

## Avaliação do Controle Adaptativo via O-RAN para Monitoramento Urbano com UAs

Antonia Mayara de A. da Silva<sup>1</sup>, Flavio L. S Souza<sup>4</sup>, André Luiz Elias Melo<sup>4</sup>, Michel Sales Bonfim<sup>3</sup>, Paulo Antonio Leal Rego<sup>1,2</sup> e Lourenço Alves Pereira Junior<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Mestrado e Doutorado em Ciência da Computação (MDCC),  
Universidade Federal do Ceará (UFC) – Fortaleza, CE – Brasil

<sup>2</sup> Departamento de Computação (DC) – UFC, Fortaleza, CE – Brasil

<sup>3</sup> Campus Quixadá – UFC, Quixadá, CE – Brasil

<sup>4</sup> Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, SP – Brasil

mayaraalmeida@alu.ufc.br, {flavio.souza, andre.melo}@ga.ita.br,  
michelsb@ufc.br, paulo@dc.ufc.br, ljr@ita.br

**Abstract.** *This work analyzes the impact of the RAN Intelligent Controller (RIC) within the Open RAN (O-RAN) architecture for urban monitoring with multiple Unmanned Aircraft (UAs). While UA usage has grown, efficient network resource management and energy consumption remain critical challenges for mission execution. This study evaluates how adaptive network control simultaneously influences energy efficiency, communication performance, and mission coverage. Monitoring missions to points of interest (PoIs) in Fortaleza, Brazil, were simulated to compare scenarios with and without RIC intervention. The results demonstrate that RIC orchestration enhances connection stability by reducing packet loss and latency. These improvements led to energy savings ranging from 2.2% to 10.5% per visited PoI, depending on the number of UAs. We conclude that integrating network control and mobility is vital for optimizing autonomy and operational effectiveness in urban monitoring scenarios.*

**Resumo.** *Este trabalho analisa o impacto do RAN Intelligent Controller (RIC) na arquitetura Open Radio Access Network (O-RAN) para o monitoramento urbano com múltiplos drones (UAs). Embora o uso de UAs tenha crescido, a gestão eficiente de recursos de rede e o consumo energético ainda apresentam desafios críticos para a execução de missões. O estudo avalia como o controle adaptativo da rede influencia simultaneamente a eficiência energética, o desempenho da comunicação e a cobertura da missão. Foram simuladas missões de visitação a pontos de interesse (PoIs) em Fortaleza-CE, comparando cenários com e sem a atuação do RIC. Os resultados demonstram que a orquestração do RIC melhora a estabilidade das conexões, reduzindo a perda de pacotes e a latência. Tais melhorias resultaram numa economia de energia variando de 2,2% a 10,5% por Ponto de Interesse visitado, dependendo do número de UAs. Conclui-se que a integração entre controle de rede e mobilidade é vital para otimizar a autonomia e a eficácia operacional em cenários de monitoramento urbano.*

### 1. Introdução

Com o avanço das tecnologias de *Unmanned Aircraft* (UAs), o uso desses dispositivos tem crescido bastante em várias áreas, como monitoramento de cidades, gerenciamento

de crises e fiscalização ambiental, entre outras. Por terem a capacidade de atuar em locais de difícil acesso e serem bastante flexíveis, os drones se tornaram uma solução eficiente para coletar dados em tempo real e apoiar decisões estratégicas [Mohsan et al. 2023]. Por outro lado, à medida que a quantidade de UAs em operação aumenta, surgem novos desafios, principalmente na gestão das redes de comunicação e no controle do consumo de energia [Lucchesi et al. 2024].

Nos cenários de monitoramento urbano, um dos principais desafios é manter uma comunicação estável e eficiente com os UAs, mesmo em áreas com muitas pessoas, onde a cobertura de rede e o tráfego de dados podem ficar limitados. Além disso, quanto mais drones estiverem operando ao mesmo tempo, maior é a chance de sobrecarregar a rede, causando congestionamentos e interferências. Isso pode afetar o desempenho das missões e também aumentar o consumo de energia dos aparelhos [Hilario et al. 2023].

