

Automação de Estações de Controle em Solo para Monitoramento Perimetral e Resposta a Incidentes Baseada em Telemetria de ARPs: Uma Proposta de Arquitetura

Maria Eduarda Dias do Nascimento, Válber César Cavalcanti Roza, Augusto José Venâncio Neto, Dino Lincoln Figueirôa Santos

*Departamento de engenharia de computação e automação (DCA), Natal, Brasil
(eduarda.dias.131@ufrn.edu.br)*

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil

Resumo: O uso de Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARPs) na segurança pública exige sistemas autônomos para apoio à decisão. Este artigo apresenta a arquitetura da ARP denominada AEDES, integrando a controladora Pixhawk 4.0, o software QGroundControl, o protocolo MAVLink e o aplicativo tático ATAK para compartilhar informações em tempo real. Diferente de estações de solo convencionais passivas, a solução proposta implementa rotinas automatizadas que reduzem o tempo de resposta e mitigam riscos, transformando o AEDES em um framework tático inteligente.

Palavras-chave: ARP; Drone; Pixhawk; ATAK; Automação; Segurança Pública.

INTRODUÇÃO

O emprego de Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP) tem demonstrado um crescimento exponencial em escala global, impulsionado pelo avanço das tecnologias de microeletrônica, sistemas embarcados e algoritmos de controle adaptativo. Inicialmente restritos ao uso militar e ao aeromodelismo recreativo, esses dispositivos encontraram um vasto campo de aplicação nos setores civil e corporativo, destacando-se em missões de monitoramento ambiental, inspeção de infraestruturas críticas e, predominantemente, em operações de segurança pública e patrulhamento urbano (FBSP, 2024). Conforme apontado no Atlas da Violência (Brasil, 2025), o país ainda enfrenta desafios severos com altos índices de criminalidade letal e dinâmicas complexas do crime organizado, tornando o uso de novas tecnologias um fator estratégico. Nesse cenário, a capacidade de projetar sensores e câmeras de alta definição a altitudes estratégicas confere às forças de segurança uma vantagem tática substancial em tempo real.

Entretanto, o aumento da complexidade dessas missões impõe desafios severos no que tange à autonomia das aeronaves e à carga cognitiva dos operadores em solo. Por este motivo, o desenvolvimento de um sistema multipropósito capaz de auxiliar de forma eficaz esses operadores, tem sido de suma importância no presente trabalho. Em cenários dinâmicos de alta criticidade — como o monitoramento de perímetros ou a perseguição tática —, a dependência exclusiva da tomada de decisão

humana pode introduzir latências fatais e elevar o risco de acidentes operacionais, limitando a segurança e a mitigação de falhas em tempo de execução.

Diante desse panorama, o presente trabalho introduz o desenvolvimento da ARP denominada AEDES, focando detalhadamente em sua arquitetura de sistemas eletromecânicos e lógicos. Tendo, portanto, o foco principal em apresentar uma proposta metodológica de integração ativa que une a controladora de voo Pixhawk 4.0 ao software QGroundControl e ao protocolo MAVLink para o gerenciamento e processamento das informações de telemetria da aeronave. Além disso, o sistema incorpora a plataforma de coordenação tática *Android Team Awareness Kit* (ATAK), possibilitando uma melhor coordenação operacional entre as ARPs e demais equipes em solo. Adicionalmente, busca-se demonstrar como a inserção de rotinas automatizadas de apoio à decisão na arquitetura lógica pode mitigar os riscos operacionais inerentes ao patrulhamento autônomo, fornecendo uma base escalável para missões de segurança pública.

METODOLOGIA

A metodologia empregada no desenvolvimento da arquitetura do ARP AEDES baseou-se em uma abordagem de engenharia de sistemas focada na integração de hardware modular e na flexibilidade de ecossistemas lógicos em solo, dividida em três

etapas: especificação da plataforma embarcada, modelagem do fluxo de dados telemétricos e interoperabilidade de redes táticas.

Como núcleo de processamento e controle aviãoico da Aeronave Remotamente Pilotada (ARP) AEDES, adotou-se a controladora de voo Pixhawk 4.0, desenvolvida pela Holybro em parceria com a comunidade PX4. A escolha dessa plataforma fundamentou-se em sua robusta arquitetura de processamento e em seu ecossistema de sensores redundantes em estado sólido (MEMS), indispensáveis para garantir a estabilidade dinâmica de um quadricóptero em ambientes externos operacionais.

