

## **Drone para Inspeção de Espaço Confinado sem Potencial Explosivo**

**Isabela Coelho dos Santos, Josemar dos Santos**  
Faculdade de Tecnologia de São Bernardo do Campo

**RESUMO:** A inspeção em espaços confinados é essencial para a segurança industrial, pois esses ambientes — como tanques, silos e tubulações — apresentam riscos como gases tóxicos, atmosferas explosivas e difícil acesso. A Norma Regulamentadora 33 (NR-33) estabelece diretrizes rigorosas para esses trabalhos, exigindo treinamentos, monitoramento atmosférico e procedimentos como a Permissão de Entrada e Trabalho (PET). Apesar disso, inspeções presenciais continuam perigosas e limitadas. Nesse contexto, os drones surgem como solução tecnológica eficaz, capazes de acessar áreas complexas com câmeras e sensores, coletando dados sem expor trabalhadores aos riscos. Originários do uso militar, os drones evoluíram para aplicações civis, sendo valorizados por sua eficiência, segurança e capacidade de transmitir dados em tempo real. O uso de drones em inspeções reduz acidentes, melhora a qualidade da avaliação e permite decisões rápidas com base em imagens detalhadas. O trabalho propõe a automatização dessas inspeções com veículos não tripulados, superando limitações dos métodos tradicionais. A justificativa se apoia na NR-33, que define espaços confinados como locais com acesso restrito e potencial para atmosferas perigosas. Dados do Ministério do Trabalho indicam 280 acidentes entre 2011 e 2020, sendo 87% por asfixia, reforçando a necessidade de alternativas seguras. Drones, ao acessar áreas internas de equipamentos industriais, permitem identificar falhas como corrosão e fissuras, viabilizando ações preventivas e garantindo a integridade dos sistemas e a proteção dos trabalhadores, em conformidade com a legislação vigente.

**Palavras-chave:** Confinado. NR33. Drones. Automatização.

## **ABSTRACT:**

Inspection in confined spaces is essential for industrial safety, as these environments—such as tanks, silos, and pipelines—pose risks like toxic gases, explosive atmospheres, and limited access. Regulatory Standard 33 (NR-33) sets strict guidelines for such work, requiring training, atmospheric monitoring, and procedures like the Entry and Work Permit (PET). Despite these measures, manual inspections remain hazardous and limited. In this context, drones emerge as an effective technological solution, capable of accessing complex areas with cameras and sensors to collect data without exposing workers to danger. Originally developed for military use, drones have evolved into valuable tools for civilian applications due to their efficiency, safety, and ability to transmit real-time data. Their use in inspections reduces accidents, improves assessment quality, and enables quick decisions based on detailed imagery. This work proposes automating inspections in confined spaces using remotely controlled unmanned vehicles, overcoming traditional limitations. The justification is based on NR-33, which defines confined spaces as areas with restricted access and potential for hazardous atmospheres. Data from Brazil's Ministry of Labor between 2011 and 2020 recorded 280 accidents, 87% due to asphyxiation, highlighting the need for safer alternatives. Drones can access internal areas of industrial equipment more efficiently than traditional methods, identifying issues like corrosion and cracks. This enables preventive actions that ensure equipment integrity and worker safety, fully aligned with NR-33's objectives.

If you'd like, I can also help you format this for a report or presentation.

**Keywords:** Confined. NR33. Drones. Automation.

## 1. Introdução

A inspeção em espaços confinados é um procedimento crucial para garantir a segurança e a eficiência operacional em diversos setores industriais. Espaços confinados, como tanques, silos, tubulações e galerias subterrâneas, apresentam riscos significativos para os trabalhadores devido à presença de gases tóxicos, atmosferas explosivas, condições de ventilação precárias e dificuldades de acesso e evacuação.

A Norma Regulamentadora 33 (NR-33) estabelece regras de segurança para trabalhos em espaços confinados, exigindo treinamento, certificação e a implementação de medidas como a Permissão de Entrada e Trabalho (PET) e o monitoramento da atmosfera.

Mesmo com essas regras, as inspeções presenciais são desafiadoras devido a limitações de mobilidade e visibilidade precária. Além disso, a entrada de trabalhadores nesses locais os expõe a diversos perigos, como gases tóxicos, riscos de queda e dificuldade de resgate, o que pode comprometer a qualidade da inspeção.

Diante disso, a utilização de drones surge como uma solução tecnológica. Eles podem acessar áreas complexas e de difícil alcance com câmeras de alta resolução e sensores (como os de gás), coletando dados e imagens sem expor os trabalhadores aos riscos.

O termo "drone" começou a ser usado durante a Primeira e Segunda Guerra Mundial, com um exemplo notável sendo o *Queen Bee* (Figura 1), uma aeronave britânica controlada por rádio que servia de alvo para treinamento militar (Câmara Da Silva, 201 C.E.). Originário da língua inglesa e traduzido literalmente como "zangão", o termo é amplamente utilizado para se referir a qualquer tipo de aeronave que não possui tripulação a bordo (Mendonça Neto, 2020).

Figura 1: Drone na Segunda Guerra Mundial



Fonte: Itarc (2025)

Inicialmente desconhecidos do público, os drones evoluíram rapidamente de ferramentas militares para diversas aplicações civis e comerciais (da Silva Nascimento & Scantamburlo Denadai, 2021). A popularidade dos drones se justifica pelos benefícios que eles oferecem em relação às aeronaves convencionais, proporcionando avanços tecnológicos que podem melhorar a segurança e o bem-estar coletivo (Duarte Costa, 2019).

A adoção de drones para inspeção em espaços confinados traz diversas vantagens:

**Redução de riscos para trabalhadores:** Os drones eliminam a necessidade de expor inspetores a atmosferas perigosas, minimizando a chance de acidentes.

**Aumento da eficiência:** Eles podem inspecionar áreas grandes mais rapidamente do que métodos tradicionais e a coleta precisa de dados pode ser revista posteriormente.

**Acesso facilitado:** A capacidade de manobra dos drones permite alcançar pontos de difícil acesso para humanos, proporcionando uma visão mais completa do ambiente.

**Coleta de dados em tempo real:** Os drones podem transmitir imagens e dados em tempo real para uma central de controle, permitindo tomadas de decisão rápidas e fornecendo um histórico visual das condições do espaço.

A integração de drones (Figura 2) na inspeção de espaços confinados representa um avanço na segurança e na manutenção industrial, oferecendo um método mais seguro e eficiente de realizar inspeções e elevando a qualidade da avaliação ao fornecer dados detalhados.

