



Redes de transmissão de dados para DRONES

Lourenço Alves Pereira Júnior
Aeronautics Institute of Technology - ita.br



cgi.br nic.br

Lourenço Alves Pereira Júnior

Professor no Instituto Tecnológico de Aeronáutica

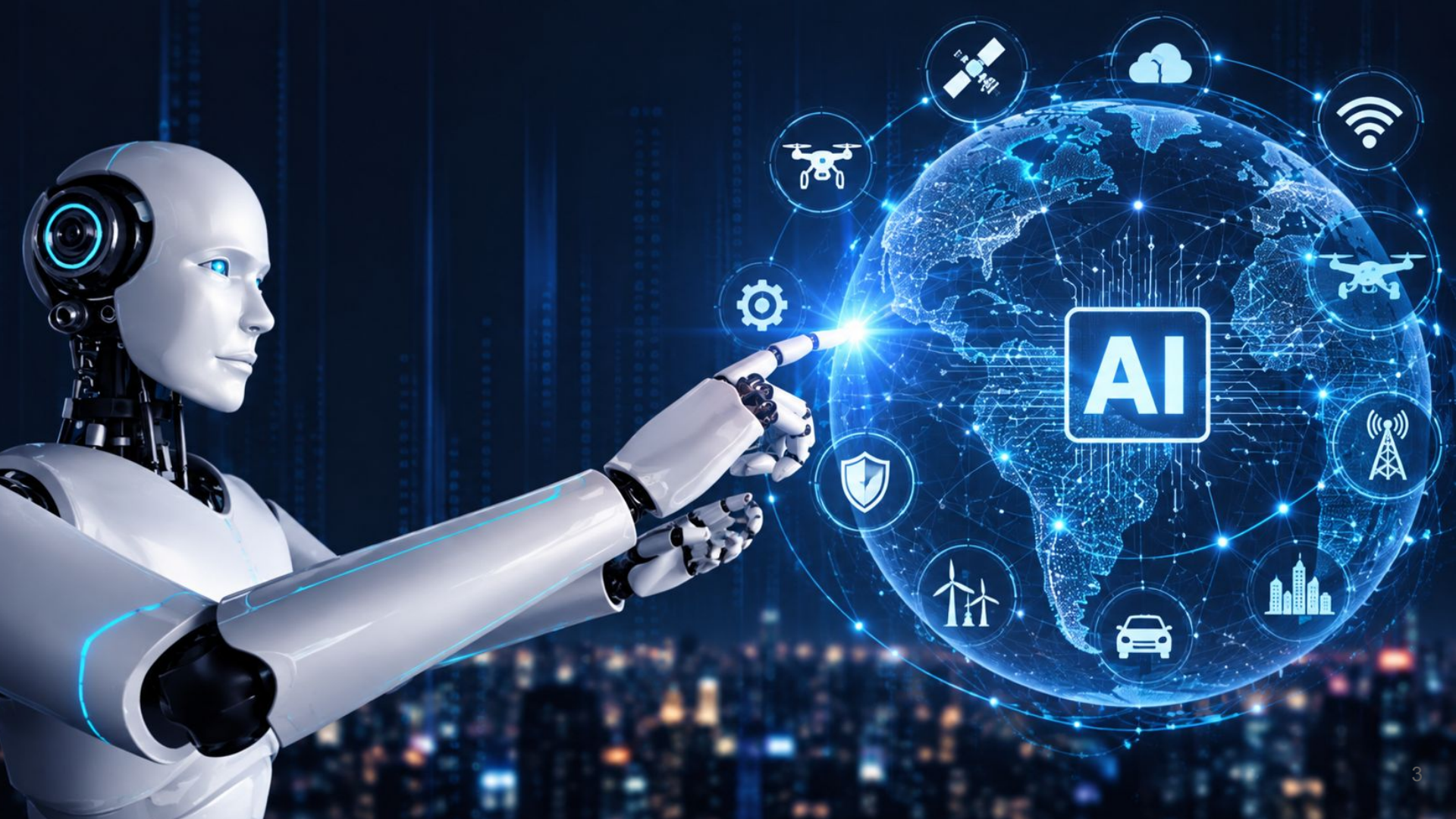
Cibersegurança e Redes de Computadores

Laboratório de Comando e Controle & Defesa Cibernética

Grupo de Pesquisa ARES: Agentic Runtime Enforcement and Security



Lab C2DC
Command and Control and Cyber Defense Laboratory





SMART
CONNECTED
SUSTAINABLE

SAFE
EFFICIENT
RESILIENT

CONNECTED INTELLIGENT SAFER TOMORROW

PEOPLE · MOBILITY · AUTONOMY
INTELLIGENCE · RESILIENCE

5G

Intelligent Infrastructure

- Smart Traffic Lights
- V2X Communication
- Roadside Units (RSU)
- Environmental Sensors



Robots & Embodied AI

Perceive
Interact
Operate
Learn

Vehicle-to-Everything
(V2X)

Intelligent Transportation Systems

- Autonomous Vehicles
- Smart Public Transport
- Freight & Logistics
- Traffic Optimization
- Safety & Incident Response

People-Centric Mobility

- Pedestrians & Cyclists
- Accessibility
- Mixed Traffic Safety

Aerial Mobility
(eVTOL / UAM)

Delivery Drones

Agentic AI

Plan

Reason

Collaborate

Perceive

Decide

Act



Cloud / Digital Twin
City & Airspace



Edge Computing
(MEC)



5G / 6G Networks
(Non-Terrestrial + Terrestrial)



Secure & Trustworthy AI

Air Traffic Management (UTM)



UAV Coordination

Geofencing



Demand-Aware Routing

Integration with Manned Aircraft

VERTIPORT



SUSTAINABLE



SECURE



HUMAN-CENTRIC



RESILIENT

INTELLIGENT TRANSPORTATION.
A SAFER, MORE CONNECTED WORLD.





✓ Route Optimized
✓ Airspace Clear
🕒 Delivery in 2 min
🔋 Battery 78%



SMART CITIES
BRIGHTER TOMORROWS

Indissociabilidade entre: *security e safety*

Avanços da IA

IA incorporada

IA agêntica

IMPACTO NO MUNDO FÍSICO

... mas também oportunidades



keeta drone

美团 Meituan

5G RedCap

Our Business Footprints

Keeta Drone is a leading drone delivery service advancing the future of last-mile logistics through safe, efficient, and sustainable aerial solutions. As of March 2026, Keeta Drone has launched 70 delivery routes across major global cities, including Shenzhen, Beijing, Shanghai, Guangzhou, Hong Kong, and Dubai, successfully completing more than 880,000 deliveries. Designed to serve diverse urban environments, Keeta Drone's instant retail delivery services cater to offices, residential communities, scenic destinations, parks, university campuses, healthcare facilities, and public spaces such as libraries, providing users with access to over 160,000 product choices across the regions.

6

Major Scenarios

880k+

Orders

70+

Routes

160k+

Deliverable Items



Brasil — 2025

1.885.761 voos comerciais autorizados,
abrangendo entrega, inspeção,
monitoramento e atendimento a emergências.

Premissa de negócio

O modelo de negócio de qualquer operador UAV depende de operações frequentes, previsíveis e seguras. Nesse contexto, a rede móvel passa a ser insumo crucial da cadeia de valor.



Mercado de Drones e Logística Aérea

\$16B

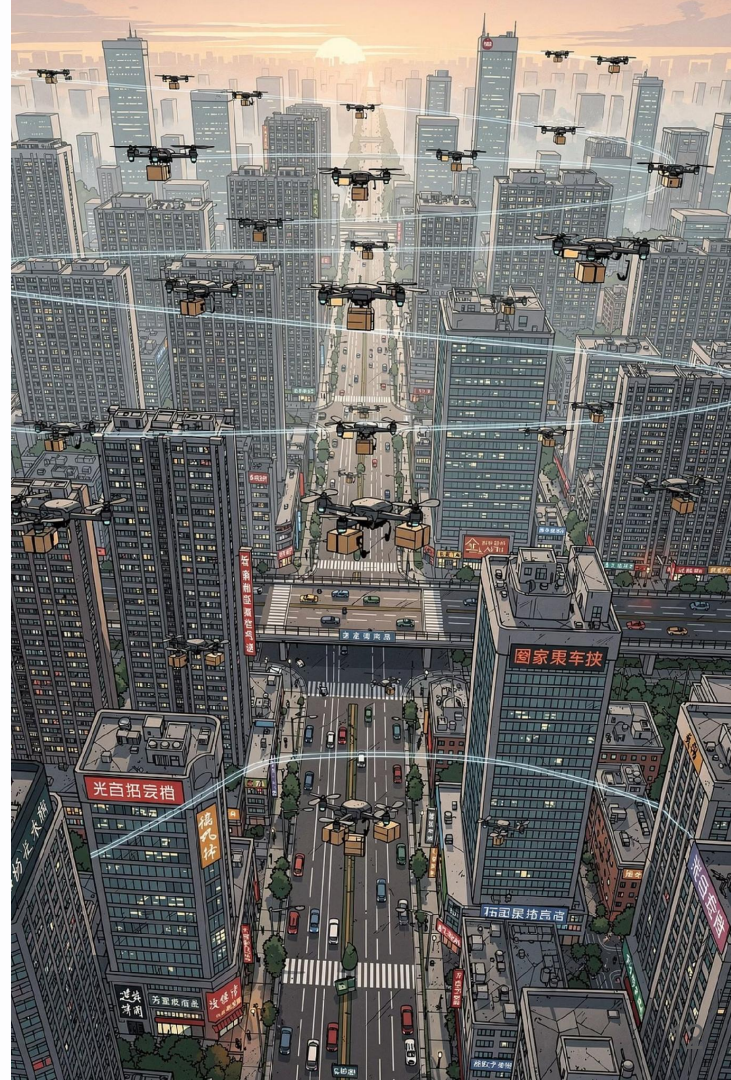
Drone Logistics 2030

CAGR aproximado de 48% — crescimento acelerado impulsionado por entregas last-mile

\$63B+

Mercado Geral UAV

Inclui segmentos militares, inspeção industrial, monitoramento ambiental e emergências



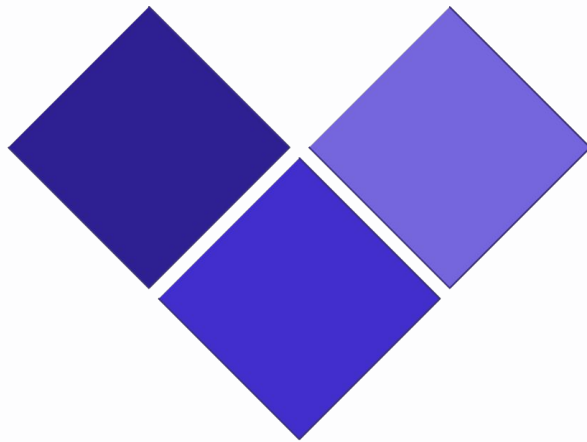
TECNOLOGIAS HABILITADORAS

Conectividade

Sessão PDU ativa e IP alcançável.

Segurança Operacional

Timeliness, continuidade e integridade de comandos.



Lacuna

Falhas em temporalidade, continuidade ou semântica.



Drone FPV: voar pela rede

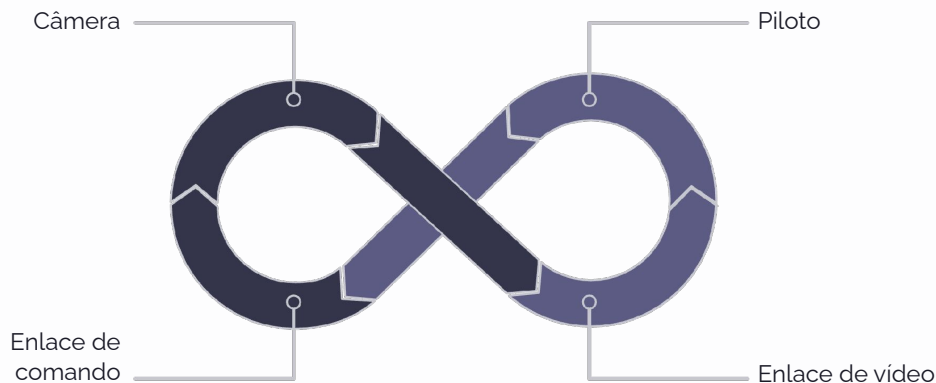
Início da nossa jornada

O ciclo fechado entre máquina, rede e humano

First Person View significa que uma câmera embarcada transmite vídeo continuamente para o piloto. O piloto observa a imagem e envia comandos de volta à aeronave em tempo real.



"Se a rede degrada, a capacidade de pilotagem também degrada."



Um drone possui vários fluxos de comunicação

Não existe um único "link do drone". Existem múltiplos canais lógicos com requisitos distintos.



Três canais lógicos entre drone e estação

C2 — Comando e Controle

- Pitch, Roll, Yaw, Throttle
- Armamento lógico
- Modo de voo
- Failsafe

Telemetria

- Posição e altitude
- Velocidade e bateria
- Estado do sistema
- Qualidade do enlace

Vídeo

- Fluxo contínuo da câmera
- Volume de dados muito maior
- Sensível a latência e perda

Canal de Comando e Controle, C2

Pitch

Inclinação para frente e para trás



Inclina para frente
(move para frente)



Inclina para trás
(move para trás)

Throttle

Potência, subida e descida



Subida



Descida

Roll

Inclinação lateral



Inclina para a esquerda
(move para a esquerda)



Inclina para a direita
(move para a direita)

Yaw

Giro no eixo vertical



Giro no eixo vertical

Armamento lógico

Habilita os motores para voo



SAFE



ARMED

Modo de voo

Define o comportamento da controladora



Stabilized

Estabilização
automática



Acro

Controle
manual total



Altitude Hold

Mantém
a altitude



Position Hold

Mantém
a posição (GPS)

Failsafe

Ação automática em condição de falha



RTH

Retorna ao
ponto de origem



Pouso

Pouso automático
no local



Ação programada

Executa ação
definida pelo usuário

Cada fluxo pede uma rede diferente

O requisito da rede depende da **informação** transportada.

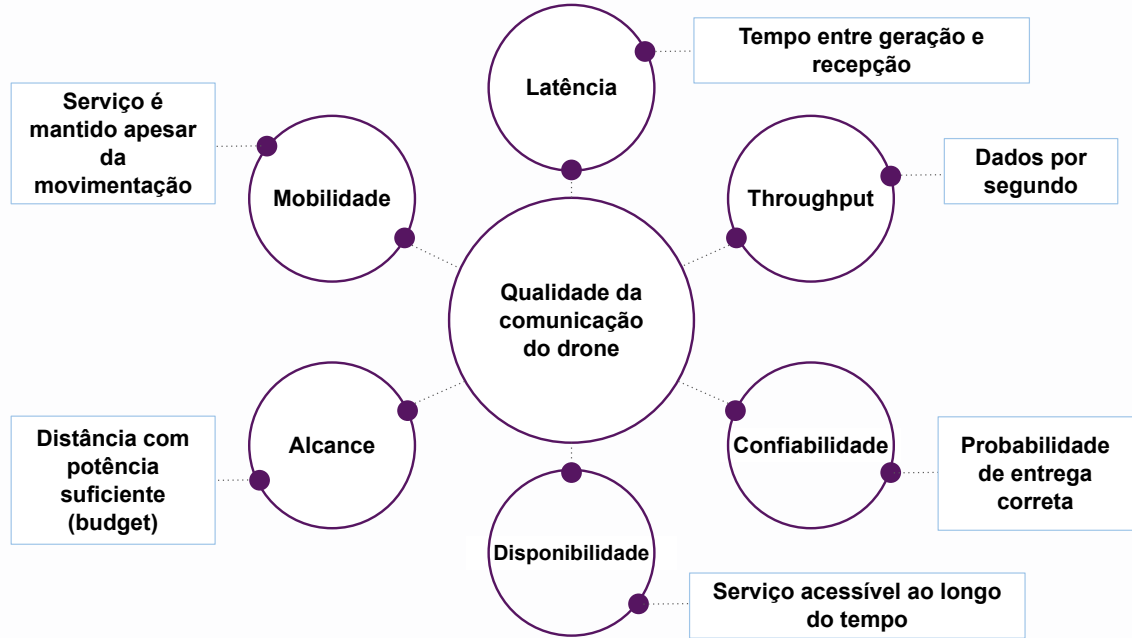
Fluxo	Volume	Latência	Confiabilidade	Consequência da falha
C2	Muito baixo	Muito baixa	Muito alta	Perda de controle / failsafe
Telemetria	Baixo	Baixa a moderada	Alta	Perda de consciência situacional
Vídeo	Alto	Baixa	Tolerância parcial	Perda de percepção visual

Fit por aplicação

FPV Freestyle
Prioriza latência e jitter

Longa distância
Prioriza alcance e disponibilidade

Multi-drone
Prioriza coordenação e confiabilidade

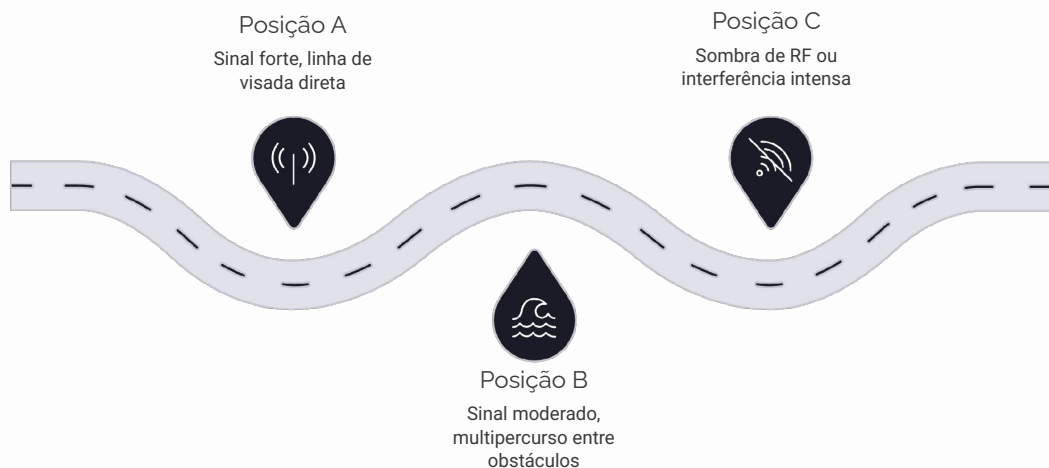




O rádio muda enquanto o drone voa

Um drone cria um canal de rádio altamente dinâmico. **A rede precisa reagir na escala de tempo do movimento da aeronave.**

Trajetoária, sinal e ambiente em constante mudança



Fatores que afetam o canal

- Distância muda rapidamente
- Orientação das antenas varia
- Obstáculos aparecem e desaparecem
- Multipercurso (multipath)
- SNR varia continuamente
- Outros transmissores disputam o espectro
- Regiões de sombra de RF

Onde estão esses sinais no espectro?