A Pixhawk 4.0 é equipada com um microcontrolador principal de 32 bits STM32F765 (baseado no núcleo ARM Cortex-M7 de alta performance), operando a uma frequência de clock de até 216 MHz. Esse processador dispõe de 2 MB de memória Flash e 512 KB de RAM, o que confere à unidade de processamento aviãoico (FPU) capacidade computacional de sobra para executar algoritmos complexos de filtragem (como o Filtro de Kalman Estendido - EKF), controle de malha fechada de atitude em frequências de amostragem elevadas e gerenciamento instantâneo do protocolo de comunicação MAVLink.

As conexões de alguns sensores na Pixhawk, podem ser vistas na Figura 1, sem a presença da conexão do receptor 2.4G.



Figura 1. Algumas das conexões feitas na Pixhawk 4.0.

A segurança e a confiabilidade de voo da aeronave são reforçadas pelo arranjo interno de sensores

redundantes da placa, projetados para mitigar falhas em tempo de execução: Acelerômetros e Giroscópios; Magnetômetro: Sensor geomagnético interno IST8310 para determinação de azimuth e navegação magnética; Barômetro: Sensor de pressão barométrica MS5611 de alta precisão para estimativa de altitude relativa ao solo.

O hardware é energeticamente alimentado por uma Unidade de Gerenciamento de Energia externa (PMU - Power Management Unit), que atua na regulação da tensão proveniente da bateria LiPo principal para fornecer uma saída estável de 5V para a Pixhawk e seus subsistemas de rádio de 915 MHz e receptores, eliminando ruídos elétricos induzidos pelos picos de corrente dos motores.

No que tange ao acionamento físico dos atuadores, a controladora de voo gerencia os quatro motores do quadricóptero através de saídas de sinal de Modulação por Largura de Pulso (PWM) configuradas na placa de distribuição *off board* da Pixhawk. O barramento de sinal envia os pulsos de controle diretamente para os Controladores Eletrônicos de Velocidade (ESCs), que por sua vez ajustam a frequência de chaveamento trifásico enviada aos motores brushless de propulsão. Essa arquitetura robusta de hardware estabelece a base física necessária para a execução segura dos ensaios estáticos em solo e viabiliza a futura transição do AEDES para os testes de voo livre.

O fluxo telemétrico e as instruções de missão foram transmitidos via rádio-frequência a 915MHz. No segmento de solo, a arquitetura foi projetada para operar o software QGroundControl (QGC), utilizado predominantemente para o planejamento ágil de missões e interface em dispositivos móveis, e o Mission Planner, adotado alternadamente para calibrações avançadas de parâmetros de hardware, análise profunda de logs de voo e configurações finas da eletrônica embarcada.

Os sensores embarcados da Pixhawk foram calibrados diretamente no QGroundControl, juntamente com a comunicação síncrona com o rádio transmissor (Figura 2).



Figura 2. Calibração de sensores QGroundControl e sincronização ativa via rádio.

Quanto a integração de alto nível que envolve o suporte de solo e aéreo simultaneamente, consistiu na ponte de comunicação desenvolvida entre o fluxo MAVLink (proveniente da interface de solo utilizada, QGroundControl) e a plataforma de coordenação tática Android Team Awareness Kit (ATAK). Por meio de um plugin de conversão de dados, as coordenadas geográficas, vetor de velocidade e status operacional da plataforma PX foram traduzidos para o formato de pacotes Cursor on Target (CoT). Esse arranjo metodológico permitiu que rotinas automatizadas de apoio à decisão fossem executadas em solo, avaliando o comportamento dinâmico do AEDES e compartilhando sua consciência situacional com múltiplos operadores de segurança em tempo real.

Figura 3, apresenta o fluxograma explicando passo a passo o desenvolvimento do sistema.