Figura 2 - Drone em um espaço confinado



Fonte: End Inspection

### **1.1 Objetivo**

O presente trabalho, portanto, propõe a automatização da área de inspeção em espaços considerados confinados, segundo a NR 33, e em locais de difícil acesso, através da inserção de um veículo não tripulado controlado remotamente. A utilização de drones para essa finalidade visa superar as limitações da inspeção tradicional, oferecendo um método mais seguro, potencialmente mais rápido e com a capacidade de gerar dados visuais detalhados para análise.

### **1.2 Justificativa**

A utilização de drones em inspeções é uma solução para mitigar os riscos em espaços confinados, ambientes definidos pela Norma Regulamentadora nº 33 (NR 33). A norma estabelece os requisitos para garantir a segurança dos trabalhadores, que incluem a identificação, avaliação, controle e prevenção de riscos.

A NR 33 caracteriza um espaço confinado por três elementos: não ser projetado para ocupação contínua, ter meios de entrada e saída limitados e potencial para conter ou gerar atmosferas perigosas (deficiência ou excesso de oxigênio, gases inflamáveis ou tóxicos). A norma exige procedimentos como a Permissão de Entrada e Trabalho (PET), monitoramento contínuo da atmosfera, a presença de um vigia e capacitação dos trabalhadores. Por conta de todos esses riscos, as inspeções manuais são atividades perigosas.

Embora não haja dados precisos de acidentes em espaços confinados, a análise da Classificação Internacional de Doenças (CID-10) mostra indícios. Um levantamento do Ministério do Trabalho e Previdência de 2011 a 2020 identificou 280 acidentes com códigos como T71 (asfixia) e W81 (confinamento), sugerindo sua ocorrência nesses ambientes (Figura 3). A asfixia foi a causa em 87% desses casos, o que reforça o risco das atmosferas perigosas.

Figura 3: Índícios de acidentes em espaços confinados por CID-10



Fonte: CAT (2025)

A utilização de drones em inspeções de espaços confinados é uma estratégia eficaz para reduzir os riscos para os trabalhadores, já que elimina a necessidade de entrada humana nesses locais perigosos.

Controlados remotamente e equipados com câmeras, os drones conseguem acessar áreas de difícil alcance (como o interior de equipamentos industriais) de forma mais rápida e eficiente do que os métodos tradicionais. As imagens e os dados que eles coletam fornecem informações precisas para identificar problemas estruturais, como corrosão e fissuras. Assim, é possível adotar medidas preventivas, garantindo a integridade dos equipamentos e a segurança dos trabalhadores, em total conformidade com os objetivos da NR 33.

## **2. Fundamentação teórica**

A inspeção em espaços confinados é crucial para a segurança e a eficiência industrial, pois permite a detecção de falhas e anomalias. No entanto, a inspeção tradicional, que exige a presença humana (figura 5), traz riscos significativos para os trabalhadores e aumenta os custos operacionais. A Norma Regulamentadora 33 (NR-33) estabelece requisitos de segurança, como treinamento e a emissão de Permissão de Entrada e Trabalho (PET) (Portaria MTP, 2022).

Apesar da NR-33, os riscos persistem, já que a atmosfera pode ser perigosa e os riscos físicos, como quedas, são comuns. A falta de mobilidade nesses ambientes também limita a eficácia da inspeção. A análise de dados de 2011 a 2020 revelou 280 acidentes com códigos de asfixia e confinamento, sendo a asfixia a causa de 87% dos casos (Portaria MTP, 2022).

Diante desse cenário, a utilização de drones (VANTs) emerge como uma solução para mitigar riscos e otimizar custos. Embora o termo "drone" tenha surgido em projetos militares (Duarte Costa, 2019; Mendonça Neto, 2020), a tecnologia evoluiu e hoje é usada para diversas aplicações civis e comerciais (Juvenal Da Silva Nascimento; Scantamburlo Denadai, 2021). Os drones são ideais para a inspeção de espaços confinados, pois podem acessar áreas difíceis e capturar dados visuais e de vídeo sem expor trabalhadores a riscos.

A adoção de drones traz vantagens importantes, como a redução de riscos, o aumento de eficiência e produtividade, o acesso facilitado a áreas complexas e a coleta de dados em tempo real. Em suma, a integração de drones na inspeção de espaços confinados representa um marco para a segurança industrial.

Nesta seção do trabalho são referenciados os principais conceitos relacionados com o tema da pesquisa.

É abordado temas como inspeção em espaços confinados, sobre o drone e os componentes mais importantes usados no drone.

### **2.1. Inspeção em Espaços Confinado e NR33**

A inspeção de espaços confinados é uma atividade crucial para a manutenção de equipamentos e a segurança operacional, pois a detecção precoce de falhas previne acidentes e otimiza a vida útil dos ativos. No entanto, a inspeção tradicional traz desafios significativos de segurança e custos (Catai, R, 2013).

A Norma Regulamentadora nº 33 (NR-33) define um espaço confinado como um local não projetado para ocupação humana contínua, com entrada e saída

limitadas e ventilação insuficiente (Portaria MTP, 2022). A norma estabelece procedimentos para mitigar riscos, como a necessidade de certificação de profissionais, o reconhecimento detalhado da área e a emissão da Permissão de Entrada e Trabalho (PET) antes de qualquer intervenção (Catai, R, 2013).

Apesar desses procedimentos, a inspeção tradicional ainda é perigosa. A atmosfera pode conter gases tóxicos, inflamáveis ou apresentar deficiência de oxigênio, expondo os trabalhadores a riscos de asfixia e explosão. Além disso, há riscos físicos como quedas e aprisionamentos, que limitam a eficácia da inspeção (Portaria MTP, 2022). A falta de mobilidade e segurança intrínseca a esses ambientes compromete a qualidade e a abrangência da inspeção humana.

A inspeção tradicional também gera altos custos, que incluem o treinamento de equipes, a presença de múltiplos profissionais (como inspetores, vigias e equipes de resgate), a aquisição de equipamentos de segurança e o tempo de inatividade dos ativos (Catai, R, 2013).

## **2.2. Drones**

A inspeção em espaços confinados, como tanques e silos, é perigosa devido a riscos como gases tóxicos e pouca ventilação. O uso de drones surge como uma solução para mitigar esses perigos. Embora a história dos drones remonte a projetos militares, como o ineficaz Projeto Aquila de 1973 (Duarte Costa, 2019), a tecnologia evoluiu.

Para que um drone seja eficaz em inspeções, ele precisa de componentes específicos. Um quadricóptero é ideal por ser fácil de manobrar em locais restritos.