900 MHz

Usado em enlaces C2 de maior alcance. Boa propagação e penetração. Menor largura de banda disponível.

2,4 GHz

Muito comum para C2. Compartilha espectro com Wi-Fi, Bluetooth e outros dispositivos ISM.

5,8 GHz

Muito usado para vídeo FPV analógico e digital. Maior largura de banda, porém maior perda de propagação.

 Faixas, potência e condições de operação dependem da regulamentação vigente no Brasil – observar as regras da **ANATEL**.

 Wireless → sem fio
Protocolo sem fio regido pela IEEE 802.11

Interferência: quando vários sistemas querem usar o mesmo meio

SINR

Não intencional

- Wi-Fi e outros drones
- Transmissores FPV vizinhos
- Equipamentos eletrônicos
- Ocupação simultânea de canais

Intencional (Jamming)

- Redução deliberada da SINR
- Objetivo: tornar o enlace inoperável

$$\text{SINR} = \frac{P_{\text{sinal}}}{P_{\text{interferência}} + P_{\text{ruído}}}$$

Quando a SINR diminui, o receptor reduz sua capacidade de recuperar dados. FEC e modulações mais robustas ampliam a região de operação, mas existe um limite abaixo do qual o enlace cessa.

❏ "Criptografia protege dados. Ela não elimina a física do canal de rádio."



Freestyle: a rede como extensão dos reflexos do piloto

Manobras rápidas, mudanças bruscas de orientação e obstáculos próximos. Cada milissegundo conta.

Latência como prioridade dominante

Prioridades do enlace



Latência ultra-baixa

Atraso mínimo entre câmera e óculos do piloto



Jitter baixo

Variação do atraso compromete a percepção do piloto



Resposta previsível

Robustez a mudanças rápidas de orientação das antenas

Trade-off de vídeo

A qualidade absoluta da imagem pode ser sacrificada em favor da **previsibilidade temporal**. Um artefato de compressão é tolerável; um atraso extra não é.



Para FPV freestyle e corrida, alguns milissegundos alteram a percepção e reação do piloto.

Longa distância: muda o problema de engenharia



Novos requisitos dominantes

- Orçamento de enlace (link budget)
- Sensibilidade do receptor
- Direcionalidade das antenas
- FEC (Forward Error Correction)
- Disponibilidade e failsafe
- Propagação e conhecimento de posição

❏ "Longa distância transforma um problema de responsividade em um problema de sobrevivência do enlace."

Se interferência e jamming são problemas centrais, o que acontece quando removemos completamente o enlace RF?

E se removermos o rádio? FPV por fibra óptica

Observado em operações documentadas na guerra da Ucrânia como contraste arquitetural ao enlace de RF.

Drone RF

Operador ~~~~ rádio ~~~~ Drone

- Sujeito a jamming e detecção por emissões EM
- Liberdade total de trajetória
- Baixo peso adicional

Drone com Fibra

Operador — fibra — Drone

- Alta resistência a jamming de RF
- Bobinas documentadas: 10–20 km
- Limitações: peso, trajetória e rompimento

 "Resiliência pode ser obtida mudando completamente o meio físico."

https://en.wikipedia.org/wiki/Fiber_optic_drone



AI Mode

All

Shopping

Images

Videos

News

Short videos

More

Tools

Saves



Military



City



Fpv



Range



Wired



Town



Kamikaze



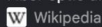
Tree



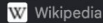
Tethered



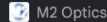
Fiber optic drone - Wikipedia



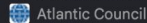
Fiber optic drone - Wikipedia



What is a Tethered Fiber Optic Drone?



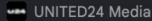
Fiber optic drones could play decisiv...



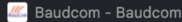
Israel to expand use of fiber-optic



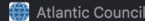
Laser Detection of Fiber-Optic Drone...



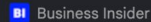
Optical Fiber in Drones: A...



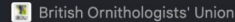
Fiber-optic drones have emerged as...



Unjammable Russian Drones Now...



Fibre Optic Drones - British...



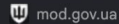
Fiber Optical Cables Manufacturer,...



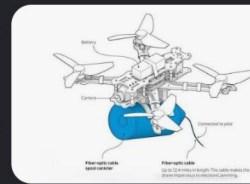
Jam-Proof Fiber Optic Drone Testing...



Hackathon on countering fiber-optic...



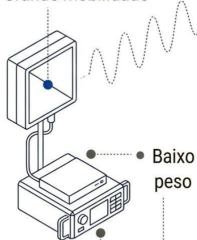
Hezbollah adopts a new weapon:...



O que a fibra nos ensina sobre resiliência?

RÁDIO CONVENCIONAL

- Grande mobilidade

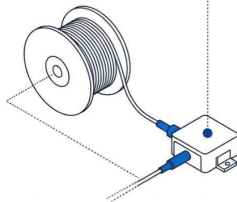


- Baixo peso

- Sujeito a interferência
- Detectável no espectro
- Escalável

FIBRA ÓPTICA

- Canal dedicado
- Alta resistência a RF
- Baixa emissão EM



- Baixa emissão EM
- Alcance limitado pelo cabo
- Peso e restrição mecânica
- Falha física encerra enlace

Adaptação para a aplicação e prós e cons da decisão tecnológica.

Wireless

Vulnerabilidade ao espectro

Fibra

Vulnerabilidade física



De um drone para centenas

Escala transforma comunicação em coordenação. Um drone exige comunicação, posicionamento e controle. Centenas acrescentam sincronização e gestão de falhas distribuída.

Drone show é realmente um swarm?

Drone Show Comercial

- Trajetórias pré-calculadas
- Coreografia criada antes do voo
- Posições atribuídas individualmente
- Relógio comum compartilhado
- Monitoramento e contingência centralizados

Swarm Autônomo

- Decisões dependem dos vizinhos
- Comportamento emergente durante o voo
- Inteligência coletiva distribuída
- Sem coreografia pré-definida

❏ "Vários drones coordenados não implicam necessariamente inteligência de enxame."

GNSS: *Global Navigation Satellite Systems*



❑ "GNSS fornece uma referência global comum de posição e tempo."

GPS

GLONASS

Galileo

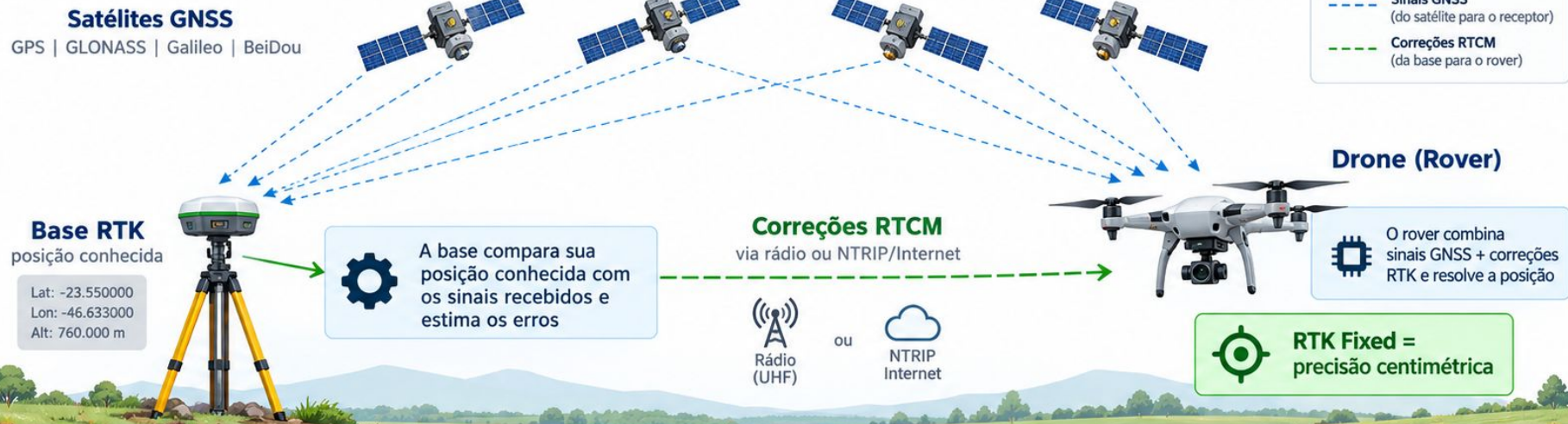
BeiDou

Constelações disponíveis

GNSS convencional apresenta erros da ordem de **metros** — suficiente para drones isolados, insuficiente para formações densas ou pousos precisos.

Como funciona o RTK

Posicionamento GNSS com precisão centimétrica



Níveis de posicionamento

GNSS comum
precisão de metros



~ 3 – 10 metros

RTK Float
precisão intermediária



~ 0,2 – 1 metro

RTK Fixed
precisão centimétrica



~ 1 – 3 centímetros

Elementos do RTK

- Base**
Estação em posição conhecida
- Rover**
Receptor móvel (drone)
- Correções**
Mensagens RTCM (rádio ou NTRIP)
- Fase da portadora**
Medições de fase do sinal GNSS
- Resolução das ambiguidades inteiras**
Determina a posição precisa (RTK Fixed)

Aplicações

- Drone show**
Posicionamento preciso e sincronizado
- Mapeamento**
Levantamentos de alta precisão
- Agricultura**
Guiamento e aplicação precisa
- Inspeção**
Monitoramento de estruturas e ativos

RTK: da escala de metros para centímetros

Real-Time Kinematic



Como funciona

- Estação base conhece sua posição com precisão
- Estima erros nos sinais GNSS recebidos
- Correções são enviadas em tempo real ao receptor móvel
- Receptor usa observações de **fase da portadora**

Resultado

Sistemas comerciais RTK especificam aproximadamente **~1 cm** + componente proporcional à distância. RTK aprimora o GNSS.

Posição precisa ainda não significa sincronização

Posicionamento

Onde o drone está?

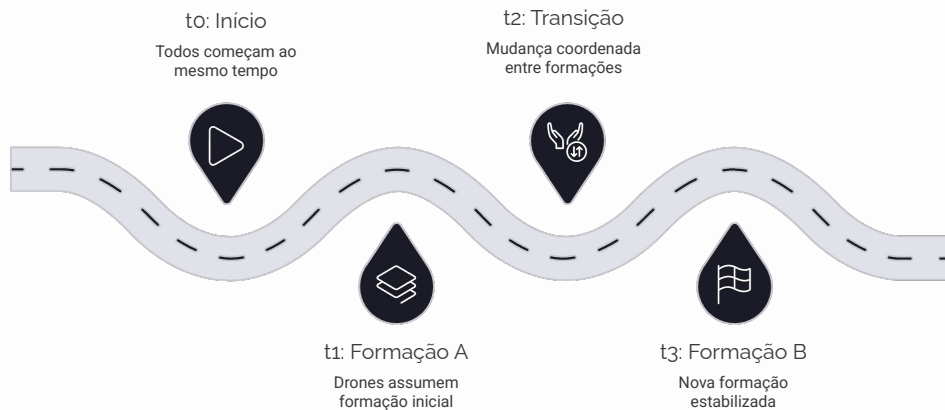
Tempo

Que horas são para todos os drones?

Coordenação

O que executar naquele instante?

GNSS também fornece referência de tempo de alta precisão — base para sincronização de formações.



📌 "Uma formação correta exige espaço e tempo."

Quando GNSS falha

Tipos de ameaça e falha

→ Bloqueio físico

Obstáculos, multipercurso, geometria desfavorável dos satélites

→ Jamming

Receptor perde capacidade de receber sinais legítimos

→ Spoofing

Receptor recebe sinais falsos — induz posição ou tempo incorretos

"O que acontece quando 500 drones compartilham a mesma referência errada?"

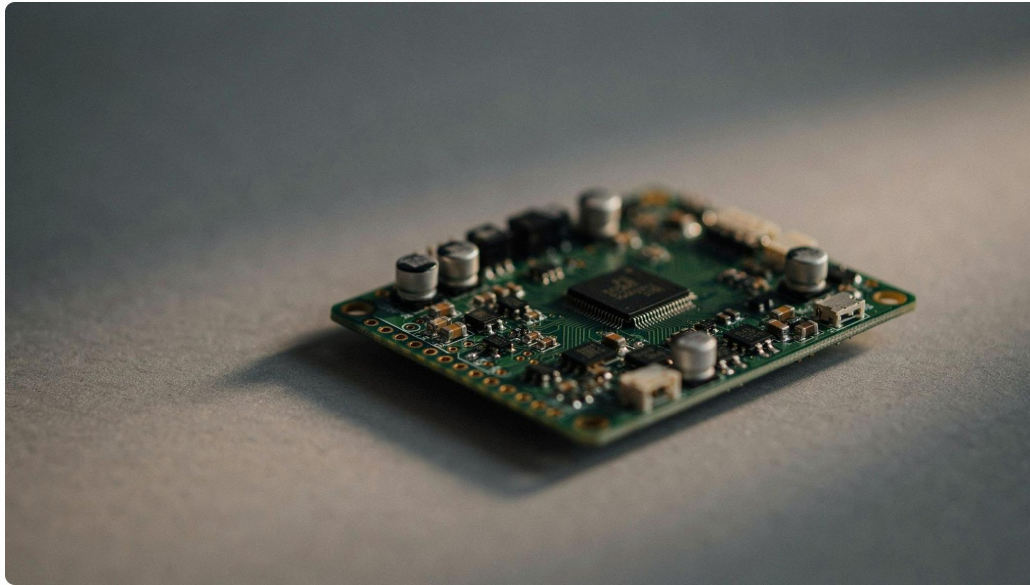
Dependência de uma referência comum cria **modos de falha comuns**. Uma perturbação na fonte pode afetar toda a formação simultaneamente.

⊗ "Dependência comum cria modos de falha comuns."

SAFE FIRST

SEGURANÇA EM PRIMEIRO LUGAR

A ilusão da redundância distribuída



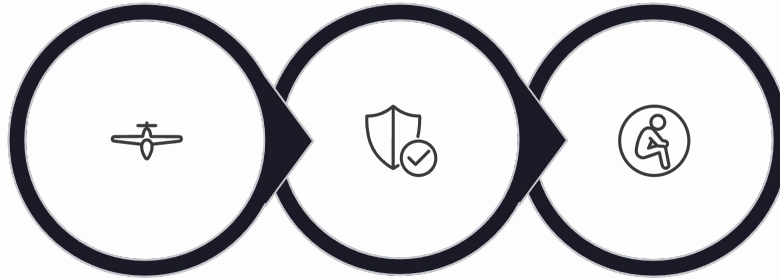
O sistema do drone show é aparentemente robusto sistema é robusto.

Porém, **centenas de drones podem depender simultaneamente** dos mesmos serviços de posicionamento, comunicação, sincronização e planejamento.

- ❏ Uma falha em uma dependência compartilhada pode afetar grande parte da frota ao mesmo tempo.

Falha Individual vs. Falha Compartilhada

Falha Individual



Motor falha

Failsafe
ativado

Efeito isolado

O impacto permanece contido. O restante da frota opera normalmente.

Falha Compartilhada



Uma única falha se propaga por toda a frota simultaneamente.

Dependências Compartilhadas em Drone Shows



GNSS / RTK

Posicionamento global e relativo. Degradação afeta toda a frota simultaneamente.



Ambiente RF

Interferência ou saturação do espectro compromete comunicação de todas as aeronaves.



Sincronização

Falha no sinal de tempo ou na rede de controle afeta a coordenação coletiva.



Software de Planejamento

Erro no plano de voo carregado pode afetar centenas de trajetórias ao mesmo tempo.

Todas essas dependências são **compartilhadas** — a falha de qualquer uma delas tem escala de frota.

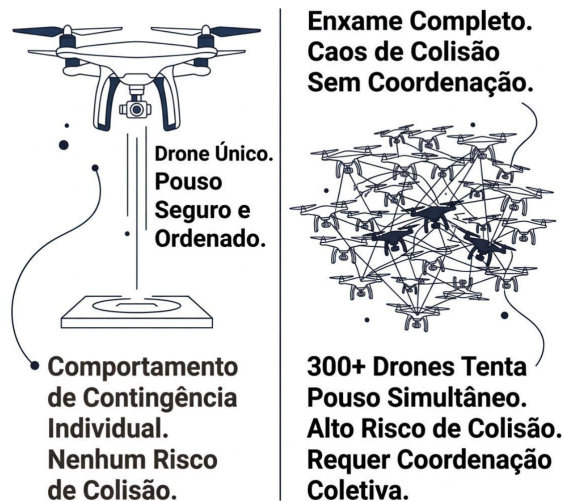
Common Mode Failure

Uma dependência compartilhada pode transformar uma falha técnica pontual em um evento sistêmico que afeta centenas de aeronaves.

O termo **common mode failure** descreve exatamente esse fenômeno: quando um único ponto de falha se propaga por toda uma frota que compartilha a mesma dependência crítica.



O Paradoxo do Failsafe



O que é seguro para um pode ser perigoso para muitos

O **failsafe individual** foi projetado para uma aeronave isolada. Quando centenas executam a mesma ação de contingência ao mesmo tempo, o comportamento coletivo pode gerar novos riscos.

1 drone → LAND

Contingência segura e controlada.

300 drones → LAND simultâneo

Requer coordenação coletiva. Sem ela, risco de colisão e sobrecarga do espaço aéreo localizado.

Casos Reais: Quando a Teoria Vira Incidente

1

[Orlando, EUA — 2024](#)

Múltiplos drones colidiram e caíram durante um show público. Uma criança foi gravemente ferida. O incidente evidenciou ausência de mecanismos de separação coletiva em cenários de falha simultânea.

2

[Sydney, Austrália — 2026](#)

83 drones de uma apresentação com aproximadamente 1.000 aeronaves caíram na água após degradação de posicionamento associada a mudanças no ambiente de radiofrequência — uma falha de modo comum clássica.

3

[Londres, Reino Unido — 2026](#)

Durante ensaio de drone show, degradação de posicionamento foi seguida por perda de controle e colisões entre aeronaves. O ambiente RF alterado afetou a frota de forma correlacionada.

Padrão Comum nos Três Incidentes



- Falha independente
Impacto localizado, contido pelo failsafe individual.
- Falha correlacionada
Múltiplas aeronaves afetadas de forma simultânea e não planejada.
- Common mode failure
Uma dependência comum compromete o sistema como um todo.