Nesse contexto, algumas pesquisas têm adotado a arquitetura O-RAN para a gestão de redes baseadas em UAs. Ao propor uma estrutura aberta e programável, a O-RAN segmenta as funções da *Radio Access Network* (RAN) em componentes modulares, permitindo uma orquestração flexível e o controle automatizado de recursos por meio de controladores inteligentes, chamados de RIC [Mahboob et al. 2025]. Apesar do crescimento nessa área, poucos trabalhos avaliam de forma integrada o desempenho da rede, o consumo energético dos UAs e a cobertura de missão utilizando controle adaptativo inspirado nos princípios da arquitetura O-RAN.

A proposta deste trabalho é investigar o impacto do controle adaptativo do *RAN Intelligent Controller* (RIC) em missões de monitoramento urbano, avaliando como o uso de um controlador na rede afeta o desempenho da comunicação e a execução da missão. Este estudo avalia a eficiência energética dos UAs, a cobertura da área monitorada e as métricas de rede, com o objetivo de demonstrar que, mesmo com regras simples de controle, o RIC pode melhorar a estabilidade das conexões, reduzir o número de retransmissões e otimizar o consumo de energia dos UAs, permitindo que um maior número de Pontos de Interesse (PoIs) seja monitorado de forma eficiente. As principais contribuições deste estudo incluem:

- Avaliação da cobertura da área monitorada, do consumo energético dos drones e das métricas de desempenho durante a transmissão de vídeo dos UAs para a estação base, em diferentes configurações de missão e rede;
- Definição de um cenário de simulação que contém UAs e arquitetura O-RAN, permitindo a análise conjunta do comportamento dos dispositivos e da rede;
- Avaliação comparativa entre cenários com e sem a atuação do RIC, destacando o impacto do controle adaptativo, como ajuste dinâmico de potência dos *Evolved Node B* (eNBs) e decisões de handover, na eficiência energética e na qualidade da comunicação;

O presente trabalho está organizado da seguinte forma: Os trabalhos relacionados são discutidos no Seção 2. A metodologia é descrita na Seção 3. Os resultados e as discussões estão descritos Seção 4, e por fim na Seção 5 é discutido sobre a conclusão e trabalhos futuros.

## 2. Trabalhos Relacionados

Diversos trabalhos recentes investigam o uso de UAs em conjunto com redes sem fio, abordando desafios relacionados à eficiência energética, mobilidade e desempenho de comunicação. No trabalho de [Li et al. 2024], os autores desenvolveram uma arquitetura de rede assistida por UA habilitada para O-RAN, e consideraram a eficiência energética da rede, que foi calculada como a razão ponderada entre a taxa total de dados da rede e a energia total de transmissão das *Open Radio Units* (O-RUs). Foi projetado um algoritmo que busca otimizar o gasto de energia focando na localização do UA e na divisão de recursos de radio. Os resultados obtidos mostraram que a proposta pode aumentar a eficiência energética da rede e se ajustar a várias configurações de rede.

Em [Kong et al. 2024], o foco foi a otimização do consumo de energia de UAs durante tarefas de monitoramento de tráfego. O objetivo principal era planejar o caminho dos UAs e minimizar o consumo de energia, considerando o consumo durante voo, pairar (hovering) e comunicação. Os autores sugeriram o algoritmo MAUP, que elimina a necessidade de comunicação entre agentes antes da tomada de decisão, diminuindo o gasto energético com comunicação. Em comparação com outros métodos, como DDPG e *Random*, o método mostrou ser eficaz na redução do consumo de energia dos UAs. Apesar do crescimento na quantidade de drones, o MAUP apresentou um consumo de energia comparativamente baixo em relação aos outros.