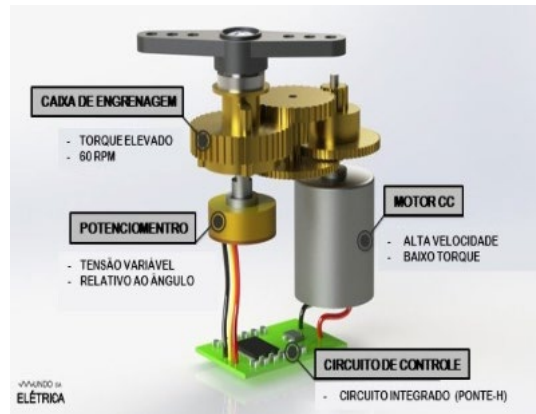
### **2.2.1. Servo Motor**

O servo motor é um dispositivo eletromecânico que converte sinais de controle em movimento mecânico preciso. Ele é composto por três partes: um motor, um sistema de feedback e um controlador (Pimentel De Castro, 2016). O motor é, em geral, um motor de corrente contínua (DC) que transforma energia elétrica em energia mecânica, gerando torque.

O termo "servo" indica que um sistema de feedback é usado para controlar a velocidade do motor (Pimentel De Castro, 2016). Normalmente, esse feedback é feito por um potenciômetro conectado ao eixo do motor, que gera um sinal de tensão proporcional à sua posição angular (Figura 4).



Figura 4: Servo motor por dentro



Fonte: Mundo da Eletrica (2025)

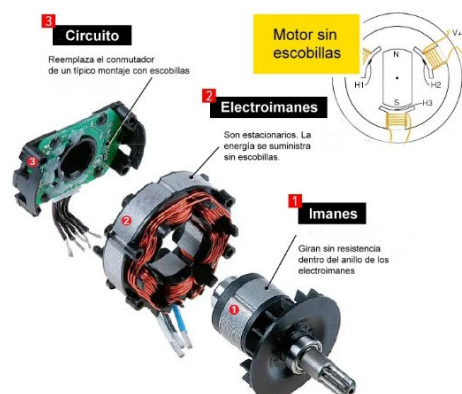
O controlador do servo motor tem a função de receber um sinal, normalmente sinal de pulso modulado (PWM), onde ao receber esse sinal, ele é processado para controlar o motor (Pimentel De Castro, 2016).

### 2.2.2. Motor Brushless

Os motores brushless, também chamados de motores síncronos de ímã permanente, funcionam sem escovas ou comutadores. Em vez disso, usam ímãs permanentes e bobinas para transferir energia, o que resulta em maior durabilidade, eficiência e potência.

A ausência de atrito mecânico, por sua vez, aumenta a vida útil e reduz a necessidade de manutenção. A comutação eletrônica, que controla a energização das bobinas para gerar um campo magnético rotativo (Figura 5), permite um controle preciso de velocidade e torque (Henrique Trindade & Pereira Gonzaga São Carlos, 2009).

Figura 5: Motor brushless por dentro



Fonte: Motorba (2025)

Os motores brushless DC (BLDC) são a tecnologia de propulsão mais utilizada em drones. Eles se destacam por serem leves, potentes e eficientes, características que melhoram a autonomia de voo, a capacidade de carga e a agilidade da aeronave. Sua alta relação potência-peso e o consumo de energia otimizado são cruciais para maximizar o tempo de voo.

O controle desses motores é feito pelos Electronic Speed Controllers (ESCs). Esses dispositivos eletrônicos recebem comandos do controlador de voo do drone e ajustam a velocidade de cada motor de forma individual. Os ESCs gerenciam a comutação eletrônica, controlando a frequência e a duração dos pulsos de energia enviados aos motores.

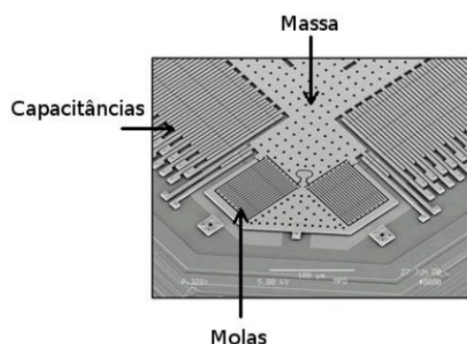
Esse controle preciso e independente permite que o drone realize movimentos complexos, como decolar, pousar, pairar e fazer manobras, garantindo estabilidade e uma resposta rápida aos comandos. A eficiência desse sistema de controle é fundamental para o desempenho e a capacidade operacional dos drones modernos.

### 2.2.3. Acelerômetro

O acelerômetro é um dispositivo sensorial projetado para medir a aceleração, que é a taxa de variação da velocidade de um objeto em movimento. Com isso, esse sensor é capaz de detectar mudanças na velocidade de um objeto em três direções distintas: x, y e z. Essas direções correspondem aos eixos tridimensionais, permitindo ao acelerômetro capturar movimentos em qualquer direção.

O princípio básico de operação dos acelerômetros é baseado em sistemas microeletromecânicos (MEMS), que consiste em uma massa de prova, conectada a uma referência através de uma mola com coeficiente elástico  $k$  e um amortecedor com coeficiente de amortecimento  $\gamma$ , ou seja, um sistema massa-mola-amortecedor (Paulo et al., 2013) como o ilustrado na Figura 6.

Figura 6: Fotografia microscópica de um acelerômetro MEMS



Fonte: (Paulo et al., 2013)

Quando um objeto que contém um acelerômetro é submetido a uma aceleração, a massa interna do dispositivo se desloca em resposta a essa aceleração. Esse deslocamento é então convertido em sinais elétricos, que são interpretados por um microprocessador. Assim, o acelerômetro traduz as mudanças na aceleração do dispositivo em dados compreensíveis.

#### **2.2.4. Giroscópio**

O giroscópio é um dispositivo que mede a velocidade ou posição angular de um objeto, usando os ângulos de guinada, arfagem e rolagem para definir a orientação (Rodrigues, A. H. 2016).

Os giroscópios mecânicos tradicionais funcionam pelo princípio da conservação do momento angular, onde um rotor girando em alta velocidade resiste a mudanças em sua orientação. Essa resistência aplica uma força perpendicular, fenômeno conhecido como precessão (Rodrigues, A. H. 2016).

Hoje, a maioria dos dispositivos, como smartphones e drones, usa giroscópios eletrônicos MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems). Eles são feitos em chips de silício e não têm partes móveis visíveis (Rodrigues, A. H. 2016).