Síntese: Escala da Falha e Seu Impacto



Falha Independente

Motor ou componente. Impacto em 1 aeronave. Failsafe individual eficaz.



Falha Correlacionada

Dependência parcialmente compartilhada. Subconjunto da frota afetado simultaneamente.



Common Mode Failure

Dependência crítica compartilhada por toda a frota. Evento sistêmico. Failsafes individuais podem amplificar o risco.

A Pergunta que Todo Projeto de Safety Precisa Responder

"Como projetar o failsafe de uma aeronave quando centenas delas podem falhar simultaneamente?"

Identificar dependências compartilhadas

Mapear todos os serviços comuns à frota: GNSS, RF, sincronização e software.

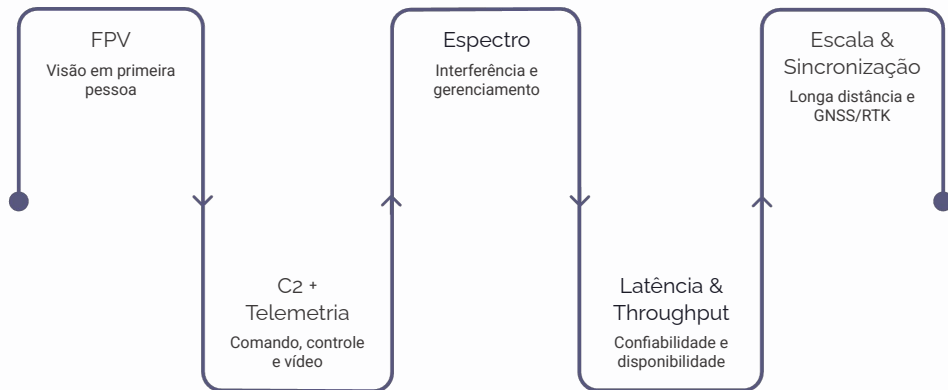
Projetar failsafes coletivos

O comportamento de contingência deve considerar a ação simultânea de centenas de aeronaves.

Testar cenários sistêmicos

Simular falhas de modo comum, não apenas falhas individuais, antes de cada operação.

Da comunicação à infraestrutura crítica



O problema deixa de ser "como enviar bits para um drone" e passa a envolver:

- Comunicação
- Posicionamento
- Tempo e sincronização
- Mobilidade
- Segurança (security e safety)
- Coordenação em escala

📄 **Próximo módulo:** UTM · InterUSS · Remote ID · DRIP · MAVLink — Como coordenar aeronaves que compartilham o mesmo espaço aéreo?



Do Enlace ao Espaço Aéreo

Um passo a mais na nossa jornada



"Escala transforma comunicação em coordenação."

Fasten your seatbelts!

INICIALMENTE

Drone ↔ Piloto ou estação de controle

Um enlace. Um operador. Uma operação.

AGORA

Múltiplos drones · Múltiplos operadores · Múltiplos provedores · Autoridade do espaço aéreo

Quem voa? Onde? Quando? Com qual prioridade? Existem conflitos?

Perguntas que precisam de resposta

Quem pretende voar?

Identificação prévia dos operadores e aeronaves

Onde e quando?

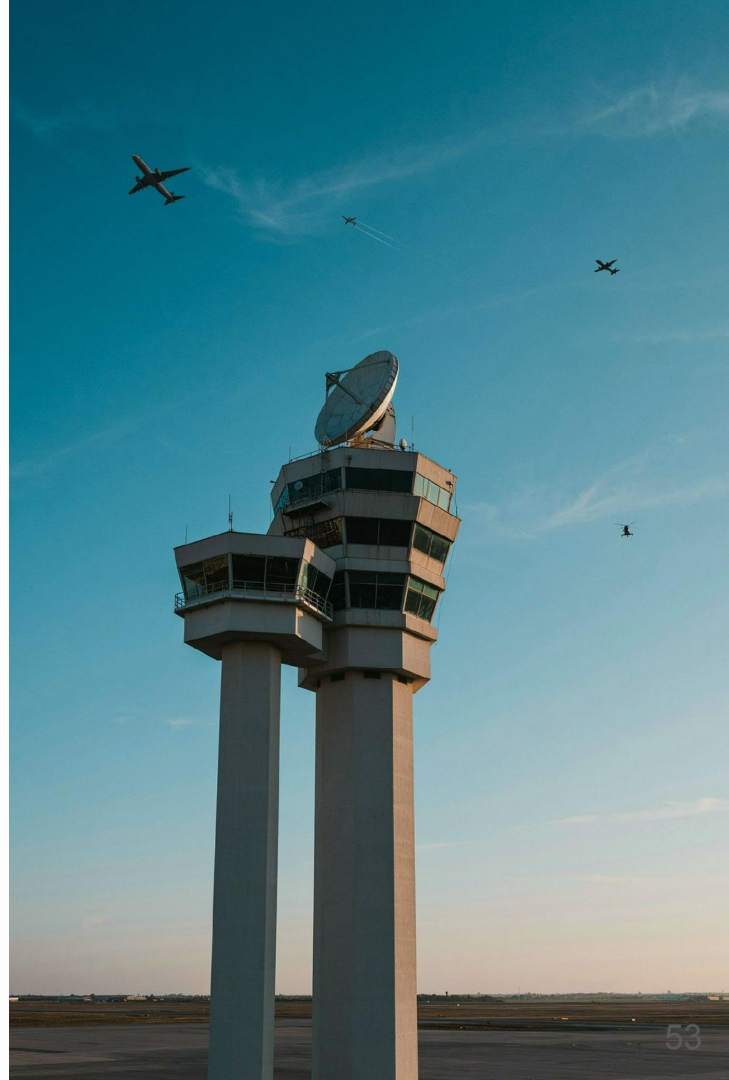
Região espacial e janela temporal de cada operação

Quem tem prioridade?

Resolução de conflitos entre operações simultâneas

Como todos coordenam?

Informação consistente entre todos os participantes



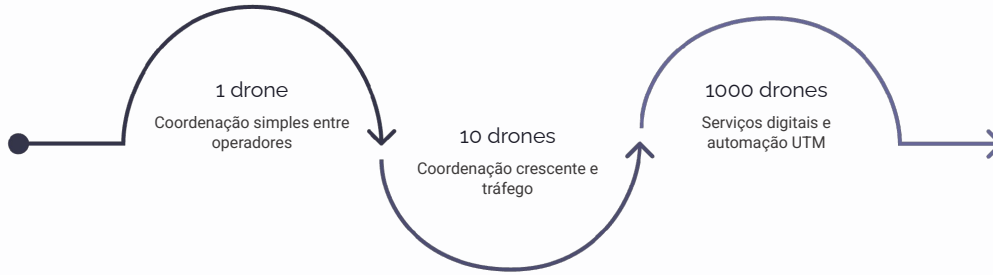
Uma visão sistêmica do ecossistema UAS

"Um UAS conectado é um sistema de sistemas."



Por que precisamos de UTM?

UAS TRAFFIC MANAGEMENT



O desafio em escala

- Operações simultâneas e BVLOS
- Rotas que se cruzam
- Restrições temporárias de espaço aéreo
- Mudanças meteorológicas
- Diferentes operadores e provedores

❑ **UTM é uma infraestrutura digital para coordenar operações de UAS em escala.**

UTM não funciona como o controle aéreo tradicional

ATM Tradicional

Piloto ↔ Controlador

- Comunicação humana tem papel central
- Coordenação apoiada em serviços de controle presenciais
- Procedimentos estabelecidos há décadas

UTM

Operador ↔ Serviço digital ↔ Autoridade

- APIs e automação
- Compartilhamento de dados entre sistemas
- Coordenação entre domínios interoperáveis

UTM transfere a coordenação para serviços digitais interoperáveis.

Quem participa do UTM?



UAS Operator

Define missão, trajetória e parâmetros operacionais. Responsável pela operação.



UAS

A aeronave executando a missão.



USS

UAS Service Supplier — fornece serviços ao operador e troca informações com outros USS.



Autoridade / ANAC

Fornece regras, restrições e informações sobre o espaço aéreo.

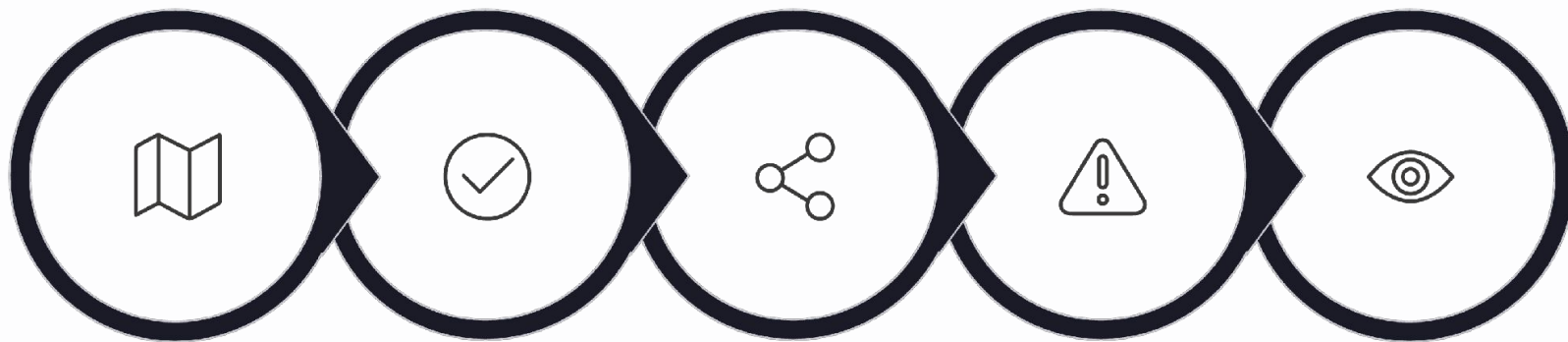


SDSP

Supplemental Data Service Provider — meteorologia, terreno, obstáculos e dados geográficos.

Que serviços um UTM precisa oferecer?

UTM acompanha o **ciclo de vida completo** da operação.



Planejamento

Autorização

Compartilhar

Detecção

Monitoramento

Intenção Operacional

Antes de coordenar aeronaves, precisamos representar **onde e quando** cada operação pretende ocorrer.

Volume 3D

Latitude · Longitude · Altitude

+ Tempo

Janela de início e fim da
operação

= Volume 4D

A unidade básica de intenção operacional em UTM



"Conflito em UTM é uma questão de espaço e tempo."

Deconfliction

EVITAR CONFLITOS ANTES QUE ELES ACONTEÇAM

Strategic Deconfliction

Durante o planejamento

As intenções operacionais são compatíveis? Ajuste de tempo, altitude ou trajetória antes do voo.

Tactical Conflict Management

Durante a operação

Existe risco imediato que exige reação? Resposta em tempo real ao desvio de rota ou conflito emergente.

"Uma pequena mudança antes do voo pode evitar uma reação crítica durante o voo."

InterUSS

LINUX FOUNDATION · OPEN SOURCE

O Problema

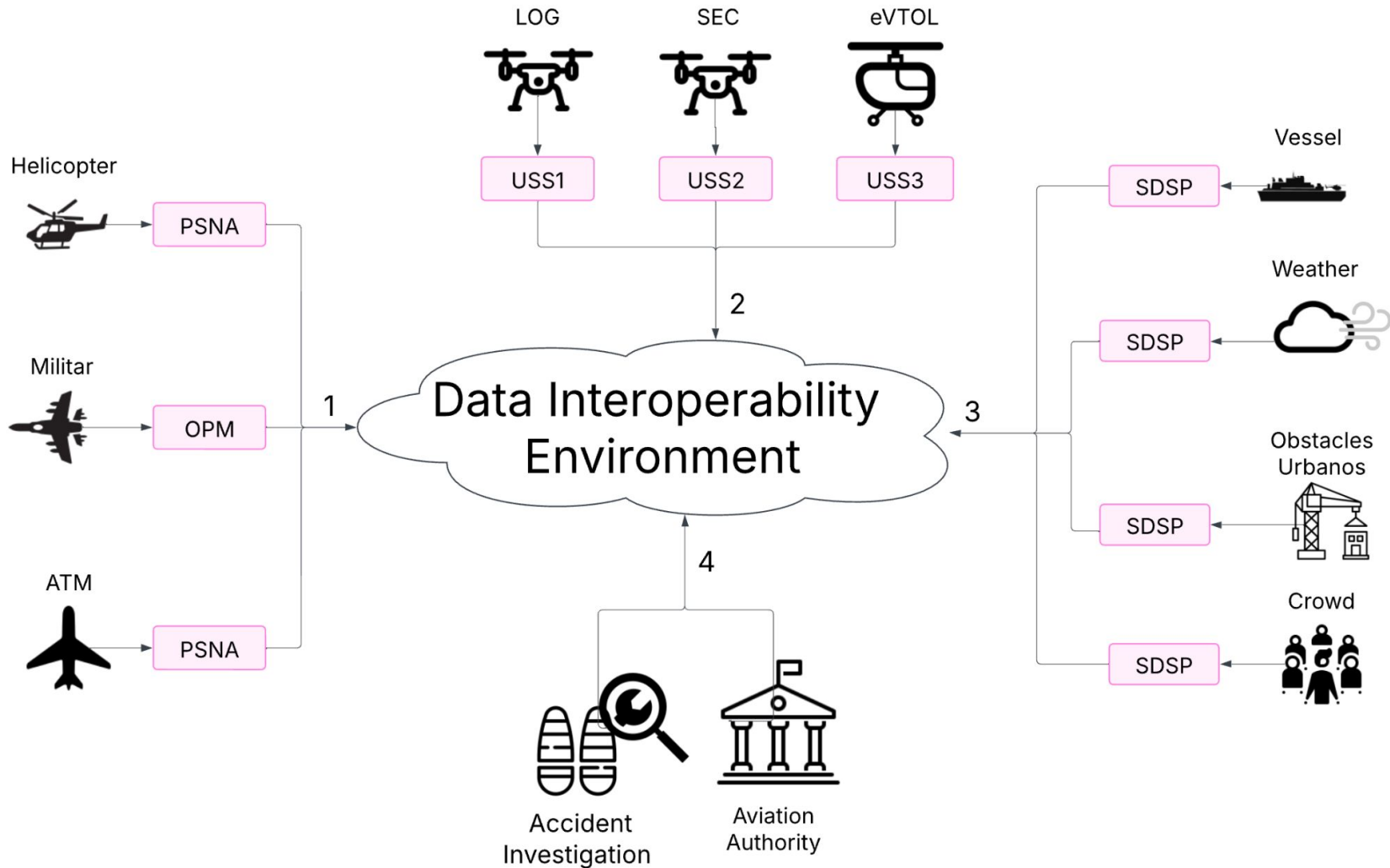
Operador A usa USS A. Operador B usa USS B. Os dois provedores precisam trocar informações sobre operações no mesmo espaço aéreo.

A Solução

InterUSS fornece componentes e ferramentas **open source** para viabilizar a interoperabilidade entre sistemas UTM e U-Space.

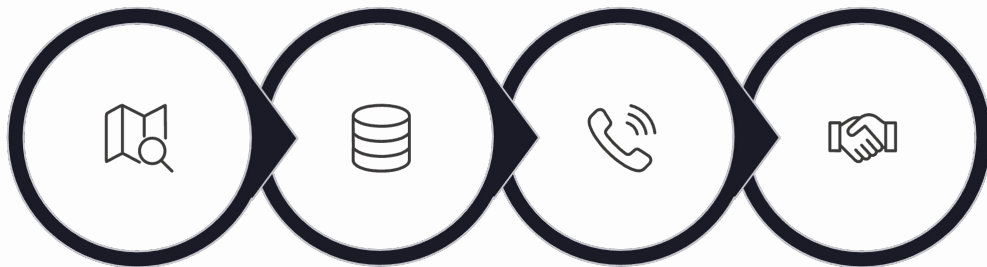


"UTM não exige que todos utilizem o mesmo provedor."



O componente central: DSS

DISCOVERY AND SYNCHRONIZATION SERVICE



Consulta 4D

DSS informa

Contato
direto

Coordenação

Como funciona

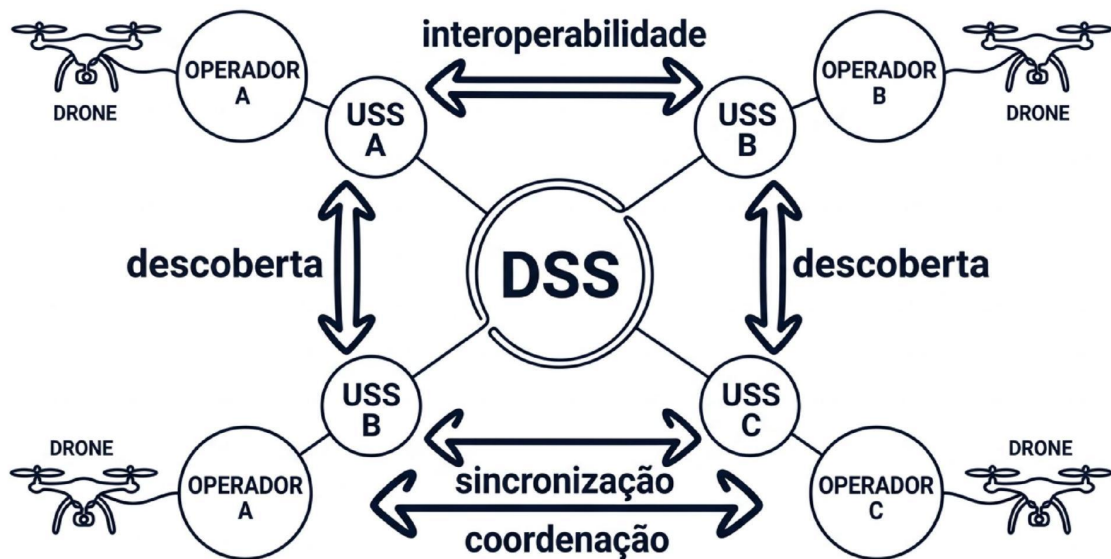
O DSS **não armazena os detalhes completos** das operações. Ele atua como mecanismo de descoberta: indica quais USS possuem informação relevante em uma região 4D.

A coordenação detalhada ocorre diretamente entre os USS.

❏ **"O DSS ajuda os participantes a descobrir com quem precisam conversar."**

UTM Distribuído

Cada operador pode utilizar um provedor diferente. A arquitetura suporta um ecossistema com múltiplas organizações competindo e colaborando.



❑ "Escalabilidade depende de interoperabilidade entre domínios administrativos."