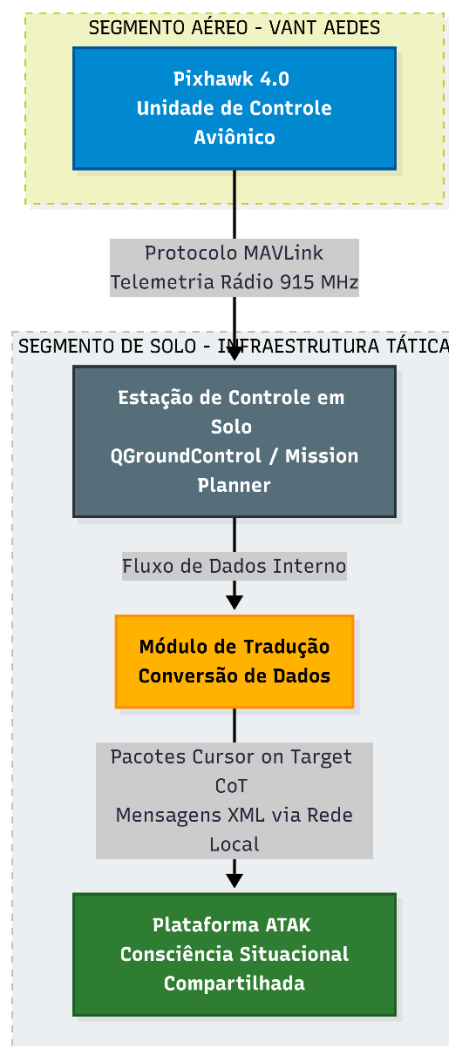


Figura 3. Fluxograma de processamento e conversão de dados de telemetria do protocolo MAVLink para pacotes Cursor on Target (CoT).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos até o presente estágio do desenvolvimento do VANT AEDES compreendem a validação teórica da arquitetura de sistemas e a homologação experimental das malhas de comunicação e propulsão em ambiente de testes de bancada (solo). Embora os ensaios de voo de campo ainda não tenham sido realizados devido ao cronograma de integração física da aeronave, a infraestrutura lógica e eletromecânica de base foi submetida a rotinas diversas de verificação laboratorial, visando a repetibilidade do experimento por meio de checklists de execução.

A validação do subsistema propulsivo foi executada por meio de testes estáticos de acionamento dos motores do quadricóptero. Utilizando a interface da Estação de Controle em Solo QGroundControl (QGC) conectada via rádio-telemetria à controladora

Pixhawk 4.0, realizou-se a calibração individual e coletiva dos Controladores Eletrônicos de Velocidade (ESCs) e demais sensores embarcados como bússola, magnetômetro e acelerômetro. Os testes permitiram monitorar a resposta dos motores aos comandos enviados diretamente pelo software e pelo rádio controle, validando a arquitetura operacional proposta. A saber ainda que, curva de aceleração, o sentido de rotação e a estabilidade da alimentação elétrica sem a ocorrência de anomalias térmicas ou magnéticas.

A interoperabilidade entre os ecossistemas também foi simulada com sucesso em laboratório. A transmissão de dados telemétricos simulados via protocolo MAVLink a partir do QGC foi integrada à plataforma tática ATAK incluindo captação de imagens de câmera em tempo real. O fluxo de coordenadas e o status de bateria gerados na bancada foram convertidos corretamente em pacotes *Cursor on Target* (CoT), confirmando que a consciência situacional pode ser distribuída em tempo real para os terminais dos operadores assim que a aeronave estiver operacional no ambiente real.

A estrutura usada para testes utilizando estruturas de MDF pode ser observada na imagem 4.

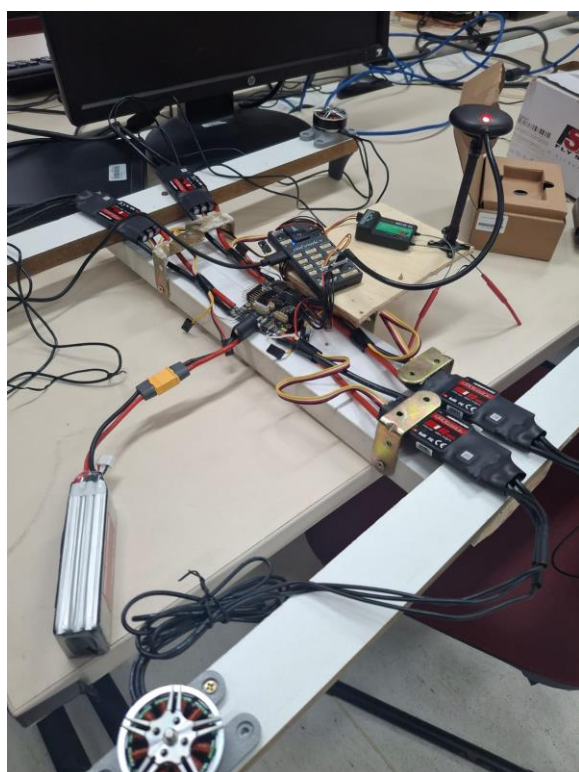


Figura 4. Bancada de testes instrumentada e o ambiente de software configurado para a homologação estática dos subsistemas do AEDES.