Ainda no contexto de monitoramento urbano, no trabalho de [Zhou et al. 2023] os autores modelaram as rotas de serviço dos UAs, a frequência de visitas às áreas de demanda e a localização de depósitos em um problema de otimização combinatória. Os autores propuseram um algoritmo heurístico baseado em decomposição e em estratégias adaptativas de busca em grandes vizinhanças [Mara et al. 2022], incluindo uma estratégia denominada *Frequency-Time-Frequency* para determinar a frequência ótima de visita e o tempo de serviço em cada rota.

Em [Sun et al. 2025], os autores propõem uma abordagem para reduzir o consumo de energia e o custo de adaptação de UAs a novos ambientes, considerando UAs atuando como O-RUs móveis em uma arquitetura O-RAN. A solução utiliza *Transfer Learning* para reaproveitar conhecimento previamente aprendido, evitando o treinamento completo do modelo em cada novo cenário. Os resultados mostram reduções significativas no consumo de energia: 30,52% e 58,51% em ambientes simulados, e 47,39% e 36,97% em cenários reais baseados em mapas de Ottawa e Rosslyn, quando comparados a um modelo treinado do zero.

[Feitosa et al. 2025] avaliam o uso de UAs em cenários de entregas aéreas, propondo um modelo de avaliação de desempenho que considera aspectos operacionais como colisões entre drones, logística de reparo e pontos de recarga. O estudo analisa métricas orientadas à missão, como a taxa de entregas concluídas e o impacto de falhas no desempenho global do sistema, por meio de simulações. Embora o foco esteja em aplicações logísticas e não na comunicação sem fio, o trabalho reforça a importância de avaliar UAs a partir de métricas associadas à execução da missão, ponto também explorado neste artigo, porém no contexto de monitoramento urbano integrado à arquitetura O-RAN.

De modo geral, os trabalhos relacionados focam em aspectos específicos do problema, como a otimização da eficiência energética da infraestrutura de rede ou dos

UAs, o planejamento de trajetórias ou o uso de modelos de aprendizado para controle e adaptação. Estudos que exploram a integração entre UAs e a arquitetura O-RAN, como [Li et al. 2024] e [Sun et al. 2025], investigam soluções apoiadas em princípios do O-RAN, seja otimizando o consumo energético da rede assistida por UAs, seja reduzindo o custo de controle, sem avaliar diretamente o impacto dessas decisões sobre a execução de missões de monitoramento e a cobertura de pontos de interesse. Por outro lado, trabalhos voltados ao planejamento de rotas e à redução do consumo energético dos UAs, como [Kong et al. 2024] e [Zhou et al. 2023], não consideram mecanismos de controle adaptativo da rede nem arquiteturas abertas como a O-RAN. Assim, observa-se uma lacuna na literatura quanto a avaliações integradas que considerem, de forma conjunta, o desempenho da rede, o consumo energético dos UAs e a cobertura orientada à missão, especialmente utilizando políticas de controle simples e interpretáveis no RIC.

Em comparação aos trabalhos apresentados, que geralmente tratam energia, mobilidade ou desempenho de rede como problemas separados, o presente trabalho busca unir esses elementos. Com o emprego de UAs em um ambiente O-RAN com coordenação via RIC, o foco é avaliar em conjunto o consumo de energia dos drones, o desempenho da rede e a cobertura de PoIs no monitoramento urbano. Essa integração permite observar de forma mais completa os *trade-offs* entre eficiência energética, qualidade de serviço e capacidade de monitoramento, oferecendo uma visão mais ampla e próxima das necessidades de aplicações práticas. A Tabela 1 apresenta uma comparação entre os trabalhos encontrados e este trabalho.