Mas como identificar um drone que está voando?

Remote ID funciona como uma **placa digital transmitida pela aeronave** — continuamente, para qualquer receptor próximo.

Identificador

Quem afirma ser a aeronave

Posição e Altitude

Onde a aeronave declara estar

Velocidade e Tempo

Estado cinético e timestamp

Ponto de controle

Estação de controle ou ponto de decolagem



Remote ID usa comunicação local broadcast



Características do broadcast

- Não requer sessão com cada observador
- Qualquer receptor no alcance pode receber
- A aeronave é a fonte da informação
- Sem dependência de infraestrutura de rede

"Remote ID transforma a aeronave em uma fonte local de informação sobre sua própria operação."

Remote ID e UTM resolvem problemas diferentes

Remote ID

"Quem está voando aqui agora?"

- Broadcast local
- Identificação e posição observada
- Consciência situacional local

UTM

"Quem pretende operar neste espaço aéreo?"

- Serviços em rede
- Planejamento e intenção operacional
- Deconfliction e monitoramento

📄 **Remote ID + UTM → correlação entre operação planejada e aeronave observada.** Identidade observada e intenção operacional são informações complementares.

Existe um problema de confiança

O receptor recebe:

"Eu sou o Drone 123"

Mas também pode receber de um transmissor malicioso:

"Eu sou o Drone 123"

O observador recebe **duas alegações indistinguíveis**.

A distinção fundamental

Identificação

Alguém afirma uma
identidade

Autenticação

Existe evidência
verificável dessa
afirmação



"Identificação e autenticação são propriedades diferentes."

DRIP

DRONE REMOTE IDENTIFICATION PROTOCOL · IETF

DRIP é uma arquitetura desenvolvida no IETF para acrescentar **mecanismos de confiança criptográfica** ao ecossistema de Remote ID.

Objetivos do DRIP

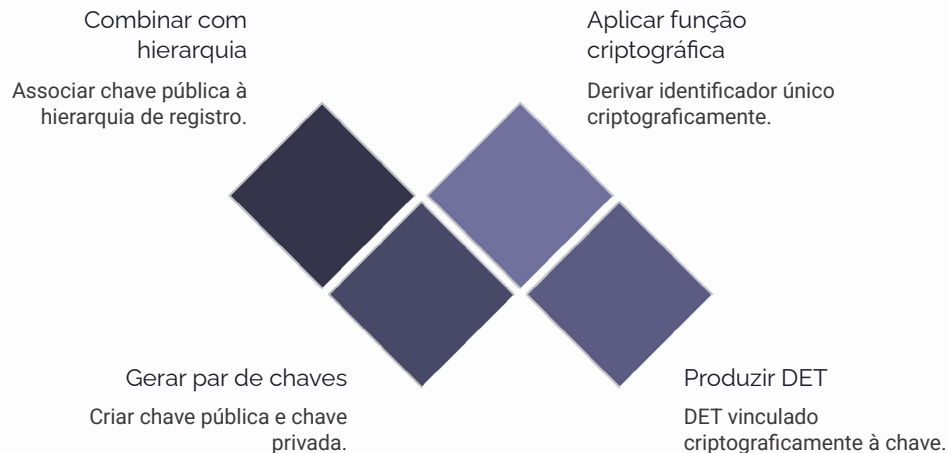
- Identificadores confiáveis e registrados
- Vinculação entre identidade e chave criptográfica
- Autenticação das mensagens transmitidas
- Verificação por observadores

📄 **"DRIP acrescenta uma camada de confiança criptográfica à identificação remota."**

→ Remote ID simples
"Eu sou X"

→ Remote ID com DRIP
"Eu sou X **e posso fornecer evidência criptográfica** associada a X"

DRIP Entity Tag (DET)



O que é o DET

O DET é a **identidade DRIP do drone** — criptograficamente derivada de sua chave pública e associada a uma hierarquia administrativa de registro.

- Chave privada: mantida pelo detentor, usada para assinar
- Chave pública: usada para verificação por qualquer observador
- Hierarquia: permite descobrir o domínio responsável



"Identidade e chave criptográfica passam a estar vinculadas."

Da identidade à confiança



"DRIP permite avaliar criptograficamente a origem das mensagens recebidas."



A Internet aparece novamente

DRIP reutiliza ideias e infraestrutura que já existem na Internet para resolver identidade em escala global.

Identificadores
criptográficos

Derivados de chaves — não
atribuídos arbitrariamente

DNS e DNSSEC

Hierarquia de registro e
descoberta de chaves públicas

Assinaturas digitais

Verificação de autenticidade e integridade de mensagens



"Identificar drones em escala global aproxima o problema dos mecanismos de identidade distribuída da Internet."

Nenhum sistema é completamente seguro

O que a assinatura garante

Autenticidade

A mensagem foi produzida pelo detentor da chave privada associada àquela identidade.

Integridade

O conteúdo não foi alterado em trânsito.

O que a assinatura não garante

Correção semântica

- Que o sensor GNSS está correto
- Que a posição não foi manipulada antes da assinatura
- Que a aeronave física corresponde ao que o observador interpreta



Criptografia estabelece confiança sobre origem e integridade. A validação do estado físico exige outras evidências.

MAVLink

A LINGUAGEM COMUM ENTRE COMPONENTES DO UAS

MAVLink é um protocolo binário **leve e eficiente**, projetado para enlaces com recursos e largura de banda limitados. Conecta os componentes internos do sistema UAS.

Ground Control Station

Interface do operador com a missão

Autopilot

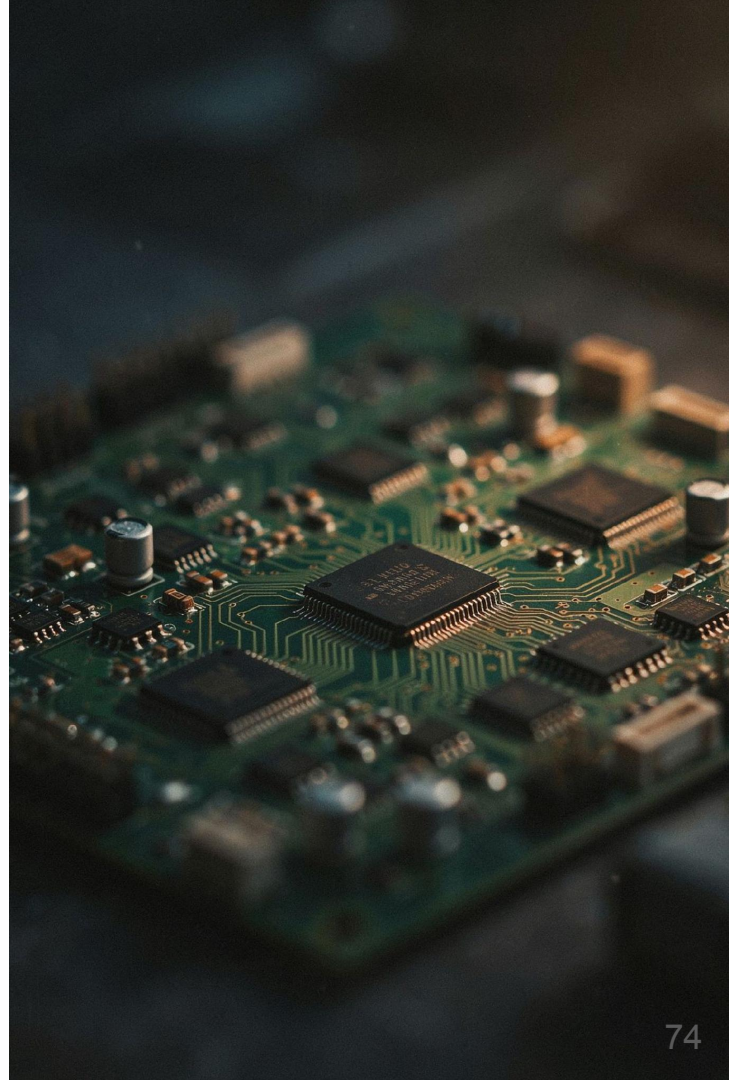
Controle de voo e navegação

Companion Computer

Processamento embarcado adicional

Payload / Câmeras

Sensores e outros componentes



O que trafega em MAVLink?



Estado

Posição · Velocidade · Atitude · Bateria · GPS



Comandos

Armar · Desarmar · Mudança de modo · Comandos de missão



Missão

Waypoints · Trajetória · Parâmetros operacionais

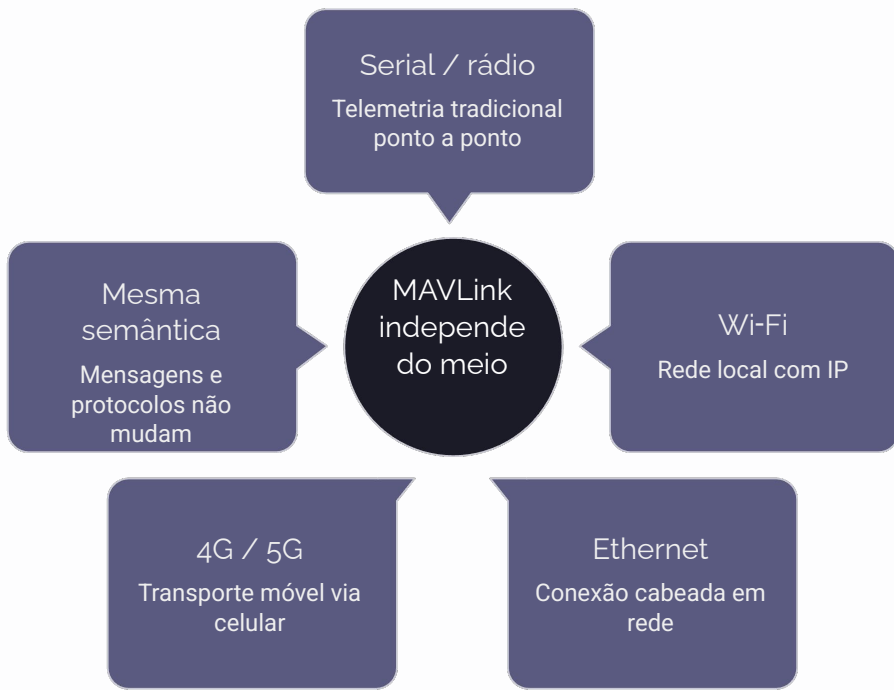


Telemetria

Estado dos sensores · Qualidade do sistema · Eventos

"MAVLink transporta a semântica operacional entre componentes do sistema."

MAVLink é independente do meio físico



Separação de camadas

MAVLink define **mensagens e protocolos de aplicação**. O meio de comunicação pode mudar sem alterar a semântica.

MAVLink pode existir sobre um rádio dedicado ou sobre uma rede IP — a lógica da aplicação permanece a mesma.

❏ **"Protocolo da aeronave e tecnologia de conectividade ocupam camadas diferentes."**

E a segurança do MAVLink?

MAVLink 2: Message Signing

- Verifica se mensagens foram produzidas por fonte que conhece a chave compartilhada
- Fornece autenticação de origem e integridade
- Proteção temporal contra reutilização de mensagens antigas

Não fornece confidencialidade ao conteúdo.

Confidencialidade: outra camada

Quando necessária, a confidencialidade deve ser provida pelo **transporte** ou por mecanismo adicional:

- TLS sobre a sessão de dados
- VPN no enlace de comunicação
- Proteção nativa do 5G (user plane encryption)



"Autenticação do protocolo e proteção do transporte são problemas complementares."

Organizando as camadas

Camada 5: Aplicações (Entrega, Inspeção, Agricultura, Segurança Pública, Logística, AAM) — para que voamos?

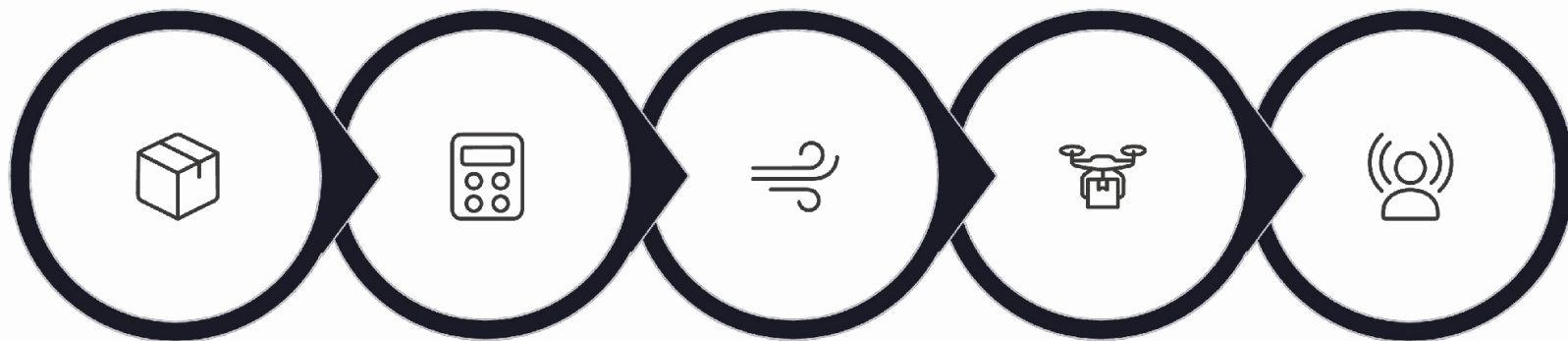
Camada 4: Gerenciamento do Espaço Aéreo (UTM, InterUSS, USS) — como coordenamos operações?

Camada 3: Identidade e Confiança (Remote ID, DRIP) — quem está voando e como confiamos?

Camada 2: Controle e Telemetria (MAVLink) — como os componentes trocam informações?

Camada 1: Conectividade (RF, Wi-Fi, 4G, 5G, Satélite) — como transportamos os bits?

Um pacote de entrega ilustra todas as camadas



Pedido

Cálculo de
missão

Coordenação
UTM

Decolagem

Remote ID

❏ **"Uma operação comercial conecta aplicação, espaço aéreo, identidade, aeronave e rede."**



Por que isso tem valor comercial?

Operação artesanal

1 piloto → 1 drone → 1 missão → 1 área pequena

Coordenação manual. Escala limitada pelo esforço humano.

Operação em escala

Plataforma → múltiplas missões → múltiplos drones → múltiplas regiões

- Supervisor único para várias operações BVLOS
- Rotas compartilhadas e frota com alta utilização
- Integração com sistemas de logística e automação



"O ganho econômico aparece quando a operação pode ser automatizada e escalada."

Caso de uso: Entrega



Requisitos técnicos

- BVLOS com planejamento de rota
- Controle de acesso ao espaço aéreo e desconfito
- Localização precisa e monitoramento contínuo
- Conectividade ao longo de toda a rota
- Procedimento de contingência automatizado

Integração: **UTM + rede + plataforma logística**

❏ **"Entrega por drones é principalmente um problema de escala operacional."**

Caso de uso: Inspeção de Infraestrutura



Aplicações

- Linhas de transmissão e torres de telecomunicações
- Rodovias, ferrovias e pontes
- Oleodutos e gasodutos

Requisitos

- BVLOS com vídeo de alta resolução
- Cobertura em regiões remotas
- Edge computing para análise em campo



"A missão pode se estender muito além do alcance de um enlace ponto a ponto."

Caso de uso: Agricultura



Aplicações

- Monitoramento de culturas e imagem multiespectral
- Pulverização de precisão e mapeamento
- Estimativa de produtividade e detecção de falhas

Características

- Grandes áreas com baixa densidade populacional
- Missões repetitivas com grande volume de dados de sensores
- Processamento na borda ou posterior (offline)

❏ **"Nem toda aplicação exige a mesma combinação de latência, throughput e cobertura."**

Caso de uso: Segurança Pública



Aplicações

- Busca e salvamento, monitoramento de incêndios
- Drone como primeiro respondente (DFR)
- Monitoramento de acidentes e áreas de risco

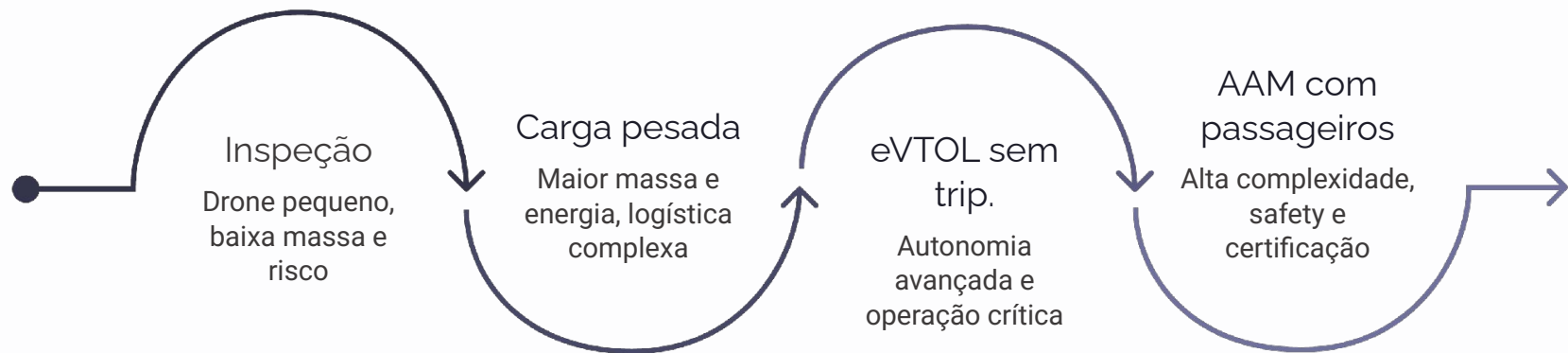
Requisitos críticos

- Baixa latência · Alta disponibilidade · Prioridade de rede
- Compartilhamento de consciência situacional
- Implantação rápida e coordenação com outras aeronaves



Uma rede comercial congestionada deveria tratar esse drone como qualquer outro usuário? → **Tecnologia habilitadora.**

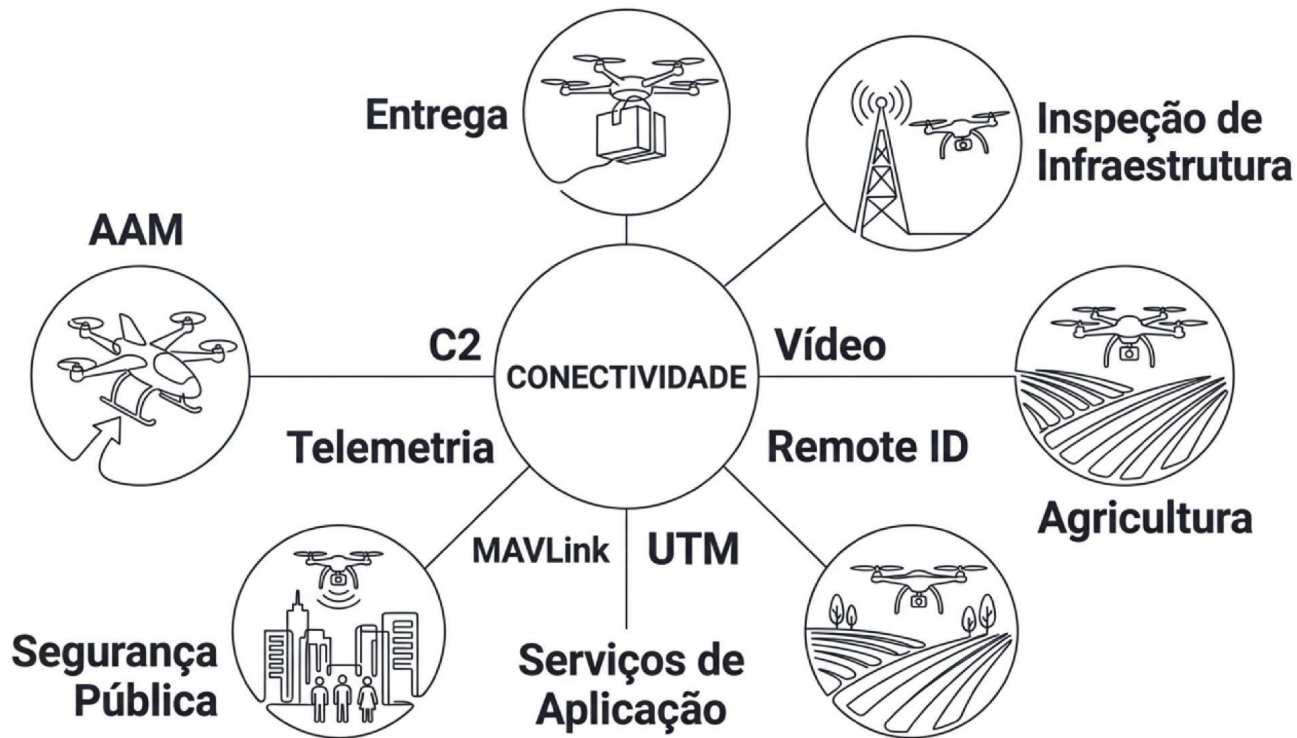
Caso de uso: Advanced Air Mobility



À medida que a escala aumenta, a infraestrutura passa a exigir níveis maiores de **confiabilidade, disponibilidade, safety e certificação**.