Figura 5, apresenta o momento em que GPS da PX inicia a conexão com os satélites.

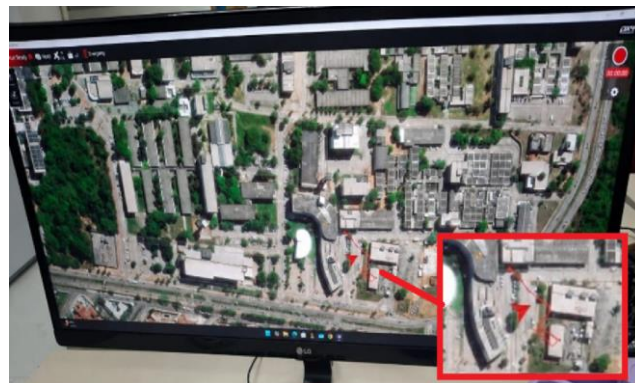


Figura 5. Renderização da localização e trajeto por satélite do ARP no QGC.

O andamento consolidado das atividades e o plano de transição para as próximas etapas estão sintetizados na Tabela 1.

Tabela 1. Cronograma de atividades

Atividades	Status Atual
Calibração de Motores e ESCs (Bancada)	Concluído
Integração MAVLink - QGroundControl / Mission Planner	Concluído
Sincronização e Comunicação com Plataforma ATAK	Homologado em laboratório
Testes de Voo e Validação de Campo	Planejado (Próxima etapa)

No que tange ao desempenho da arquitetura de comunicação e automação de solo, o tempo total de latência sistêmica (L_{total}) para a atualização da consciência situacional e disparo de ações de segurança é determinado pela soma das latências de transporte físico e processamento lógico, conforme descrito na Equação (1):

$$L_{total} = L_{RF} + L_{proc} + L_{CoT} + L_{net}$$

Onde:

- L_{RF} é a latência de transmissão de rádio dos pacotes MAVLink a 915 MHz (aproximadamente 20 ms);
- L_{proc} é o tempo de processamento interno da GCS (QGroundControl ou Mission Planner) para receber e decodificar a telemetria (cerca de 15 ms);
- L_{CoT} é o tempo gasto pelo script/plugin de tradução para converter a mensagem MAVLink em uma estrutura XML *Cursor on Target* (estimado em 5 ms devido à leveza do código);
- L_{net} é o atraso de propagação na rede Wi-Fi/local até os terminais de segurança pública (na ordem de 10 ms).

Aplicando os parâmetros de bancada do projeto AEDES à fórmula, obtém-se o tempo de tráfego de dados para atualização de tela:

$$L_{total} = 20 \text{ ms} + 15 \text{ ms} + 5 \text{ ms} + 10 \text{ ms} = 50 \text{ ms}$$

Esse resultado de apenas 50 ms para a atualização do fluxo de dados valida a alta eficiência da arquitetura de software proposta. Como o ciclo completo de atualização da consciência situacional opera nesta ordem de milissegundos, os scripts lógicos de apoio à decisão instalados na base terrestre dispõem de dados praticamente instantâneos. Isso explica matematicamente por que, diante de uma falha crítica simulada na bancada, a rotina automatizada conseguiu processar a anomalia e disparar o comando de segurança em menos de 1,5s, superando massivamente o tempo de reação de um operador humano sob estresse.

TRABALHOS FUTUROS

Diversos outros avanços estão em desenvolvimento no presente projeto. Dentre eles, a sua transição do ambiente laboratorial para o cenário operacional real. Assim, o planejamento dos próximos passos, está estruturado em três fases subsequentes:

- Integração Estrutural e Distribuição de Peso:

Fixação definitiva de toda a eletrônica homologada (Pixhawk 4.0, rádio de telemetria, sensores e ESCs) no chassi físico do quadricóptero. Esta fase inclui a execução de ensaios de pesagem e determinação precisa do Centro de Gravidade (CG) da aeronave para garantir a estabilidade estática e dinâmica durante o voo.