O funcionamento do giroscópio MEMS é baseado na Força de Coriolis. Uma pequena massa vibratória dentro do chip se move constantemente. Quando o dispositivo gira, a Força de Coriolis causa um pequeno deslocamento nessa massa. Sensores detectam essa mudança de posição e a convertem em um sinal elétrico, cuja magnitude é proporcional à velocidade angular do objeto, permitindo uma medição precisa da rotação (Rodrigues, A. H. 2016).

#### **2.2.5. Arduino Uno**

A placa Arduino Uno (Figura 7) é a versão mais amplamente utilizada da plataforma de prototipagem eletrônica de hardware e software abertos. Ela é conhecida por sua simplicidade, robustez e pela vasta comunidade de suporte, sendo um ponto de partida ideal para o desenvolvimento de sistemas de controle e projetos de automação. A arquitetura do Arduino Uno é centrada no microcontrolador ATmega328P (Microchip Technology). Em termos de memória, o ATmega328P oferece 32 KB de memória Flash para armazenar o código do programa (o sketch), 2 KB de SRAM (Static Random-Access Memory) para manipulação de variáveis e 1 KB

de EEPROM para armazenamento de dados que devem ser preservados mesmo após o desligamento da energia (Microchip Technology).

Figura 7: Arduino Uno



Fonte: Eletrogate

Como uma plataforma de código aberto, o Arduino Uno (mostrado na Figura X) não inclui, de fábrica, conectividade Wi-Fi e Bluetooth. A programação é tipicamente realizada via conexão USB serial, utilizando a Interface de Desenvolvimento Integrada (IDE) do Arduino. A ausência de conectividade nativa é contornada pela sua natureza modular, permitindo a integração de módulos (shields) de comunicação, como o ESP8266 ou HC-05, caso a funcionalidade sem fio seja necessária (Arduino, 2025).

Embora não possua o poder de processamento de um dual-core focado em IoT, sua simplicidade e previsibilidade de timing a 16 MHz são altamente valorizadas em aplicações de controle em tempo real e interfaceamento direto com sensores, como é o caso do controle de um VANT.

A placa oferece um conjunto prático de pinos de Entrada/Saída de Uso Geral (GPIO), totalizando 14 pinos digitais. Destes, 6 podem ser configurados como saída PWM (Pulse Width Modulation), funcionalidade essencial para enviar comandos de velocidade precisamente modulados aos ESCs (Controladores Eletrônicos de Velocidade) que gerenciam os motores do drone. Adicionalmente, o Uno dispõe de 6 pinos analógicos com resolução de 10 bits, ideais para a leitura e processamento de sinais analógicos contínuos provenientes de sensores (como o MPU-6050, que fornece dados de atitude) ou para medir grandezas como tensão e temperatura.

### 3. Metodologia

A pesquisa é um estudo de caso exploratório com uma abordagem qualitativa para investigar o uso de drones na inspeção visual de espaços confinados, seguindo a Norma Regulamentadora 33 (NR-33).

A abordagem exploratória é usada para aprofundar um tema pouco documentado na prática, enquanto o estudo de caso permite uma análise detalhada do desenvolvimento e aplicação de um protótipo de drone quadricóptero.

A natureza qualitativa do estudo visa obter dados ricos, como a observação do comportamento do drone em ambientes simulados e a análise da qualidade das imagens e dos sistemas de controle. As técnicas de coleta de dados incluem uma revisão bibliográfica e a documentação detalhada das etapas do projeto.

A metodologia se desdobrará em etapas práticas de engenharia de sistemas, incluindo:

#### 3.1. Etapas da Metodologia

A metodologia se divide em etapas práticas:

- **Levantamento e Análise de Requisitos:** Definir as funcionalidades do drone com base nas restrições de espaços confinados (como dimensões e obstáculos) e nas exigências da NR-33.
- **Seleção e Dimensionamento de Componentes:** Escolher e calcular o hardware que atenda aos requisitos de desempenho e segurança.
- **Projeto e Construção do Protótipo:** Montar o drone com um design robusto e compacto, integrando os sistemas eletrônicos e mecânicos.
- **Desenvolvimento e Programação do Software Embarcado:** Criar o código de controle para o microcontrolador, incluindo algoritmos de estabilização, navegação e comunicação.
- **Testes e Validação:** Realizar testes em ambientes controlados para avaliar a estabilidade de voo, a precisão da navegação, a detecção de obstáculos e a qualidade da transmissão de vídeo, a fim de garantir a conformidade com os requisitos de segurança e eficiência.

#### 4. Desenvolvimento do projeto

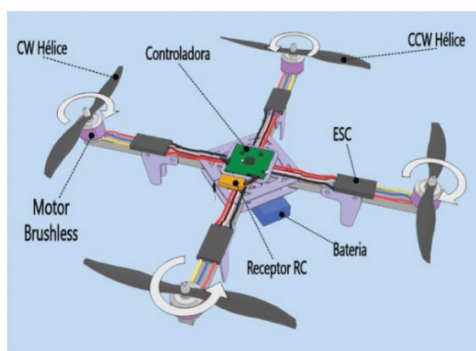
O desenvolvimento deste trabalho visa concretizar a proposta de automatização da inspeção em espaços confinados, conforme delineado anteriormente, por meio da implementação de um quadricóptero controlado remotamente. Esta seção detalha a arquitetura do sistema proposto, a metodologia de desenvolvimento e os resultados esperados, incorporando os componentes e a lógica de controle definidos.

##### 4.1. Arquitetura do Sistema Proposto

O sistema será estruturado em três módulos principais que se interligam para garantir a funcionalidade completa da inspeção remota: o módulo VANT (quadricóptero, figura 8), o módulo de controle remoto e o módulo de processamento e comunicação de dados.

O drone será responsável pela navegação em ambientes restritos e pela coleta de informações. Sua configuração de múltiplos rotores oferece a agilidade e estabilidade necessárias para operar em espaços confinados. Para a coleta visual, o VANT será equipado com uma câmera integrada a uma placa emissora, permitindo a captação de imagens e vídeos detalhados em tempo real. Além disso, quatro sensores ultrassônicos serão incorporados para auxiliar na medição de distâncias, crucial para a navegação em ambientes com obstáculos e para a prevenção de colisões, fornecendo dados importantes para o sistema de controle.

Figura 8: Quadricóptero



Fonte: ResearchGate

## **4.2. Lógica de Voo e Controle**

A lógica de voo do quadricóptero será implementada por meio de um programa para ser processado pelo Arduino UNO. Para garantir a estabilidade do voo, as principais variáveis para o controle virão de um giroscópio e de um acelerômetro.