❑ "A rede deixa progressivamente de ser conveniência e passa a integrar a infraestrutura operacional."

Todos esses casos compartilham uma dependência



❏ "Qual rede consegue oferecer conectividade contínua, segura, móvel e diferenciada para todos esses fluxos?"



Estamos voando em cruzeiro

Enlace dedicado resolve um drone. Infraestrutura de rede resolve escala — mas traz novos desafios.

Mobilidade

Como manter conectividade e fazer handover entre células?

Diferenciação

Como separar C2 de vídeo e aplicar prioridade?

Segurança

Como autenticar dispositivos e reagir a ataques?

Safety-aware

Como considerar safety no escalonamento de recursos de rede?



Isso nos leva
às redes
móveis.

TECNOLOGIAS HABILITADORAS

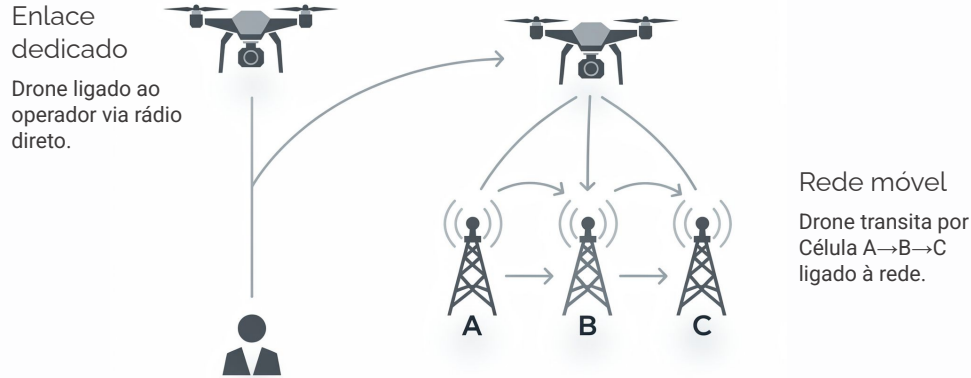


Redes de transmissão de dados para drones

MÓDULO 3

Redes móveis, resiliência e segurança

Do enlace para a infraestrutura



Enlace dedicado

Alcance e disponibilidade dependem diretamente daquele caminho de rádio. Se o enlace degrada, a comunicação degrada.

Rede móvel

Diferentes células, funções de rede e aplicações cooperam para manter o serviço ao longo do movimento.

❏ **Do link budget para a continuidade de serviço.**

Onde o enlace ponto a ponto encontra seus limites?

Cobertura

A distância cresce e a margem do enlace diminui.

Mobilidade

Transmissor e receptor permanecem associados ao mesmo enlace físico.

Escala

Cada nova aeronave exige mais espectro e coordenação manual.

QoS

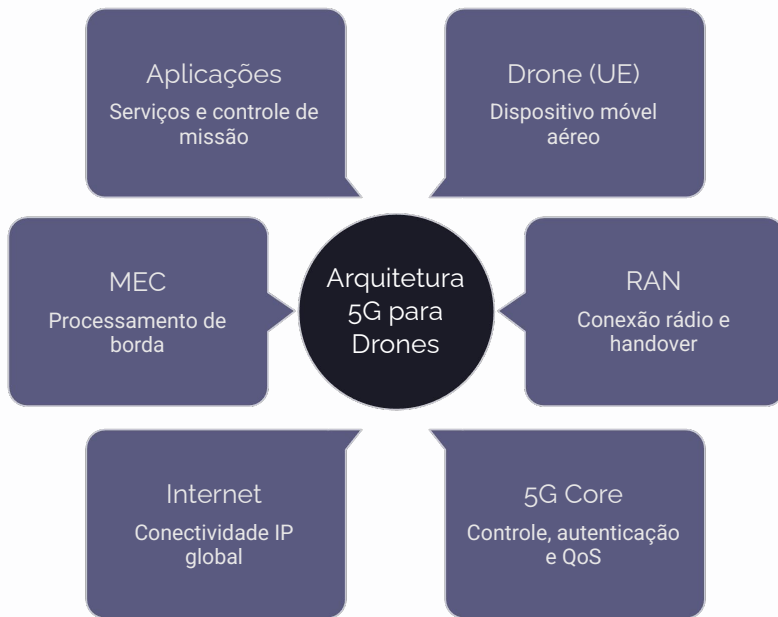
Fluxos diferentes recebem tratamento limitado em sistemas proprietários.

Infraestrutura

Edge computing e integração com serviços externos exigem conectividade adicional.

Escalar operações exige transformar enlaces em uma infraestrutura de comunicação.

Por que redes móveis para drones?



Cobertura e mobilidade

Múltiplas células, handover automático e autenticação padronizada.



QoS e gerenciamento

Tratamento diferenciado por fluxo, observabilidade e controle centralizado.



Edge e integração IP

MEC, redes privadas e integração com aplicações distribuídas.



3GPP possui especificações dedicadas a conectividade, identificação e rastreamento de UAS.

Private 5G

Non Public Network

Uma empresa ou organização opera uma rede 5G destinada a um conjunto específico de usuários e aplicações — com políticas, controle e identidade próprios.



Fábrica



Aeroporto



Porto



Universidade



Mina



Área de drones

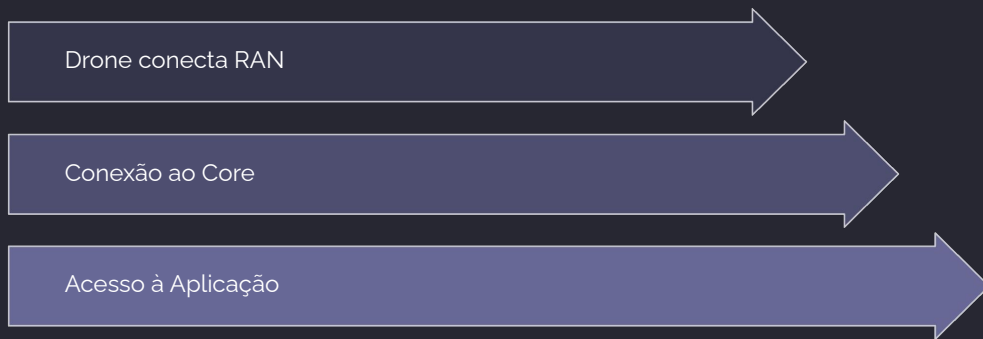
Private 5G permite tratar a conectividade como parte da infraestrutura da organização.

Duas formas de Non Public Network

SNPN

Standalone Non Public Network

A organização possui infraestrutura própria: RAN, Core e identidade de rede independentes.



PNI-NPN

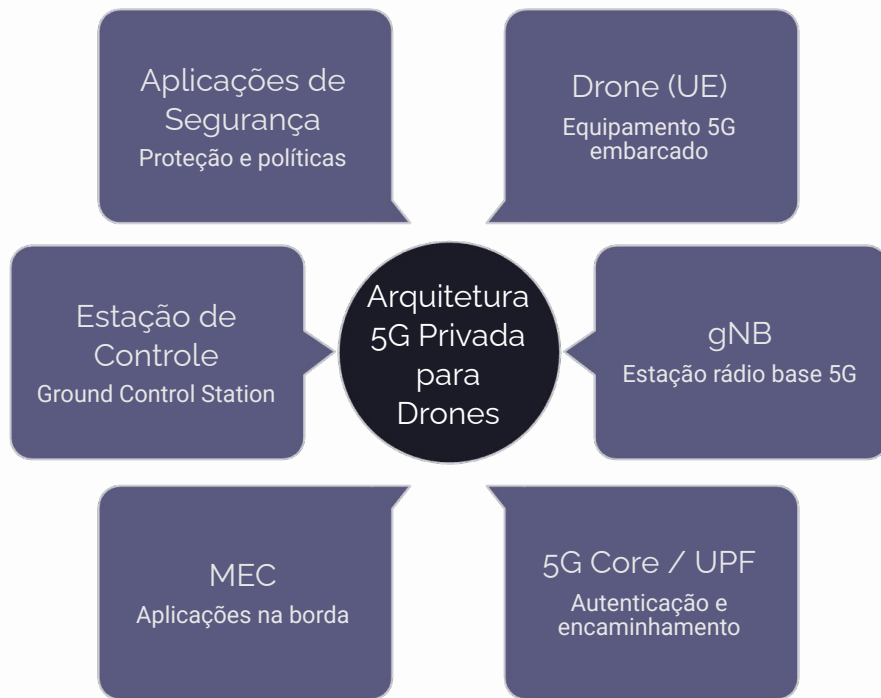
Public Network Integrated NPN

A rede privada utiliza recursos de uma operadora pública via slicing, DNN específico, políticas e recursos dedicados.



O grau de independência da infraestrutura pode variar.

Uma rede 5G privada para drones



UE

Equipamento 5G embarcado no drone.

gNB

Estação rádio base 5G.

5G Core

Autenticação, sessões, mobilidade e políticas.

UPF

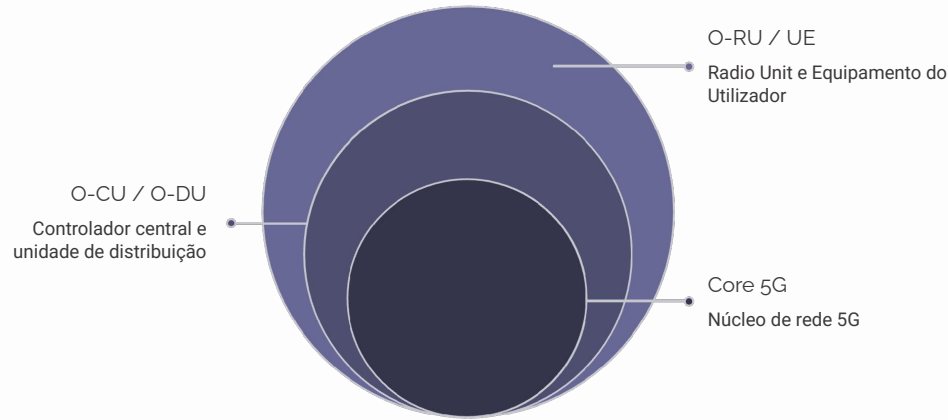
Encaminhamento do tráfego de usuário.

MEC

Aplicações próximas da borda da rede.

📄 Controle, telemetria, vídeo e aplicações compartilham a mesma infraestrutura com tratamento lógico distinto.

Uma RAN aberta, desagregada e programável



Estação rádio base tradicional é monolítica.

O RAN organiza essas funções em **componentes com interfaces abertas e definidas**, permitindo fornecedores múltiplos e programação das funções de rádio.

A RAN passa a ser composta por funções que podem ser distribuídas e programadas.

SMO

Service Management and
Orchestration

Non RT RIC

Políticas e analytics em escala longa

Near RT RIC

Controle da RAN em baixa latência

O que fazem O RU, O DU e O CU?

O RU — Radio Unit

Funções próximas da antena:

- RF e amplificação
- Conversão de sinais
- Low PHY
- Transmissão e recepção

O DU — Distributed Unit

Funções com requisitos temporais elevados:

- High PHY
- MAC e Scheduling
- RLC

O CU — Central Unit

Funções de camadas superiores:

- PDCP / SDAP
- RRC
- O CU-CP (Control Plane)
- O CU-UP (User Plane)

A função da estação base pode ser distribuída entre rádio, edge e datacenter.

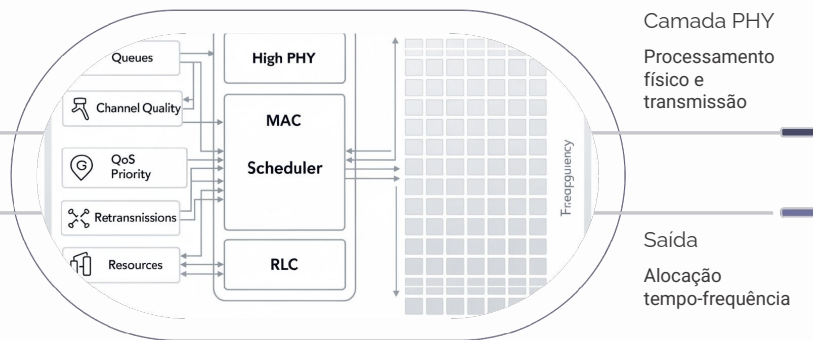
Onde acontece o scheduling?

MAC com
SCHEDULER

Recebe filas, CQI,
QoS, prioridade

RLC

Segmentação e
retransmissões



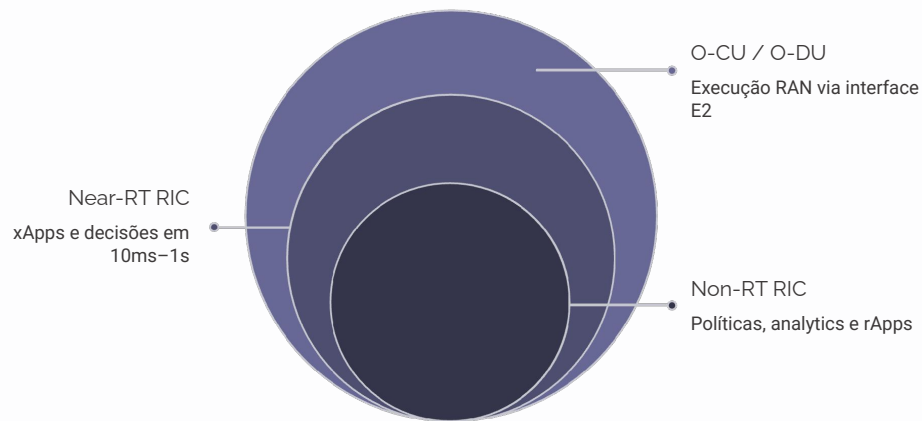
A cada intervalo de transmissão — o **Transmission Time Interval (TTI)** — o scheduler decide quais usuários receberão recursos de rádio.

Entradas do scheduler

- Dados na fila e qualidade do canal
- QoS e prioridade configurada
- Retransmissões pendentes
- Recursos disponíveis na célula

? Todos os usuários deveriam ser tratados apenas pela urgência dos pacotes?

O RAN acrescenta inteligência programável



O RAN transforma a estação base em uma plataforma programável onde **decisões de otimização podem utilizar informações além da camada de rádio.**

Non RT RIC

Escala > ~1 segundo. Políticas, analytics, treinamento de modelos e rApps.

Near RT RIC

Escala ~10 ms a 1 s. Observação e controle da RAN via interface E2 com xApps.

MEC — Multi-access Edge Computing



O problema

Enviar dados para uma nuvem distante acrescenta latência, tráfego de backbone e dependência de conectividade externa.

A solução

Executar aplicações próximas da RAN. O vídeo é processado na área de operação. Somente resultados relevantes seguem para serviços remotos.



Edge computing aproxima computação e comunicação.

Onde IA e RAN se encontram

AI for RAN

IA utilizada para melhorar a própria rede.

- Predição de qualidade de canal
- Otimização de handover
- Alocação de recursos
- Detecção de anomalias

AI and RAN

IA e processamento da RAN compartilham infraestrutura computacional.

- GPU compartilhada entre funções de rede e workloads de IA

AI on RAN

Aplicações de IA executam na infraestrutura próxima da RAN.

- Inferência de vídeo de drone no edge

AI RAN conecta inteligência, infraestrutura computacional e operação da rede.

Por que drones são interessantes para AI RAN?



O drone frequentemente **conhece sua trajetória futura**. A rede pode utilizar essa informação para agir antecipadamente.