**Tabela 1 Comparação de trabalhos relacionados**

Trabalho	Missão / Uso	O-RAN / RIC	Foco
[Li et al. 2024]	Comunicação (UAs como O-RUs)	Sim	Eficiência energética da RAN
[Kong et al. 2024]	Monitoramento (Multi-UAV)	Não	Redução de consumo via RL
[Sun et al. 2025]	Comunicação (UAs como O-RUs)	Sim	Controle adaptativo com aprendizado
[Zhou et al. 2023]	Monitoramento urbano	Não	Planejamento de rotas de serviço
[Feitosa et al. 2025]	Entrega aérea	Não	Logística e tolerância a falhas
<b>Este trabalho</b>	Monitoramento urbano (PoIs)	Sim	Integração rede-energia-missão

### 3. Metodologia

Esta seção detalha o planejamento, a configuração do ambiente e a execução dos experimentos. O ambiente de simulação foi configurado com base em valores consolidados na literatura para cenários de monitoramento urbano com UAs. A escolha do ns-3 com IoD-Sim se deve à sua ampla adoção em trabalhos similares [Hilario et al. 2023], assim como o uso de LTE como tecnologia de acesso [Li et al. 2024]. Os limiares heurísticos do RIC, a duração de gravação de 30 segundos por PoI e o posicionamento das eNBs foram definidos como aproximações operacionais realistas, cujo impacto de variações constitui uma direção para trabalhos futuros.

### 3.1. Ambiente de Experimentação

A infraestrutura de simulação baseia-se no ns-3<sup>1</sup>, um simulador de eventos discretos amplamente utilizado para protocolos de rede. Para suportar as especificidades de redes de drones, integrou-se o simulador IoD-Sim<sup>2</sup>, que estende o ns-3 com modelos de mobilidade, consumo energético e comunicação dinâmica para UAs. Em complemento às ferramentas de simulação, integramos um módulo extra ao ns-3, o NetSimulyzer, que possibilita a visualização dos experimentos e resultados gerados no ns-3 de forma interativa e 3D. O NetSimulyzer pode ser configurado para mostrar os resultados das simulações em diferentes formatos, incluindo nós 3D, movimentos de nós, gráficos, tabelas e diagramas. Todos os cenários foram desenvolvidos em C++, garantindo a integração nativa entre as ferramentas.

### 3.2. Cenário

O cenário de simulação foi projetado para representar operações de monitoramento urbano com múltiplos UAs, integrando aspectos físicos de mobilidade e a infraestrutura de comunicação. Cada UA é configurado com parâmetros específicos de deslocamento, autonomia energética e capacidade de transmissão para refletir o comportamento de drones em missões reais de sensoriamento. Durante a execução, os UAs realizam a captura e a transmissão contínua de tráfego de vídeo, simulando aplicações de vigilância em tempo real. A infraestrutura de rede baseia-se em eNBs que fornecem conectividade LTE aos UAs ao longo de suas rotas, enquanto a gestão da rede é realizada pela arquitetura O-RAN através do controlador RIC. Todos os eventos de comunicação, trajetórias e posições dos drones são registrados pelo IoD-Sim e processados pelo NetSimulyzer, permitindo uma análise detalhada da interação entre a dinâmica dos UAs e a orquestração da rede.

#### 3.2.1. Configuração dos UAs

Os UAs operam como nós móveis responsáveis pela geração de tráfego para as eNBs. No IoD-Sim, cada drone é instanciado com parâmetros de energia e mobilidade previamente definidos, deslocando-se em trajetórias pré-planejadas dentro de uma área de cobertura específica. Durante a simulação, cada UA associa-se a uma eNB para estabelecer a conexão LTE necessária à avaliação do desempenho da rede.

Neste trabalho, a missão consiste na visitação de um conjunto de PoIs para coleta de informações, com o retorno dos drones ao ponto de partida ao final da operação. Para emular a diversidade de frotas comerciais, os UAs possuem capacidades de bateria variando entre 10.000 e 17.000 mAh. Essa variação foi adotada intencionalmente para emular a diversidade típica de frotas comerciais de drones, onde diferentes modelos com distintas capacidades energéticas frequentemente operam em conjunto. Para garantir que essa heterogeneidade não comprometa a validade estatística das comparações, cada cenário foi executado 33 vezes com sementes aleatórias distintas, e os resultados foram agregados por meio de análise estatística, conforme descrito na Seção 4.3. Outros parâmetros operacionais foram mantidos fixos, incluindo a altura de voo de 50 m e a velocidade

