

REVELTRONICS (Warsaw Poland). **Reveltronics 150 Psi (10 Bar).** 2024. Disponível em:

https://www.reveltronics.com/downloads/datasheet/REVELTRONICS_PRESSURE_SENSOR_150PSI_10BAR_5V_DATASHEET.pdf. Acesso em: 20 maio 2025.

SALES, Gilson. **Compressores a ar: funcionamento, tipos e aplicações industriais.**

Eficiência na produção com a compreensão desses equipamentos cruciais. 2024.

Disponível em: <https://www.imperialfreios.com.br/blog/categorias/pecas/compressores-a-ar-funcionamento-tipos-e-aplicacoes-industriais-eficiencia-na-producao-com-a-compreensao-desses-equipamentos-cruciais>. Acesso em: 28 abr. 2025.

SMC CORPORATION (Tóquio). **Válvulas Solenoide.** 2024. SMC do Brasil. Disponível em:

<https://smcbr.com.br/valvulas-solenoide-o-que-sao-e-como-funcionam-em-industrias-de-diferentes-setores-produtivos/>. Acesso em: 23 abr. 2025.

SPECIALIZED (California). 2022 **Roval Road And Mountain Wheelsets - Owner's**

Manual. Disponível em: <https://www.specialized.com/br/pt/roda-roval-control-world-cup/p/1000218374?color=1000218391-1000218374>. Acesso em: 22 abr. 2025.

STORE, Fdit Measure Meter. **Transdutor do transmissor da pressão do silicone, G1, 4”.**

2025. Disponível em:

https://pt.aliexpress.com/item/1005004706343034.html?spm=a2g0o.detail.pcDetailBottomMoreOtherSeller.5.65b6HGwdHGwdZ7&gps-id=pcDetailBottomMoreOtherSeller&scm=1007.40050.354490.0&scm_id=1007.40050.354490.0&scm-url=1007.40050.354490.0&pvid=3f7ee52c-9b48-4f5b-b4e0-955fb331f88b&t=gps-id:pcDetailBottomMoreOtherSeller,scm-url:1007.40050.354490.0,pvid:3f7ee52c-9b48-4f5b-b4e0-955fb331f88b,ttp_buckets:668%232846%238116%232002&isseo=y&pdp_ext_f=%7B%22order%22%3A%2258%22%2C%22eval%22%3A%221%22%2C%22sceneId%22%3A%2230050%22%7D&pdp_npi=4%40dis%21BRL%2184.49%2184.49%21%21%2114.19%2114.19%21%402101ef7017458737679458480e50d5%2112000030172626444%21rec%21BR%21%21ABX&utparam-url=scene%3ApcDetailBottomMoreOtherSeller%7Cquery_from%3A

Acesso em: 28 abr. 2025.

THOMAZINI, Daniel; URBANO, Pedro. **Sensores industriais: fundamentos e aplicações**. 4. ed. São Paulo: Editora Érica, 2009.

TUTORIALS, Randon Nerd. **Getting Started with the ESP32 Development Board**. 2016. Disponível em: <https://randomnerdtutorials.com/getting-started-with-esp32/>. Acesso em: 28 abr. 2025.

UNIVAL VÁLVULAS E CONEXÕES (Jardim Cumbica). **O que é um atuador?** 2024. Disponível em: <https://unival.com.br/valvulas-pt/o-que-e-um-atuador/>. Acesso em: 23 abr. 2025.

YANICK GYGER. **Como Montar Pneus Tubeless: Bike Tips And Tricks**. 2020. Disponível em: <https://www.scott-sports.com/pt/pt/page/how-to-setup-tubeless-tires>. Acesso em: 22 abr. 2025.