O giroscópio, utilizando o princípio, detectará a taxa de rotação do drone em cada um dos seus eixos (pitch, roll e yaw). Essa informação é vital para identificar e corrigir movimentos angulares indesejados, mantendo o quadricóptero nivelado e controlável. O acelerômetro, por sua vez, medirá a aceleração linear do drone e, por meio dela, poderá inferir a orientação estática (inclinação em relação à gravidade). A combinação e fusão dos dados do giroscópio e do acelerômetro permitirão uma estimativa precisa da orientação do VANT no espaço, compensando desvios e mantendo a estabilidade.

Os dados de distância do sensor ultrassônico serão integrados à lógica de controle para auxiliar na navegação, permitindo que o drone detecte a proximidade de superfícies e obstáculos.

As imagens serão enviadas para o receptor da câmera, que estará conectado a uma tela, onde será possível visualizar as imagens captadas pelo drone e para o piloto poder orientar o equipamento dentro do espaço confinado.

## **4.3. Metodologia de Desenvolvimento**

O desenvolvimento do projeto será dividido em cinco etapas principais. Primeiro, serão definidos os requisitos e selecionados os componentes, como a estrutura do drone, os motores, os ESCs, o microcontrolador Arduino UNO e os sensores.

Em seguida, o hardware será montado com um design compacto e durável. Na terceira fase, o código será desenvolvido para o Arduino UNO, programando a lógica de voo, o controle dos motores e o gerenciamento dos sensores. Depois, uma interface de controle será criada para o operador.

Por fim, o protótipo será testado em ambientes simulados para validar a estabilidade, a precisão da navegação, a qualidade do vídeo e a confiabilidade geral do sistema, com ajustes para garantir a segurança.

A fase subsequente do projeto foca na transição do planejamento teórico para a implementação prática, englobando a construção do protótipo do quadricóptero, o desenvolvimento e a programação do software embarcado, e a realização de testes rigorosos para validação da solução.

#### **4.4. Construção do Protótipo**

A construção do protótipo do quadricóptero será a primeira atividade prática, visando materializar o projeto em um dispositivo funcional.

**Montagem da Estrutura (Frame):** O frame do drone será montado, priorizando materiais leves e resistentes, como fibra de carbono, para garantir durabilidade e manobrabilidade em espaços confinados. A escolha do design deve considerar o espaço para os componentes e a proteção contra impactos.

**Integração dos Motores e ESCs:** Os quatro motores brushless DC serão fixados aos braços do frame, e os Electronic Speed Controllers (ESCs) correspondentes serão conectados a cada motor. A correta instalação e calibração dos ESCs serão realizadas para assegurar o funcionamento adequado e a direção de rotação de cada motor, essencial para o controle de voo. As hélices serão acopladas somente após a conclusão dos testes de segurança.

**Fixação dos Componentes Eletrônicos:** O microcontrolador Arduino UNO será montado no centro do frame, preferencialmente com elementos que absorvam vibrações para proteger os sensores. O módulo de rádio receptor, o giroscópio e o acelerômetro, e o sensor ultrassônico HC-SR04 serão conectados ao Arduino UNO e posicionados estrategicamente. O sensor ultrassônico será montado para ter uma visão desobstruída do ambiente. A câmera com seu módulo emissor de vídeo será instalada em um local que otimize o campo de visão para a inspeção, sendo alimentada diretamente pelo sistema de energia do drone.

**Sistema de Alimentação:** A bateria (tipicamente de polímero de lítio - LiPo) será integrada ao frame, e será configurado para alimentar todos os componentes eletrônicos (ESCs, Arduino UNO, sensores, módulo de rádio, câmera), garantindo a voltagem adequada para cada parte do sistema.

##### **4.4.1. Desenvolvimento do Código**

O desenvolvimento do código, que será programado no microcontrolador Arduino UNO, é fundamental para o funcionamento do drone.

Ele começará com a configuração do ambiente de desenvolvimento (Arduino IDE), seguida da criação da lógica de controle de voo com algoritmos como o PID para estabilizar o drone usando dados do giroscópio e do acelerômetro. O código também fará a leitura e processamento de sensores, como o ultrassônico HC-SR04, para detectar obstáculos e auxiliar na navegação. A comunicação com o módulo de rádio



também será programada para traduzir os comandos de pilotagem em ações. Por fim, o código será otimizado para gerenciar a energia de forma eficiente e aumentar a autonomia do drone.

#### **4.4.2. Testes e Resultados**

Para garantir a funcionalidade e segurança do protótipo, uma série de testes será realizada.

Inicialmente, cada componente individual foi testado: os motores, os ESCs, os sensores (giroscópio, acelerômetro e ultrassônico) e o módulo de rádio.

Em seguida, a comunicação foi verificada para garantir que os comandos do controle remoto sejam recebidos corretamente pelo drone.

Depois, serão feitos testes de estabilidade e voo em ambientes controlados. Nessa fase, a resposta do drone aos comandos e a eficácia dos algoritmos de controle (como o PID) serão avaliadas.

A autonomia da bateria também será testada para garantir que ela atenda aos requisitos mínimos de voo.

Por fim, será feito um teste de sistema integrado, simulando as condições de um espaço confinado para avaliar o desempenho geral do protótipo em navegação, coleta de dados visuais e detecção de anomalias.

Esses passos permitirão a construção e o aprimoramento contínuo do protótipo, garantindo que a solução desenvolvida seja robusta, segura e eficiente para a inspeção de espaços confinados.

## 5. Testes e resultados

A primeira etapa do desenvolvimento prático consistiu na montagem do frame de 5 polegadas, que é a estrutura principal e esquelética do drone. Essa escolha técnica foi estratégica e fundamental para atender aos requisitos operacionais em espaços confinados.

Optou-se por um frame de 5 polegadas devido às suas características intrínsecas de menor dimensão e leveza. O tamanho reduzido (em comparação com frames maiores, de 7 ou 10 polegadas) é essencial para permitir que o VANT navegue e manobre com eficácia em ambientes restritos e complexos, como dutos, tubulações ou o interior de tanques e caldeiras, onde o espaço é limitado.

Além da manobrabilidade, o frame selecionado oferece alta resistência estrutural, geralmente sendo construído com materiais como fibra de carbono (Figura 9 e 10). Essa durabilidade é crucial, pois, em um ambiente confinado e de difícil acesso, o risco de colisões e impactos é elevado. Um frame resistente garante a proteção dos componentes eletrônicos internos (como a controladora de voo, motores e câmeras), minimizando a possibilidade de falhas catastróficas e interrupções no serviço de inspeção. A combinação de leveza, compacidade e robustez assegura que o drone possa voar de forma ágil, segura e eficiente dentro dos limites estreitos dos espaços confinados.