A rede recebe

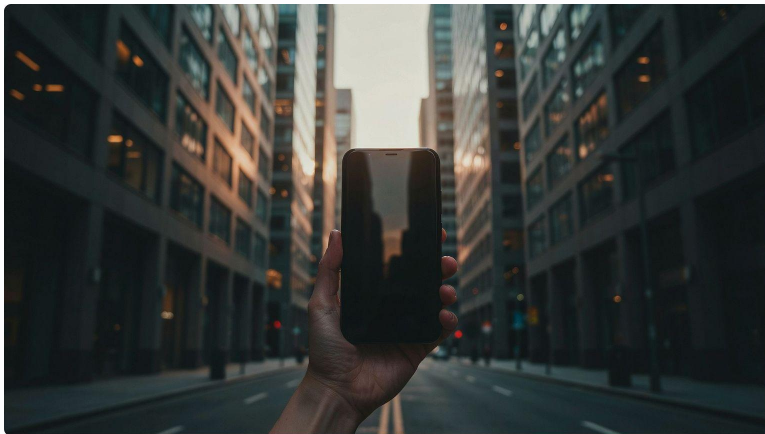
- Posição, velocidade e altitude
- Trajetória planejada (waypoints)
- Qualidade do enlace e carga das células

A rede pode prever

- Qual célula ficará melhor posicionada
- Quando preparar o handover
- Onde reservar recursos antecipadamente

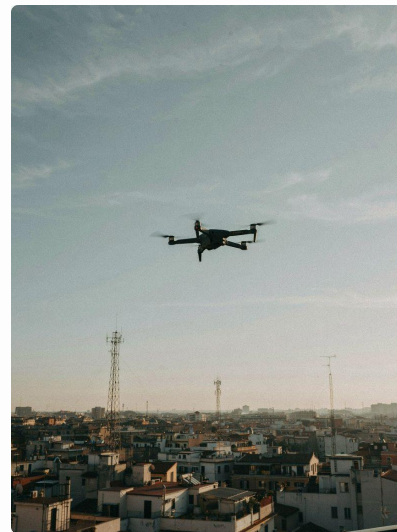
❏ **Mobilidade prevista transforma uma rede reativa em antecipatória.**

Um drone vê a rede de outra forma



Smartphone no solo

- Prédios bloqueiam diversas células
- Poucas células dominantes visíveis
- Padrão de propagação complexo



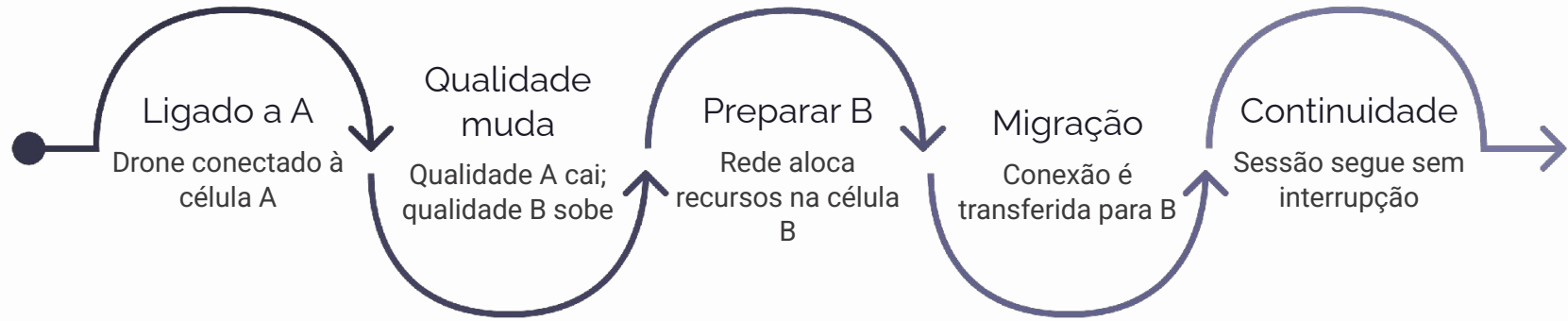
Drone em altitude

- Alta probabilidade de linha de visada
- Múltiplas células visíveis simultaneamente
- Maior exposição a interferência entre células
- Antenas terrestres apontam para baixo

❑ O melhor servidor para um usuário terrestre pode não ser o melhor servidor para um UAV.

Handover

Como manter o serviço durante o movimento



Um bom handover deve preservar: sessão, QoS, baixa perda de pacotes, baixa interrupção e continuidade da aplicação.

Mobilidade transforma cobertura em uma sequência coordenada de enlaces.

Três fluxos, três necessidades

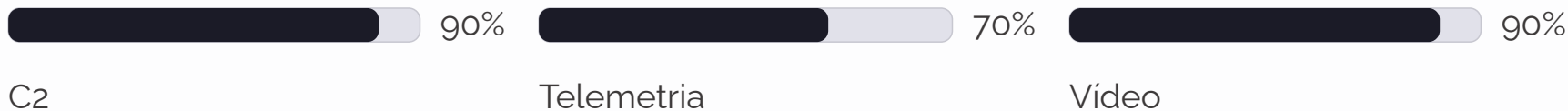
Fluxo	Throughput	Latência	Confiabilidade	Consequência da degradação
C2	Baixo	Muito baixa	Muito alta	Perda do controle da aeronave
Telemetria	Baixo a médio	Baixa	Alta	Perda de consciência situacional
Vídeo	Alto	Baixa	Adaptável	Degradação da percepção



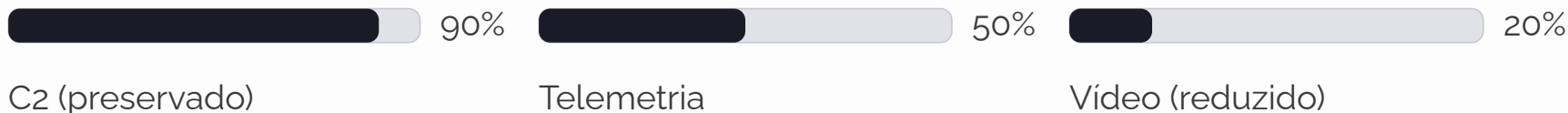
Um byte pode carregar valores operacionais muito diferentes dependendo de sua semântica.

Exemplo de política para um drone

Recursos abundantes



Recursos escassos



❏ A rede pode degradar serviços de maneira controlada, preservando o que é operacionalmente crítico.

O que acontece durante congestionamento?



Cenário: Três drones transmitindo vídeo, telemetria e C2 simultaneamente. A capacidade da célula diminui.

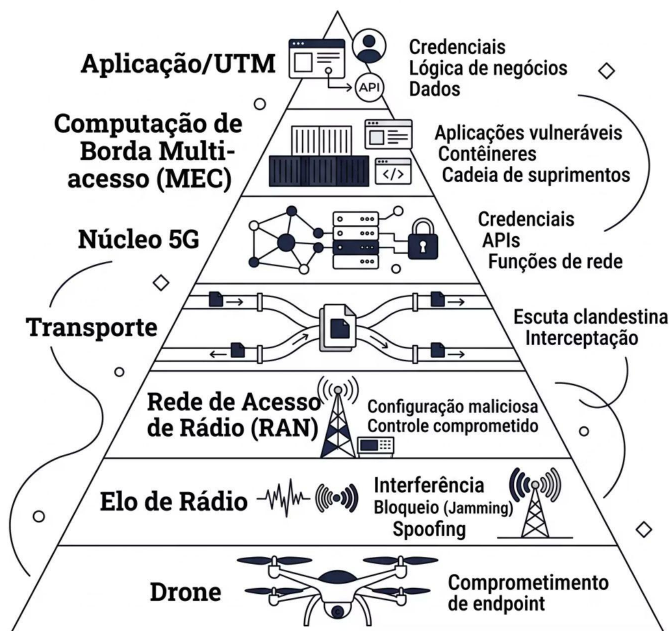
CrITÉRIOS convencionais do scheduler

- Qualidade de canal (SINR)
- Tamanho da fila
- QoS e prioridade
- Fairness entre usuários
- Deadline de pacotes



E se o scheduler também soubesse a consequência física de atrasar cada fluxo?

A superfície de ataque também cresce

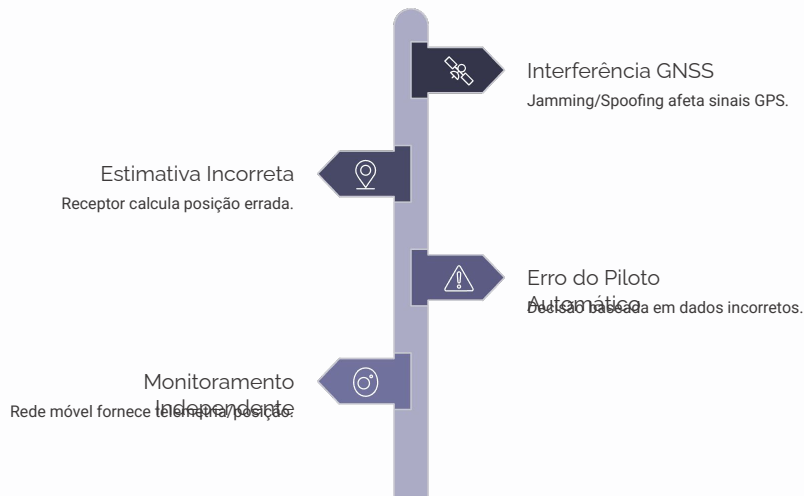


Uma infraestrutura programável oferece **mais mecanismos de defesa** e ao mesmo tempo uma **superfície de ataque maior**.

Novos vetores com 5G privado

- APIs abertas do O RAN
- xApps e rApps de terceiros
- Modelos de IA comprometidos
- Supply chain de componentes

GNSS também faz parte da superfície de ataque



Possíveis consequências

- Erro de posição e tempo
- Desvio de trajetória
- Falha de geofence
- Impacto em formação e RTK

☐ Rede e navegação fornecem evidências independentes para detectar inconsistências.

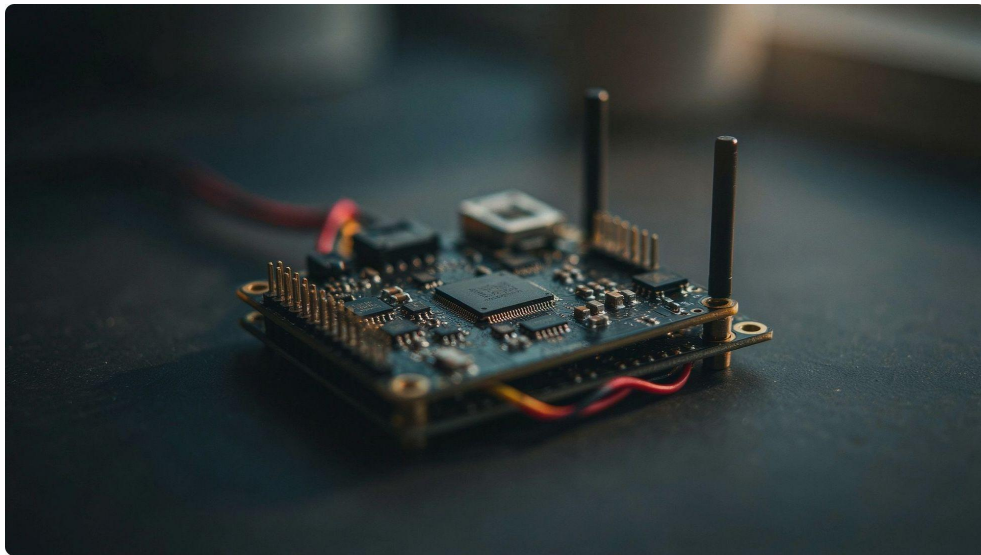
GNSS Jamming

Reduz capacidade de receber sinais dos satélites.

GNSS Spoofing

Sinais falsos levam o receptor a estimar posição ou tempo incorretos.

O drone também é um computador conectado



Componentes embarcados

- Autopilot e companion computer
- Modem 5G
- Câmera, GNSS e sensores
- MAVLink e sistema operacional

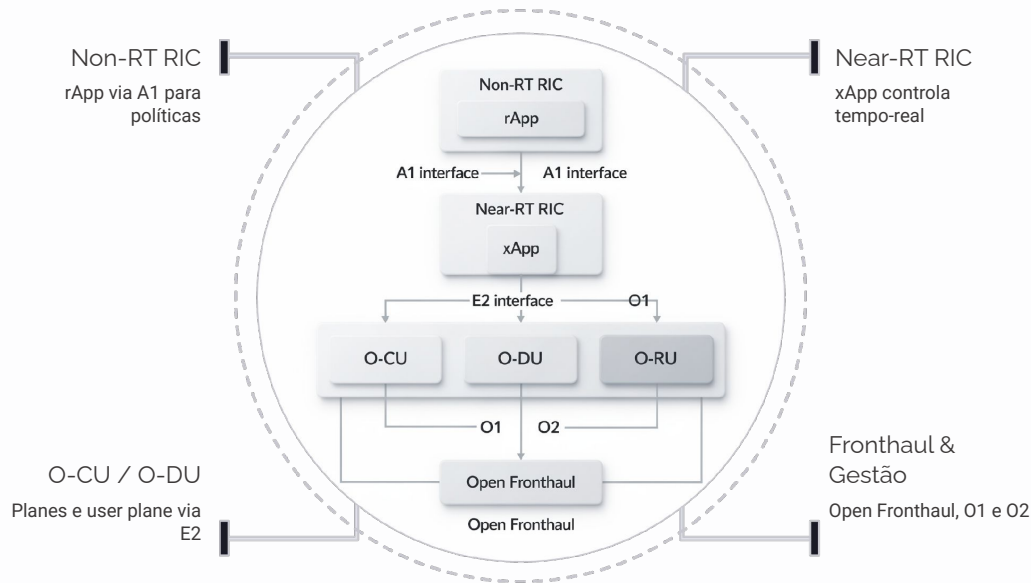
Vetores de ataque ao endpoint

- Software e firmware vulneráveis
- Credenciais expostas
- Serviços de rede acessíveis
- Comprometimento de supply chain



A segurança do enlace representa apenas uma parte da segurança do UAS.

O RAN cria novos pontos de controle e de ataque



Possíveis ameaças

- xApp ou rApp maliciosa
- Política incorreta injetada
- Modelo de IA comprometido
- Dados de treinamento contaminados
- Credenciais e APIs vulneráveis
- Supply chain de componentes



Programabilidade exige controle de identidade, autorização, integridade e governança.

O que 5G acrescenta em segurança?



Autenticação e identidade

Autenticação padronizada com identidade de assinante protegida por mecanismos do sistema 5G.



Proteção criptográfica

Integridade de sinalização e proteção de dados em trânsito.



Segmentação e políticas

Controle de acesso, slicing lógico e políticas específicas por aplicação.

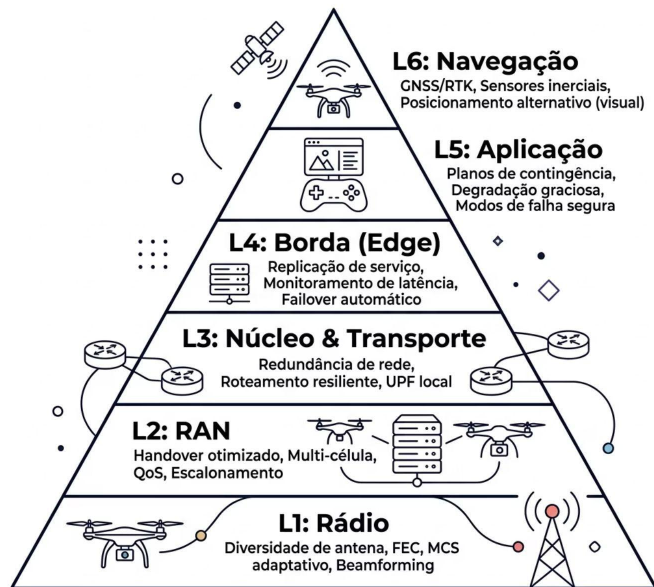


Private 5G

Credenciais administradas pela organização. Acesso limitado a equipamentos autorizados.

Private 5G permite integrar segurança de telecomunicações com política operacional.

Resiliência exige várias camadas



Camada 1 — Rádio

Diversidade, FEC, MCS adaptativo, beamforming.

Camada 2 — RAN

Handover, multi-cell, QoS, scheduling.

Camada 3 — Core e transporte

Redundância, roteamento, UPF local.

Camada 4 — Edge

Replicação, monitoramento, failover.

Camada 5 — Aplicação

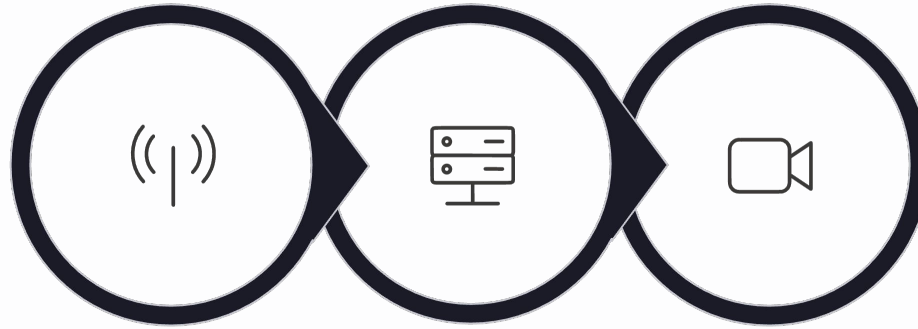
Contingência, degradação controlada, failsafe.

Camada 6 — Navegação

GNSS, RTK, sensores inerciais, fontes alternativas.

Resiliência emerge da composição de mecanismos em várias camadas.

Continuidade do enlace e continuidade do serviço



Célula A
degrade

MEC A falha

Vídeo reduz

✓ O objetivo final é preservar o serviço necessário para executar a missão.

Da QoS para Safety Aware Networking

QoS tradicional

Latência

Throughput

Perda

Prioridade

Fairness

Safety Aware Networking acrescenta

Estado físico

Fase da missão

Proximidade de
obstáculos

Risco de colisão

Críticidade do comando

❏ Safety Aware Networking é apresentado aqui como uma **direção de pesquisa**, adiciona capacidades à rede móvel de próxima geração.

A criticidade da comunicação pode depender do estado do mundo físico.

Quem pode esperar?

Safety Aware Scheduler



Drone A

Voo estável em área livre.

Solicita vídeo 4K.

Pode esperar.



Drone B

Aproximação para pouso.

Solicita C2.

Prioridade elevada.



Drone C

Próximo de obstáculo. Alta
velocidade.

Solicita comando de trajetória.

Prioridade máxima.

Prioridade pode refletir consequência física, não apenas urgência de pacote.