---

<sup>1</sup><https://www.nsnam.org/>

<sup>2</sup>[https://github.com/telematics-lab/IoD\\_Sim](https://github.com/telematics-lab/IoD_Sim)

constante de 20 m/s. Esses valores foram definidos com base em configurações recorrentes na literatura para cenários de monitoramento urbano com drones [Kong et al. 2024] e [Zhou et al. 2023], buscando representar um perfil operacional realista.

### 3.2.2. Open RAN

A arquitetura O-RAN desempenha um papel central na orquestração dos experimentos, provendo uma estrutura aberta e programável que permite o monitoramento contínuo da rede e a reconfiguração dinâmica dos seus parâmetros. Essa arquitetura atua sobre as eNBs, que se comunicam diretamente com os UAs, realizando ajustes na potência de transmissão, no gerenciamento de *handover* entre elas e no controle de interferência. No centro dessa arquitetura está o RIC, que é responsável por processar métricas provenientes das eNBs, identificar gargalos operacionais e enviar comandos de ajuste para otimizar o desempenho da rede em tempo real.

O RIC foi implementado como módulo externo ao ns-3, desenvolvido pelos autores, se comunicando com o simulador via UDP. A cada ciclo de 5 segundos, o ns-3 envia os KPIs coletados das eNBs ao RIC: throughput (Mbps), delay médio (ms), PLR (%) e nível de bateria (%), que os processa, aplica as regras heurísticas e retorna comandos de ajuste de potência TX e *handover*. A intervenção do RIC ocorre quando a qualidade de serviço (QoS) degrada ou quando a autonomia de um UA atinge níveis críticos. O sistema foi configurado para executar duas ações principais: (i) ajuste da potência de transmissão (TX) das eNBs com o objetivo de estabilizar o enlace de rádio e reduzir a necessidade de retransmissões; e (ii) gerenciamento de *handover*, ao redirecionar UAs com baixa bateria ou sinal instável para a eNB mais próxima, minimizando perdas de conexão.

Os limiares adotados nas regras heurísticas do RIC foram definidos com base em valores recorrentes na literatura para cenários de monitoramento com UAs, sendo utilizados neste trabalho como baseline operacional. O limiar de 30% da capacidade; Throughput menor que 1 Mbps e PLR maior que 15%; ou Delay maior que 100 ms. A partir dessas definições, o controle adaptativo ajusta parâmetros da comunicação, como fazer o *handover* entre antenas para o UA se conectar à antena mais próxima e fazer o controle de potência TX das eNBs. A partir disso, a bateria é frequentemente empregada para possibilitar o replanejamento seguro da missão, enquanto os limites de 1 Mbps de throughput e 100 ms de atraso representam valores mínimos adotados para garantir a continuidade da comunicação em aplicações de monitoramento, conforme [Niknam et al. 2022].

### 3.2.3. eNBs

As eNBs constituem os nós de acesso da rede LTE e fornecem a conexão sem fio aos UAs. Enquanto o RIC analisa a rede e envia os comandos, é na eNB que a ação é executada. Nelas, os ajustes de parâmetros são configurados para garantir que os UAs mantenham *throughput* adequado, baixa latência e perda de pacotes mínima.

### 3.3. Métricas

As métricas selecionadas avaliam a eficiência da comunicação, o comportamento da rede e o consumo de recursos durante a operação dos UAs. Foram analisados o *throughput*,

a latência, a taxa de perda de pacotes, o consumo energético e a cobertura orientada à missão.

Todas as informações referentes a essas métricas podem ser obtidas a partir dos registros gerados pelo *IoD-Sim* e visualizados com o auxílio do *NetSimulyzer*, garantindo que os resultados possam ser coletados de maneira precisa e consistente, além de possibilitar a reprodução para diferentes cenários experimentais.