Figura 9: Peças do Frame



Fonte: Atoridade Própria

Figura 10: Frame montado



Fonte: Autoridade Própria

Prosseguindo com o processo de construção do drone, a etapa seguinte focou na integração do sistema de propulsão. Este procedimento envolveu a ligação dos ESCs (Electronic Speed Controllers), que são os controladores eletrônicos de velocidade, diretamente aos motores (Figura 11 e 12). Os ESCs são componentes vitais, pois recebem os sinais do microcontrolador (a controladora de voo) e regulam a potência elétrica enviada a cada motor, determinando, assim, a velocidade de rotação e, conseqüentemente, o empuxo gerado.

Posteriormente a essa interconexão física, foi estabelecida a comunicação entre os ESCs e o microcontrolador (Arduino). Essa comunicação é essencial para que o "cérebro" do drone possa comandar com precisão cada motor, garantindo a estabilidade, o controle direcional e a capacidade de manobra necessária para a inspeção em espaços confinados. Paralelamente, foi configurada a conexão da bateria principal, a fonte de energia que fornece a alimentação necessária para todo o sistema eletrônico e de propulsão. Este passo final de conexão elétrica assegurou que todos os componentes estivessem energizados e prontos para a calibração e os primeiros testes de funcionamento.

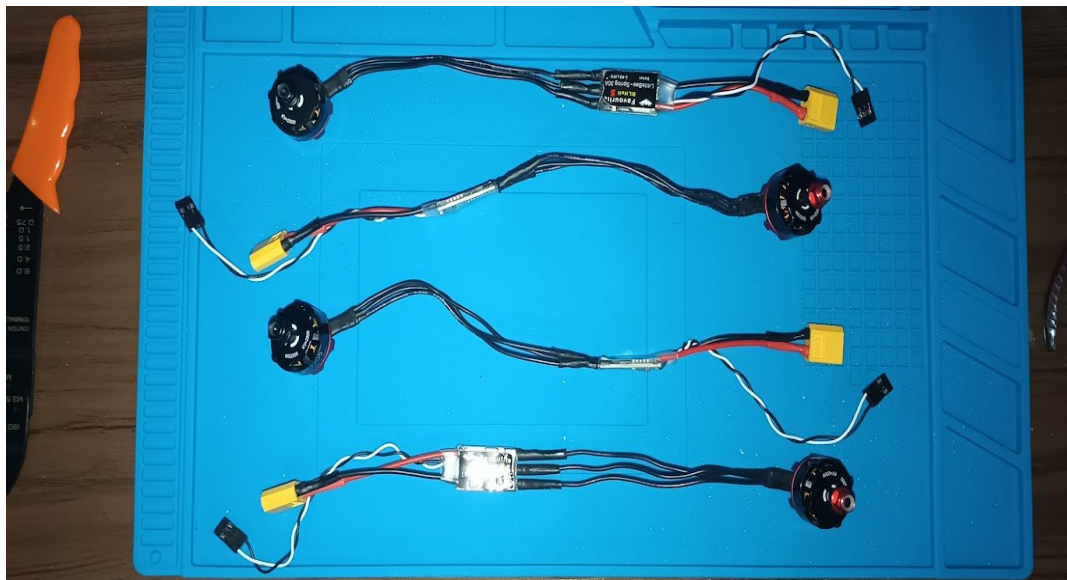


Figura 11: Motores, ESC's e Hélices



Fonte: Autoridade Própria

Figura 12: Motores soldados nos ESC's e nos plugs XT60



Fonte: Autoridade Própria

Na fase inicial de verificação e testes do sistema de propulsão do drone, o Servo Tester foi empregado como um instrumento fundamental para confirmar o funcionamento adequado dos ESCs (Controladores Eletrônicos de Velocidade) e dos motores, antes da integração com a controladora de voo principal.

O Servo Tester é um dispositivo compacto e extremamente útil no processo de montagem e manutenção de qualquer veículo aéreo não tripulado (VANT), especialmente aqueles que utilizam motores brushless (sem escovas), servindo como uma ferramenta essencial de diagnóstico isolado.

Alimentação do Tester: O Servo Tester foi energizado utilizando uma placa Arduino, conectando especificamente os pinos de +5V e GND do microcontrolador

para fornecer a tensão de alimentação estável e segura necessária ao seu funcionamento.

**Conexão do ESC:** Os ESCs do projeto, que controlam os motores brushless, possuem uma fiação que separa a força do comando. Eles apresentam dois fios para alimentação do motor (fase) e dois cabos utilizados para o comando: um para o sinal (Signal) e outro para o GND (Terra).

**Simulação de Comando:** Para o teste de funcionalidade, os cabos de comando (Sinal e GND) dos ESCs foram conectados diretamente ao Servo Tester (Figura 13).

#### Utilidade Essencial em Motores Brushless

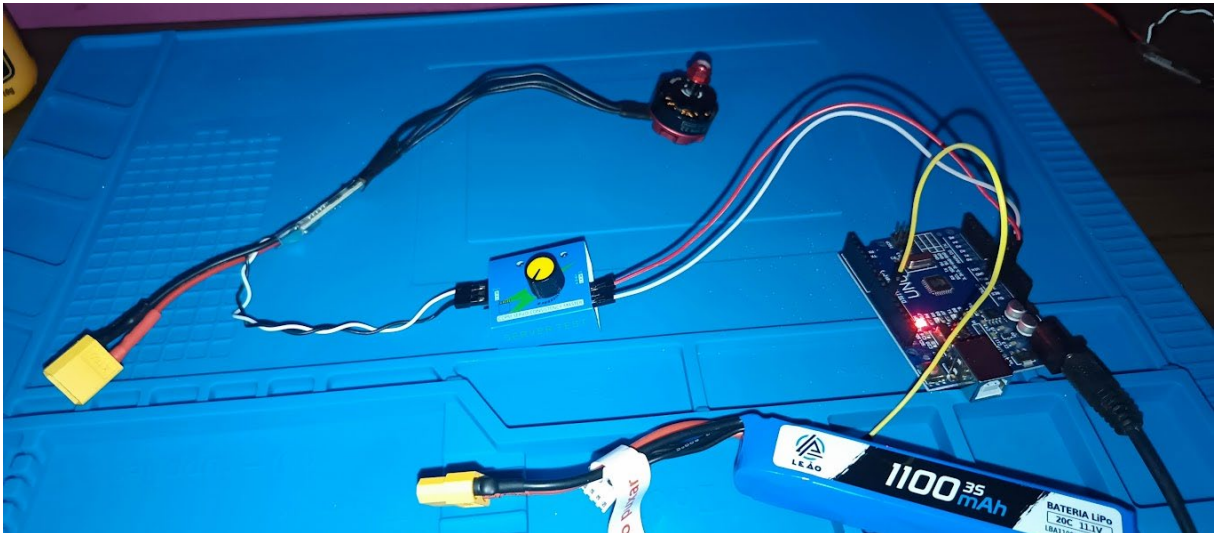
A principal utilidade do Servo Tester em motores brushless reside no fato de que ele atua como um gerador de sinal PWM (Pulse Width Modulation), simulando o que a controladora de voo faria em operação normal, mas de forma manual e isolada.