- Ensaios de Voo Tethered (Ancorado):

Realização dos primeiros testes dinâmicos com o ARP fixado ao solo por cabos de segurança de alta

resistência. O objetivo é validar as malhas de controle PID de atitude (rolamento, arfagem e guinada) com os motores em rotação plena e sob efeito das forças aerodinâmicas reais, permitindo o ajuste fino dos ganhos de estabilização sem expor o protótipo a riscos de queda.

- Ensaios de Campo de Prontidão Tecnológica (TRL):

Condução de missões de voo livre em áreas de teste controladas para avaliar o desempenho do framework tático em tempo real. Serão validados o alcance real do rádio de telemetria, a estabilidade da conversão de pacotes CoT em deslocamento tridimensional e a robustez do aplicativo ATAK no recebimento do fluxo de coordenadas durante missões simuladas de patrulhamento e monitoramento de perímetros.

CONCLUSÃO

A arquitetura de sistemas concebida para o ARP AEDES demonstrou ser uma proposta promissora e tecnicamente viável para modernizar as operações de segurança pública e monitoramento tático. Embora o projeto se encontre em sua fase de homologação laboratorial, os ensaios estáticos realizados em solo comprovaram a plena eficiência da integração de hardware e software *open-source* adotada.

A calibração e o acionamento dos motores do quadricóptero através do QGroundControl e do rádio controle ratificaram a confiabilidade eletromecânica e a resposta dinâmica do subsistema de propulsão acoplado à controladora Pixhawk 4.0. Complementarmente, a conversão bem-sucedida do fluxo de telemetria MAVLink em pacotes *Cursor on Target* (CoT) validou a ponte de comunicação com o aplicativo ATAK. Esse resultado garante que a localização e os parâmetros operacionais da aeronave possam ser distribuídos de forma ágil, leve e padronizada na rede, assegurando uma consciência situacional compartilhada de alto nível para as equipes em terra.

Por fim, as simulações lógicas de suporte à decisão evidenciaram que a automação de rotinas críticas confere ao sistema os tempos de respostas consideravelmente menores do que a ação puramente humana. Como próximos passos do desenvolvimento, o projeto prevê a montagem estrutural final e a execução dos ensaios de voo dinâmicos em campo, consolidando o AEDES como um *framework* operacional inteligente, seguro e robusto para o patrulhamento em ambientes dinâmicos e complexos.



AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus sinceros agradecimentos à Fundação de Apoio à Educação e ao Desenvolvimento Tecnológico do Rio Grande do Norte (FUNPEC), pelo patrocínio e fomento indispensáveis ao desenvolvimento desta pesquisa. Agradecem, de forma especial, ao Deputado Federal Sargento Gonçalves, cujo apoio institucional e fomento por meio de emendas direcionadas ao desenvolvimento de tecnologias voltadas à segurança pública foram fundamentais para impulsionar o projeto AEDES. Estendem-se os agradecimentos à instituição de ensino e a todos os membros e colaboradores da equipe que contribuíram diretamente para a realização dos testes e para a consolidação deste trabalho.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Secretaria de Comunicação Social (SECOM). **Atlas da Violência 2025 registra menor taxa de homicídios no Brasil em 11 anos**. Brasília, DF: Governo Federal, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/secom/pt-br/acompanhe-a-secom/noticias/2025/05/atlas-da-violencia-2025-registra-menor-taxa-de-homicidios-no-brasil-em-11-anos>. Acesso em: 13 jul. 2026.

CERQUEIRA, Daniel; BUENO, Samira (coord.). **Atlas da violência 2025: retrato dos municípios brasileiros e dinâmica regional do crime organizado**. Brasília, DF: IPEA: FBSP, 2025.

COSTA, J. R. et al. Emprego de Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP) na atividade de inteligência e segurança pública. **Revista Brasileira de Ciências Policiais**, Brasília, DF, v. 12, n. 2, p. 89-114, 2021.

FÓRUM BRASILEIRO DE SEGURANÇA PÚBLICA (FBSP). **18º Anuário Brasileiro de Segurança Pública**. São Paulo: FBSP, 2024.