O scheduler convencional vê pacotes

Scheduler convencional

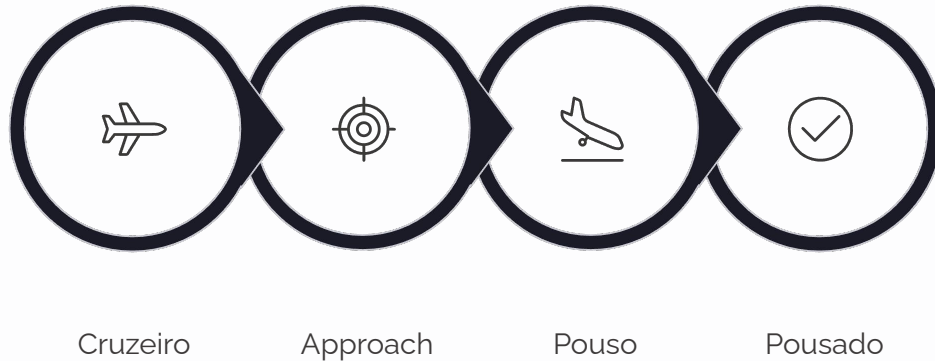
Pacote	Atributos observados
Packet A	Tamanho, fila, QoS, canal, deadline
Packet B	Tamanho, fila, QoS, canal, deadline
Packet C	Tamanho, fila, QoS, canal, deadline

Safety Aware Scheduler

Pacote	Semântica + contexto
Packet A	Vídeo recreativo → baixo risco de espera
Packet B	Correção de trajetória → risco alto
Packet C	Telemetria de bateria crítica → risco alto

❏ Dois pacotes com requisitos de rede semelhantes podem ter consequências físicas completamente diferentes.

Exemplo: pouso versus vídeo



Cenário de congestionamento

Drone A — executando pouso. C2 requer baixa latência e alta confiabilidade.

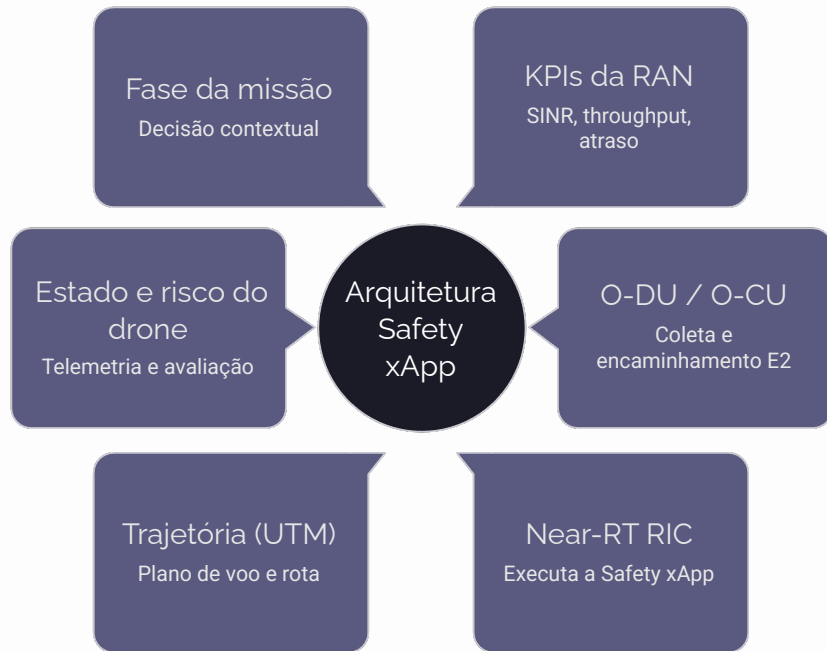
Drone B — inspeção estável. Transmitindo vídeo de alta resolução.

Estratégia Safety Aware

- Preservar recursos de C2 do Drone A
- Reduzir temporariamente bitrate do Drone B
- Após o pouso, recursos voltam ao vídeo

❏ **A prioridade pode variar dinamicamente ao longo da missão.**

O RAN pode fornecer o plano de controle



Entradas da Safety xApp

- KPIs da RAN (SINR, throughput, atraso)
- Trajetória e plano de missão (UTM)
- Estado físico do drone
- Avaliação de risco

Saída

Nova política de alocação de recursos via interface E2 para a RAN.

- ❏ Esta arquitetura representa uma **possibilidade de pesquisa**. Semântica de safety, confiança e atuação exigem mecanismos adicionais de definição e validação.

Security e Safety se encontram

Ataque adversarial

Jamming

Spoofing

Credencial
comprometida

xApp maliciosa

Decisão válida com consequência insegura

Scheduler reduz
C2 em manobra
crítica

Handover
seleciona célula
inadequada para
trajetória

Política autenticada causa degradação
operacional



Sistema ciberfísico: Rede + Software + IA + Mundo físico

Autenticidade da decisão e adequação da decisão são propriedades distintas.

Oportunidades de pesquisa

1

Mobility Prediction

Trajetória do UAV para antecipar handovers.

2

Safety Aware Scheduling

Alocação de recursos baseada em risco físico.

3

AI RAN

IA para otimização e automação da RAN.

4

Agentic Networking

Agentes gerenciando configuração e recuperação.

5

ISAC

Rede fornecendo comunicação e sensing integrados.

6

NTN

Integração com conectividade não terrestre.

7

Edge Intelligence

Inferência distribuída próxima da operação.

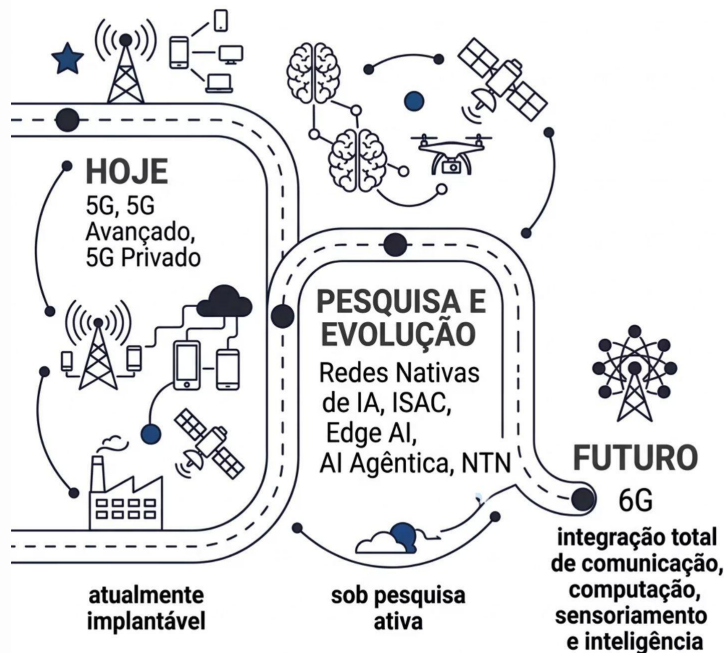
8

6G

Comunicação, computação, sensing e IA integrados.

UAVs combinam mobilidade, comunicação, computação e impacto físico em um mesmo sistema.

5G hoje, 6G em construção



Plataforma atual

5G e 5G Advanced fornecem a base já implantável para operações de drone em escala.

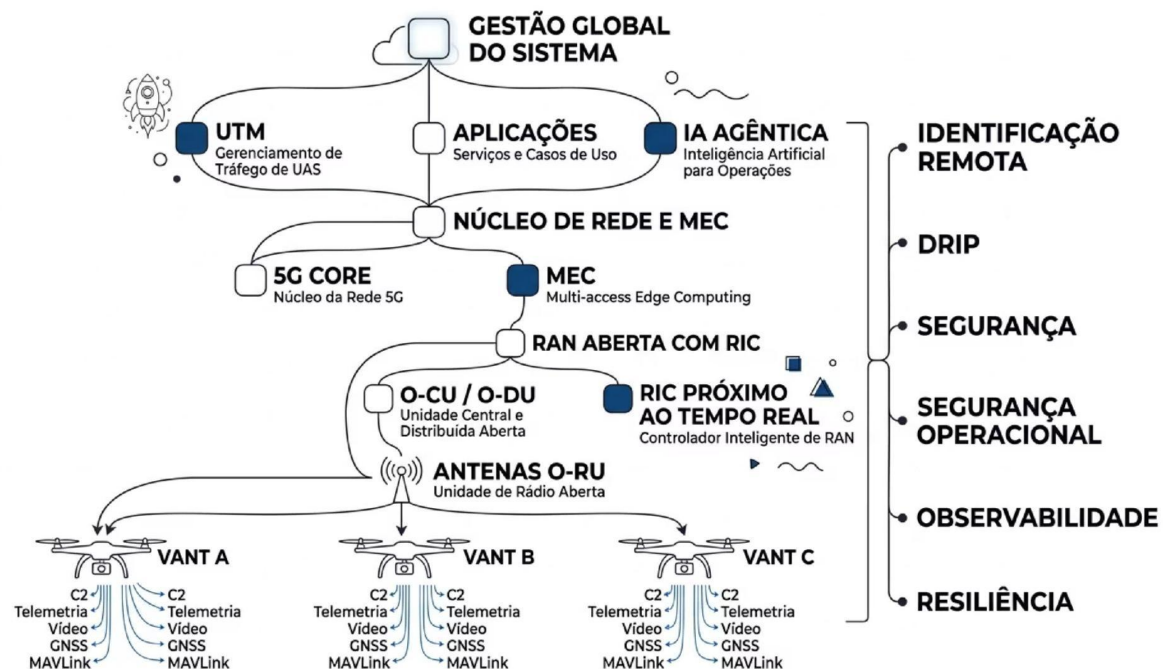
O RAN e AI RAN acrescentam abertura, programabilidade e inteligência à infraestrutura existente.

Horizonte

6G está em estudos e padronização, com integração nativa entre comunicação, computação, sensing e IA.

Podemos pesquisar o futuro utilizando infraestrutura disponível hoje.

A arquitetura completa



Drone networking deixa de ser um enlace isolado e passa a ser um sistema distribuído conectado ao mundo físico.

Quando a rede começa a tomar decisões

UM NOVO HORIZONTE

SEMANA DE CAPACITAÇÃO NIC.BR

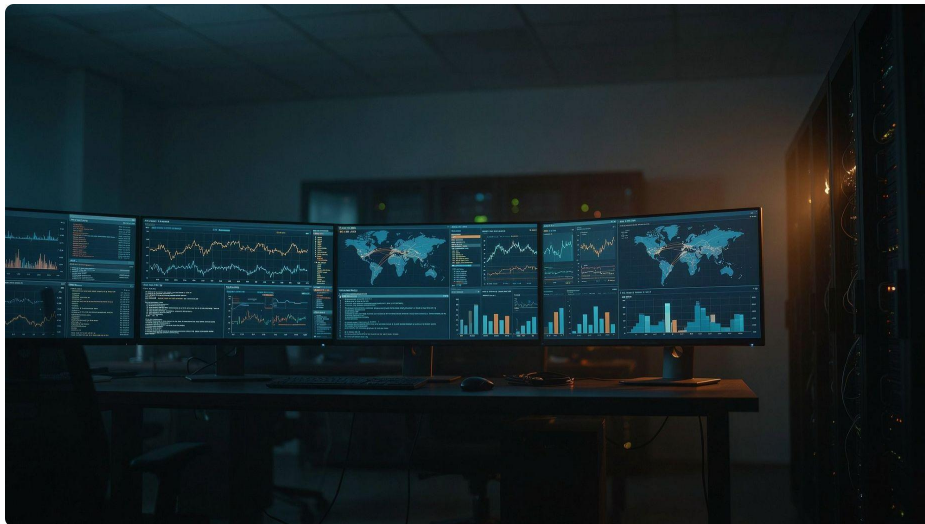


A evolução da rede



❏ "A rede deixa progressivamente de ser infraestrutura de transporte e passa a participar do ciclo de decisão."

O ciclo de decisão da rede



O laço de controle autônomo

1 Observar

Telemetria, KPIs, eventos do ambiente físico.

2 Raciocinar

Inferência sobre estado atual e futuro.

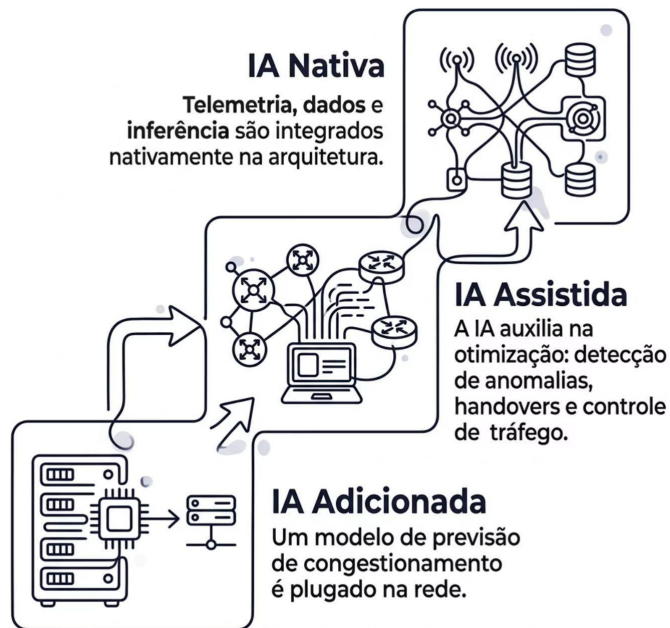
3 Decidir

Escolha de ação com base em objetivo.

4 Agir

Reconfiguração da rede ou do dispositivo.

O que significa AI Native Network?



Distinção conceitual

AI Added

Aplicação de IA adicionada a uma rede existente. IA como módulo externo.

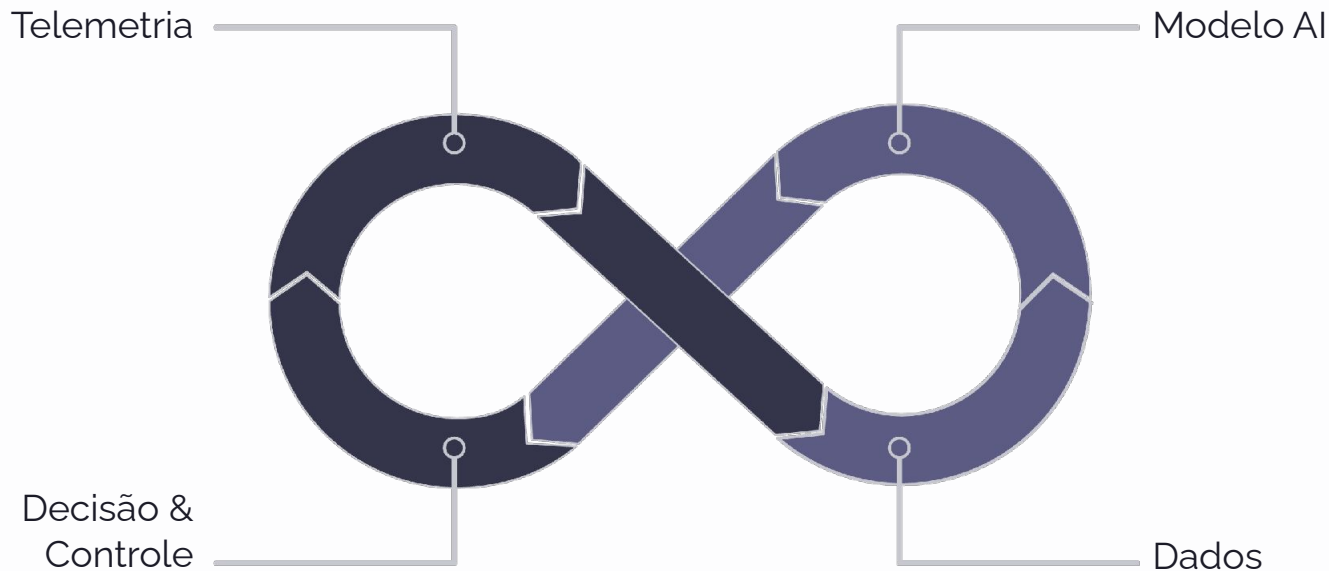
AI Assisted

IA em funções de otimização: predição de tráfego, detecção de anomalias, handover.

AI Native

IA projetada como parte da arquitetura. Inferência e controle fazem parte da operação.

O laço de retroalimentação AI Native



Em uma rede AI Native, o modelo não é externo: ele faz parte do ciclo de controle. Cada decisão gera novos dados que realimentam o modelo.

Da automação para Agentic AI

Nível 1 — Regras

SE SINR < limiar **ENTÃO** executar ação Y

Determinístico. Sem aprendizado.

Nível 2 — Machine Learning

Modelo prevê: congestionamento, falha, qualidade de canal, mobilidade.

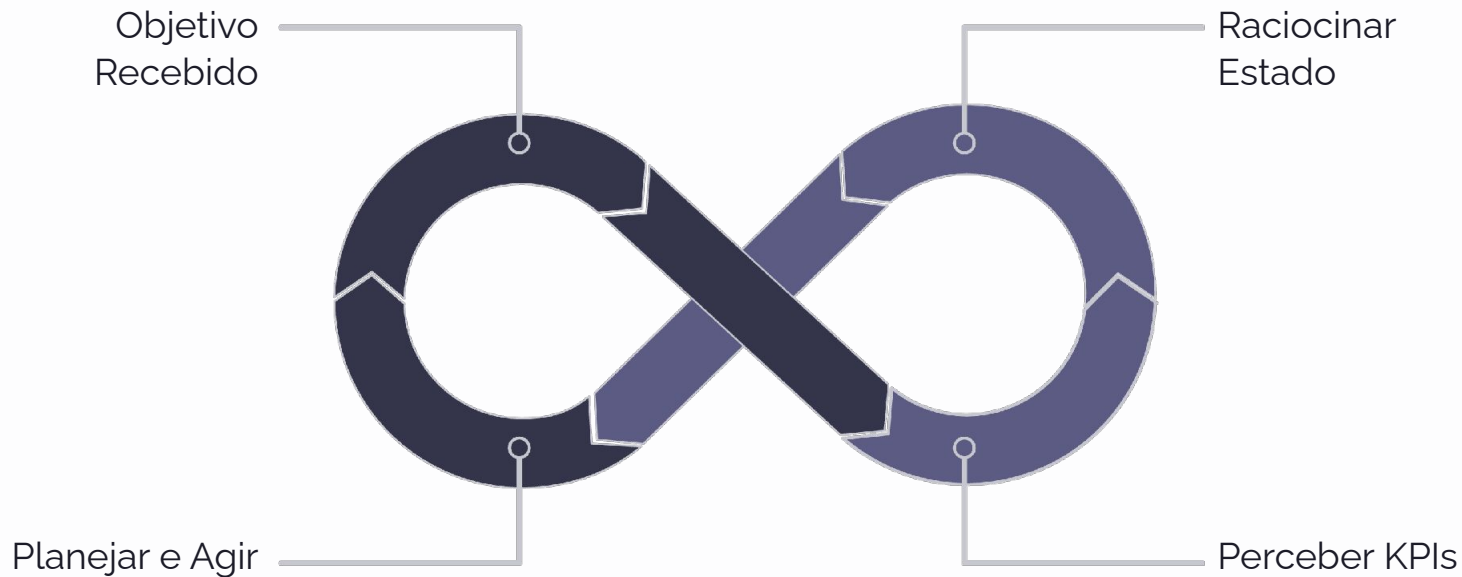
Reage com base em padrões aprendidos.