**Variação de Velocidade e Diagnóstico Isolado:** Ao simular o sinal PWM, o Servo Tester permitiu ao operador variar manualmente a intensidade do sinal através de um potenciômetro. Essa variação forçou os ESCs a modular a energia elétrica enviada aos motores conectados. A observação do giro dos motores — confirmando que cada um estava girando corretamente e respondendo de forma precisa às diferentes demandas de velocidade — validou a integridade do conjunto ESC-Motor. Este teste isolado é crucial, pois permite diagnosticar problemas no sistema de propulsão sem introduzir variáveis do sistema de controle principal (a controladora de voo).

**Pré-Calibração de Acelerador (Throttle):** Muitos ESCs (especialmente aqueles que usam protocolos analógicos) precisam ser calibrados para reconhecer os limites mínimo e máximo do sinal de aceleração. O Servo Tester é o instrumento ideal para essa calibração manual, garantindo que o ESC interprete corretamente o intervalo de sinal do acelerador.

Dessa forma, o procedimento garantiu que o sistema de propulsão estivesse completamente operacional, testado e validado antes da integração final no chassi do drone, um passo indispensável para garantir a segurança e a precisão do voo em ambientes confinados.

Figura 13: Teste dos motores

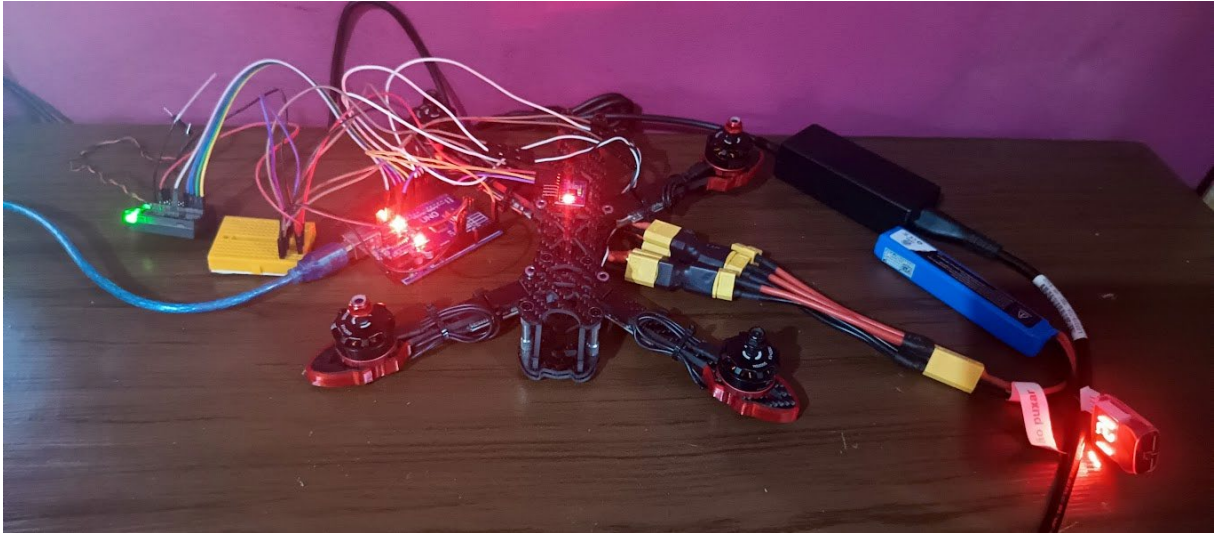


Fonte: Autoridade Própria

Com a validação bem-sucedida do conjunto ESC-Motor, o projeto entrou na etapa de testes de integração (Figura 14), focada em estabelecer a comunicação e o controle remoto da aeronave. Esta fase permitiu a realização dos primeiros testes gerais de sistema, onde se confirmou a correta interconexão e sincronia entre os três elementos vitais de controle: o transmissor de sinais (controle remoto), o receptor de sinais instalado na aeronave, e os próprios motores.

Após a verificação da recepção dos comandos, o fluxo de controle foi definitivamente estabelecido. O receptor passou a ter a função de captar os comandos analógicos ou digitais do operador (enviados via joysticks e chaves do transmissor) e, em seguida, transmitir essas informações de comando para a placa Arduino. O Arduino, assumindo o papel de controladora de voo preliminar, era o responsável por uma função crítica: interpretar e traduzir esses sinais recebidos. Isso significa que ele processava os valores de throttle (aceleração), yaw (guinada), pitch (arfagem) e roll (rolagem) e aplicava a lógica de controle necessária para estabilizar e mover o drone. Finalmente, o Arduino gerava os sinais de comando eletrônicos precisos (sinais PWM, por exemplo) e os enviava para os ESCs. Essa hierarquia de comunicação e processamento (comando externo  $\rightarrow$  recepção  $\rightarrow$  interpretação e lógica  $\rightarrow$  atuação nos motores) validou o sistema básico de controle, essencial para a pilotagem remota do VANT, conferindo a capacidade de controlar a velocidade e direção de cada motor individualmente em resposta aos inputs do piloto.

Figura 14: Teste com o Arduino



Fonte: Autoridade Própria

Os passos iniciais na programação do sistema foram dedicados ao desenvolvimento de rotinas essenciais de configuração e calibração. Foram criados os primeiros programas com objetivos triplos e bem definidos:

**Verificação de Sinais de Controle:** O primeiro conjunto de códigos foi projetado para confirmar que a placa Arduino estava recebendo e processando corretamente os sinais enviados pelo receptor, que, por sua vez, transmitia os comandos do controle remoto (transmissor). Isso garantiu a confiabilidade da interface de controle.

**Calibração dos ESCs (Controladores Eletrônicos de Velocidade):** Rotinas específicas foram implementadas para realizar a calibração dos ESCs, assegurando que eles reconhecessem e operassem dentro da faixa correta de comandos de aceleração (PWM mínimo e máximo) definidos pelo Arduino. Essa calibração é crucial para a resposta uniforme e precisa dos motores.

**Calibração do MPU-6050:** O sensor de posicionamento, o MPU-6050 (que integra um giroscópio e um acelerômetro), também foi submetido a um processo de calibração. Essa etapa é vital para eliminar erros de offset e garantir que o drone tenha uma referência precisa sobre sua atitude (inclinação e orientação) no espaço.

Somente após a conclusão bem-sucedida dessas calibrações e verificações fundamentais, foi possível estabelecer a ponte lógica completa no sistema. Desta forma, foi liberada a capacidade de transmitir os comandos validados e interpretados dos controles (transmissor/receptor) diretamente para os ESCs, efetivando o controle da rotação dos motores e permitindo o controle de voo básico da aeronave.



## **6. Conclusões Parciais e Análise de Resultados do Protótipo**

O desenvolvimento deste trabalho, focado na automatização da inspeção em espaços confinados, alcançou marcos importantes na etapa de validação e integração de sistemas. Embora o protótipo não tenha realizado voo autônomo, ele demonstrou a viabilidade técnica da arquitetura de controle e monitoramento proposta.

Os resultados obtidos confirmam que:

**Comunicação e Controle Estabelecidos:** A comunicação entre o transmissor (controle remoto), o receptor e a placa Arduino Uno foi plenamente validada. O sistema de controle de baixo nível consegue receber, interpretar e processar os comandos do operador, enviando sinais corretos para a propulsão (ESCs e motores).

**Monitoramento de Atitude Funcional:** A integração e calibração do sensor MPU-6050 (giroscópio e acelerômetro) com o Arduino foram bem-sucedidas. O protótipo é capaz de detectar o posicionamento e a atitude espacial em tempo real, um requisito fundamental para a estabilidade e navegação dentro de ambientes confinados.

**Capacidade de Inspeção Visual Primária:** A integração da capacidade de gravação de imagens/vídeos confirma o potencial central do protótipo para a inspeção visual. Isso valida o primeiro passo para a coleta de dados visuais detalhados das condições internas das estruturas.

Essas validações parciais indicam que os subsistemas críticos de controle e sensoriamento estão operacionais. A arquitetura proposta, ao permitir a coleta remota de dados de posicionamento e imagens, promove um aumento significativo na segurança dos trabalhadores, pois a atividade de inspeção é migrada para um ambiente seguro, em total consonância com os objetivos da NR-33.

Em última análise, o protótipo, mesmo em sua fase atual, já demonstra o potencial de oferecer uma avaliação mais precisa e eficiente das condições estruturais ao facilitar a identificação precoce de anomalias. Os próximos passos se concentrarão em integrar o software de voo final e a estabilização para demonstrar o pleno benefício operacional da automação da inspeção com VANTs



## REFERÊNCIAS

- AREIAS, B. et al. Towards an automated flying drones platform. In: VEHITS 2018 - Proceedings of the 4th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems, 2018. p. 529–536.
- BREUNIG, F. M. Gonzalo Prudkin DRONES E CIÊNCIA Teoria e aplicações metodológicas Volume I FACOS-UFSM.
- BUFFON, E. A. M.; PAZ, O. L. de S. da; SAMPAIO, T. V. M. Uso de Veículo Aéreo Não Tripulado (Vant) Para Mapeamento das Vulnerabilidades à Inundação Urbana: Referenciais e Bases de Aplicação. Geography Department University of Sao Paulo, spe, p. 180, 2017.
- CÂMARA DA SILVA, M. A “REVOLUÇÃO MILITAR” DOS DRONES (2001 A 2018): DA “CAÇADA HUMANA” NO AFGANISTÃO ÀS VÁRIAS FRENTES DE BATALHA NO ORIENTE MÉDIO E AO AUMENTO DA ESCALA DA GUERRA ENTRE AS “GRANDES POTÊNCIAS.” 201 C.E.
- CATAI, R. E. ANÁLISE DA APLICAÇÃO DA NR-33-SEGURANÇA E SAÚDE NOS TRABALHOS EM ESPAÇOS CONFINADOS EM SILOS DE GRÃOS. 2013.
- COELHO EUGENIO, F.; BOLSONI ZAGO, H. O LIVRO DOS DRONES. 2019.
- DA SILVA NASCIMENTO, A. J.; SCANTAMBURLO DENADAI, M. DRONE, A HISTÓRIA DESTA TECNOLOGIA. 2021.
- DUARTE, R. C.; DA CUNHA, E. N. PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM DRONE QUADRICÓPTERO. 2024.
- DUARTE COSTA, R. ANÁLISE DA ATUAÇÃO DOS DRONES NA SEGURANÇA DE UM PAÍS. 2019.
- FERNANDES VIVEIROS, I. M. Controlo de Motores de um Drone. 2018.
- FERNANDO PERETTI, L. MAPEADOR DE OBSTÁCULOS TRIDIMENSIONAIS POR SENSOR ULTRASSÔNICO. 2019.
- HENRIQUE TRINDADE, R.; PEREIRA GONZAGA SÃO CARLOS, D. ESTUDO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS NÃO-CONVENCIONAIS: Motor Brushless DC. 2009.
- MARCELO BREUNIG, F. DRONES E CIÊNCIA Teoria e aplicações metodológicas. 2019.
- MENDONÇA NETO, L. Sistema Multi-operacional de Acionamento Remoto Acoplável a Veículo Aéreo Não Tripulado. 2020.

MINISTÉRIO DO TRABALHO. nr-33\_guia\_tecnico\_da\_nr\_33.

MOTA DE SOUZA, D. USO DE ARDUINO E MÓDULO GPS PARA MONITORAMENTO POR TELEMETRIA DE ROTAS DE TRANSPORTE POR CAMINHÕES EM MINAS A CÉU ABERTO.

PAULO, J.; SOARES, V. Caracterização de um Acelerômetro Baseado em Sistemas Microeletromecânicos (MEMS). 2013.

PIMENTEL DE CASTRO, F. SERVO MOTORES: visão geral, controle e aplicação. 2016.

PORTARIA MTP. NR 33 - SEGURANÇA E SAÚDE NOS TRABALHOS EM ESPAÇOS CONFINADOS. 2022.

RODRIGUES, A. H. ANÁLISE ELETROMECÂNICA DO GIROSCÓPIO MEMS. 2016.