Nível 3 — Agentic AI

Recebe um **objetivo**. Observa múltiplas fontes. Planeja. Usa ferramentas. Executa. Adapta.

❏ "Agentic AI introduz autonomia orientada a objetivos — não apenas reação, mas planejamento."

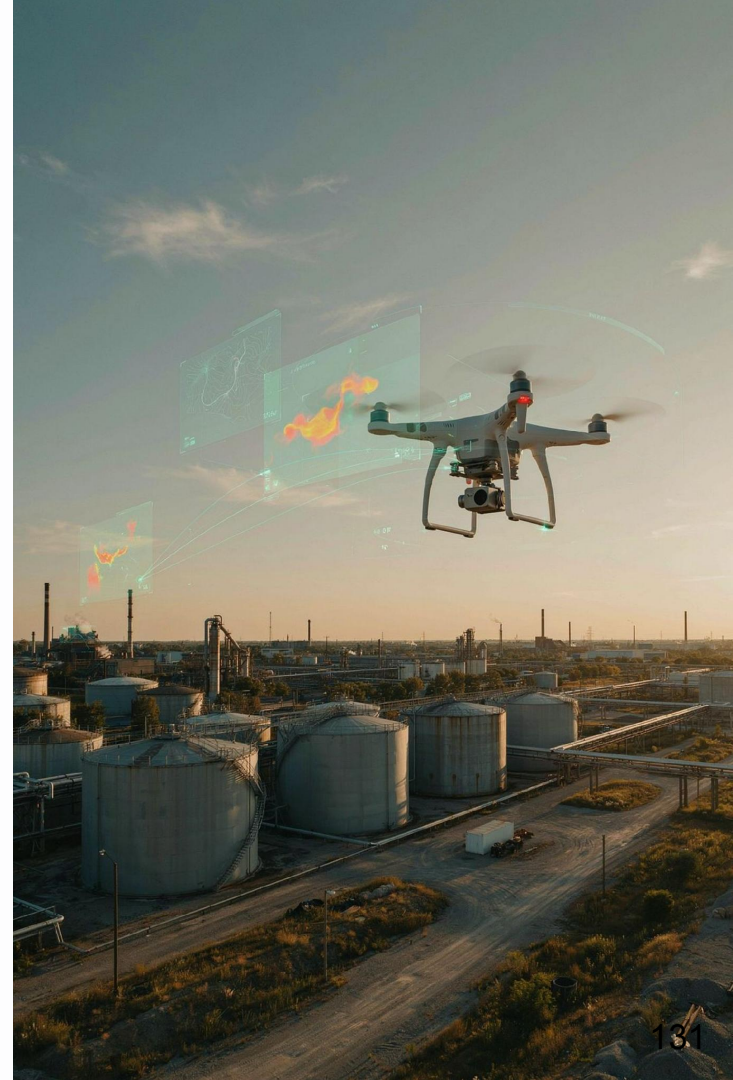
O ciclo do agente autônomo



O agente não executa uma única ação: ele mantém um laço contínuo entre observação, raciocínio e execução enquanto o objetivo não for atingido.

Um agente controlando uma rede de drones

Objetivo: "Manter conectividade segura para a missão."



Entradas e saídas do agente de rede

Entradas observadas

RAN

SINR, carga de células,
handover pendente

UAV

Posição, trajetória, bateria,
estado da missão

UTM

Eventos de segurança, separação, autorizações

Ferramentas disponíveis

Alterar política de QoS

Preparar handover

Realocar recursos de
rádio

Selecionar edge server

Acionar contingência

❏ "O agente transforma observações da rede em ações que afetam a missão física."

AI RAN como plataforma



AI for RAN

IA melhora a RAN: predição, scheduling, handover, energy optimization, anomaly detection.



AI and RAN

Workloads de IA e RAN compartilham infraestrutura: CPU, GPU, aceleradores.

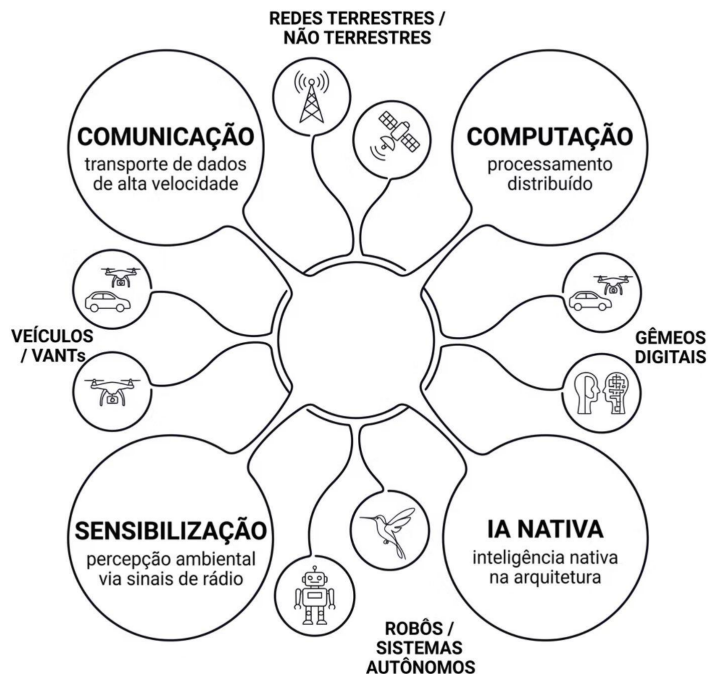


AI on RAN

Aplicações de IA executam na infraestrutura distribuída: visão computacional, robótica, inferência para UAVs, agentes.

"AI RAN aproxima comunicação, computação e inteligência na mesma infraestrutura."

6G: comunicação deixa de estar sozinha



Uma visão em construção

Communication

Ultra-alta capacidade e confiabilidade.

Computing

Processamento distribuído em todas as camadas.

Sensing

Percepção do ambiente via sinais de rádio.

AI

Inteligência nativa na arquitetura.



6G está em fase de pesquisa, definição de requisitos e padronização. Não há produtos ou padrões consolidados.

De configuração para intenção

INTENT BASED NETWORKING

Configuração tradicional

"Configure prioridade 5, reserve X recursos, utilize célula B, configure parâmetro Y."

Administrador especifica **como** fazer.

Intent Based Networking

"Mantenha conectividade suficiente para que os drones concluem a missão com segurança."

Administrador especifica **o que** deve acontecer.

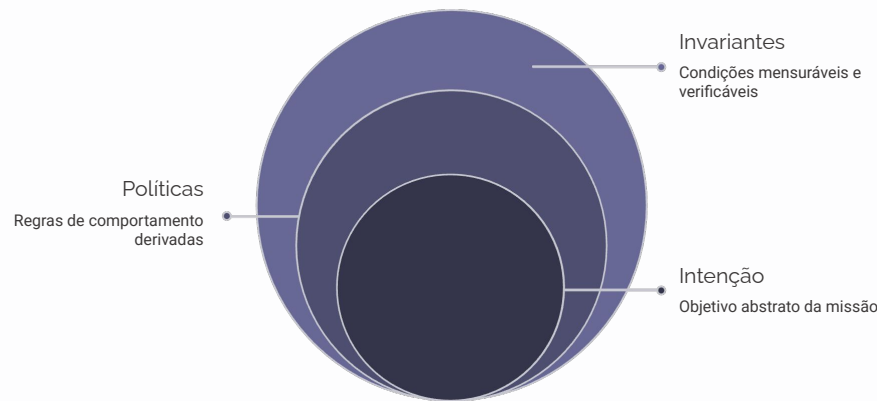


A intenção precisa virar invariantes

Da abstração ao verificável

"Concluir a missão com segurança."

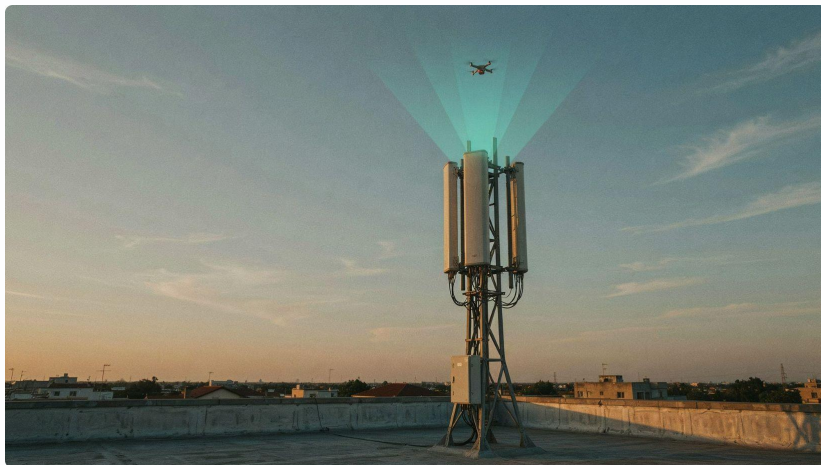
Uma intenção abstrata precisa ser decomposta em condições que o sistema pode monitorar e aplicar.



Exemplos de invariantes

- C2 dentro do limite de latência
- Probabilidade de perda abaixo do limite operacional
- Separação mínima entre aeronaves preservada
- Cobertura disponível na trajetória planejada
- Handover preparado antes da degradação
- Ação do agente dentro das permissões definidas

ISAC e drones: verificação cruzada



Cenário: estação base observa o espaço aéreo

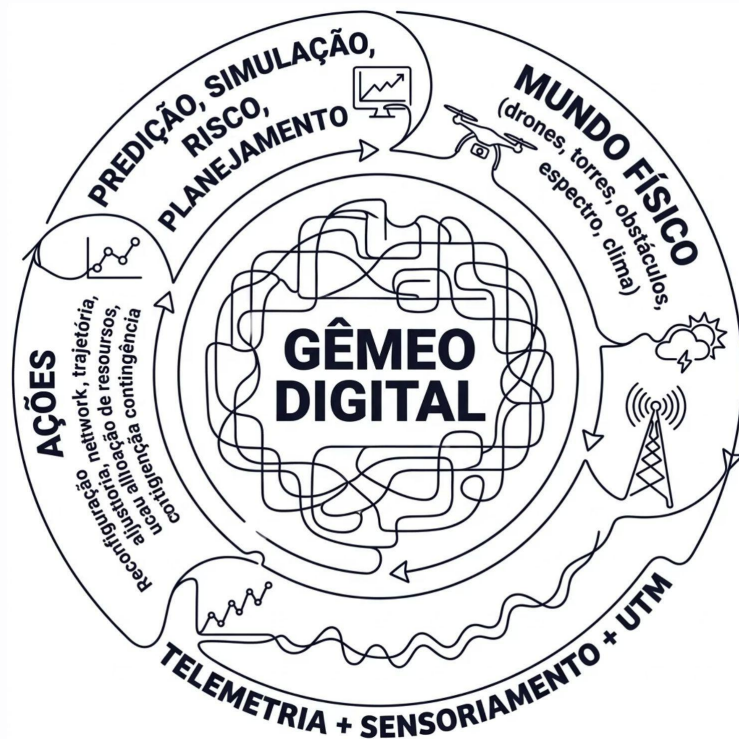
- Detecta objeto aéreo via sensing
- Estima posição, velocidade e trajetória
- Compara com Remote ID, UTM e telemetria
- Verifica consistência entre fontes

O objeto detectado corresponde ao drone identificado?

A posição declarada é consistente com o sensing?

Existe aeronave sem identificação?

Um Digital Twin do espaço aéreo



Por que um Digital Twin?

Antecipar
consequências

Simular ações antes de
aplicá-las ao mundo físico.

Fundir múltiplas fontes

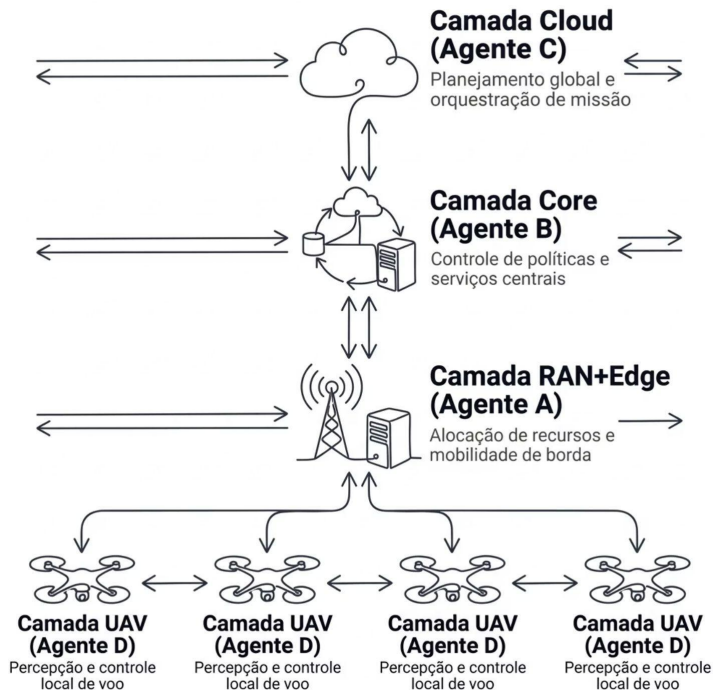
Telemetria, sensing ISAC,
Remote ID e UTM em um
modelo coerente.

Avaliar risco operacional

Identificar condições de risco antes do voo ou durante a missão.

❑ "Um modelo digital pode antecipar consequências antes que ações sejam aplicadas ao mundo físico."

Agentes distribuídos em todas as camadas



Cada agente controla recursos diferentes

Cloud — Agent C

Planejamento global,
políticas de missão.

Core — Agent B

Serviços, SLA, segurança de
rede.

RAN/Edge — Agent A

Recursos de rádio, handover,
QoS.

UAV — Agent D

Percepção local, controle de
voo, missão.

Comportamento emergente em múltiplos agentes

Três agentes com objetivos locais válidos

Agent A

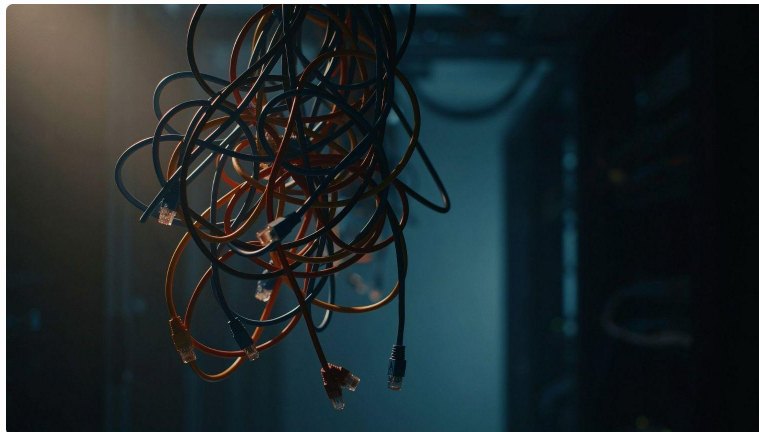
Otimiza energia.

Agent B

Otimiza throughput.

Agent C

Otimiza latência.

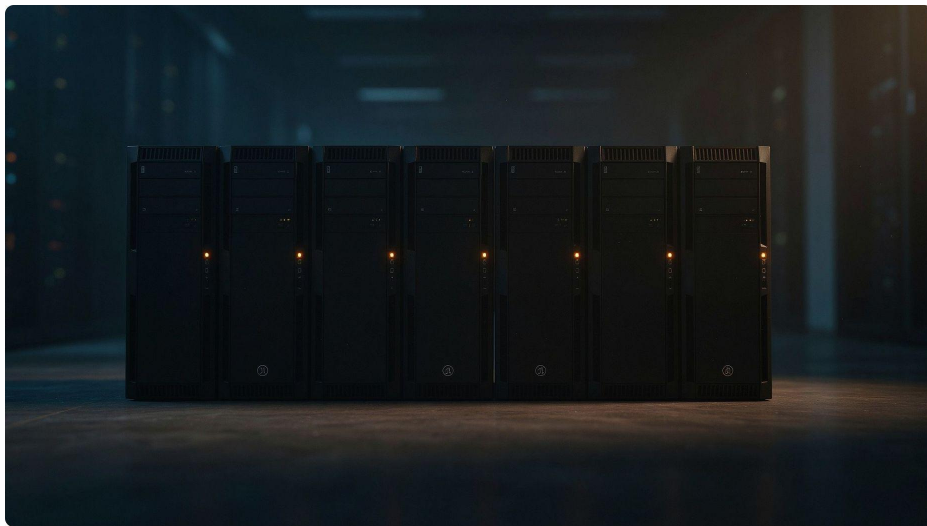


Interação não prevista

- Agent A reduz capacidade → Agent B desloca tráfego → Agent C muda prioridades
- Resultado: oscilações, congestionamento, handover excessivo, instabilidade

❏ "Objetivos locais compatíveis isoladamente podem produzir comportamento global inesperado."

Falhas correlacionadas em agentes distribuídos



Common Mode Failure

Distribuição física **não garante** diversidade de decisão quando a causa raiz é compartilhada.

Exemplo: previsão de mobilidade incorreta → múltiplos handovers inadequados simultâneos em todos os agentes.

Relação com drone shows: swarms com dependência comum podem falhar em modo correlacionado (Módulo 1).

Mesmo modelo de IA treinado com os mesmos dados

Mesma fonte de dados de entrada

Mesmo agente central de coordenação

Mesma política distribuída

Resumo: o que está disponível, o que evolui, o que é pesquisa



Leitura do mapa tecnológico

Disponível hoje

AI Assisted em redes 5G, MEC, AI
RAN em evolução, primeiros
elementos de automação.

Em evolução

AI Native, Intent Based
Networking, Agentic AI para
gestão de rede, 5G Advanced.

Direção de pesquisa 6G

Semantic Comm., ISAC integrado, Digital Twin de espaço aéreo,
verificação formal de agentes.



Redes de transmissão de dados para DRONES

Lourenço Alves Pereira Júnior
Aeronautics Institute of Technology - ita.br



cgi.br nic.br