#### 4. Experimentos e Resultados

Nesta seção são apresentados os experimentos realizados e os resultados alcançados. Serão detalhados todos os testes e como o O-RAN impacta nos cenários configurados. Além disso, há uma discussão dos resultados com a interpretação dos dados obtidos nos experimentos.

##### 4.1. Planejamento Experimental

Na Tabela 2 é detalhada a configuração dos experimentos. Nela, estão apresentados o objetivo dos experimentos, que trata do foco principal a ser avaliado; os componentes a serem testados, representados pelos elementos que compõe o cenário criado; os parâmetros, carga de trabalho e os fatores dos experimentos; e por fim, as métricas a serem analisadas.

**Tabela 2 Planejamento da Avaliação Experimental**

<b>Objetivos do experimento</b>	1) Avaliar a cobertura da missão fornecida aos UAs para tarefas de monitoramento; 2) Medir o consumo de energia total e por UAs; 3) Avaliar métricas de desempenho de rede ( throughput, perda de pacotes) quando integrados à arquitetura O-RAN.
<b>Sistema e componente em teste</b>	Sistema completo: UAs com perfil de mobilidade e consumo energético, integrados à arquitetura O-RAN. Componentes avaliados: funções de controle adaptativo do RIC e coleta de métricas de desempenho.
<b>Parâmetros do sistema</b>	<b>Fixos:</b> área de missão: raio 6 km; altitude 50 m; velocidade 20 m/s; alcance 100 m; duração de vídeo 30 s; potência TX 46 dBm (máx 50 dBm); intervalo KPI 5 s. <b>Variáveis:</b> Número de UAs {4, 8, 12}; modo O-RAN/RIC {off, on-adapt}.
<b>Workload (carga de trabalho)</b>	Transmissão de vídeo dos UAs para a estação base durante eventos de gravação em PoIs; mobilidade dos drones baseada em arquivo CSV com eventos planejados (mover, gravar, pousar); rotas definidas por algoritmo otimizador considerando restrições energéticas e de cobertura.
<b>Fatores do sistema e da carga de trabalho</b>	Número de UAs e política do RIC (presença/ausência de controle adaptativo).
<b>Variáveis de resposta (métricas)</b>	número de PoIs visitados vs. planejados; consumo PoI visitado (J); <i>throughput</i> médio (Mbps), <i>delay</i> médio (ms), taxa de perda de pacotes (%).

Para o cenário de testes, consideramos a cidade de Fortaleza-CE. Foram gerados 20 PoIs sintéticos em um raio de 6 KM referente ao ponto de partida (aqui definido como a Secretaria de Segurança Pública). Na Figura 1, são apresentados os 20 pontos de interesse gerados (em vermelho) e o ponto de partida e chegada (em azul).

##### 4.2. Clusterização e Otimização das rotas

Para a definição das rotas e divisão dos PoIs por drone, foi aplicada uma clusterização baseada no algoritmo *k-means* onde *k* correspondia ao número de drones disponíveis.

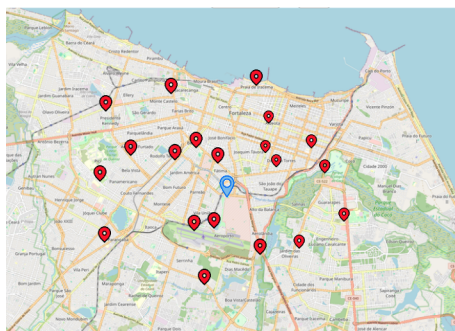


Figura 1 Cenário Fortaleza - Pontos de interesse.

Como entrada, o algoritmo recebe as coordenadas de cada ponto (latitude e longitude), e como saída é retornado a associação de cada PoI a um *cluster*, que corresponde a um determinado UA.

Para cada *cluster*, o problema de planejamento de rotas é modelado como um *Travelling Salesman Problem* (TSP), onde cada UA parte da base, visita todos os PoIs atribuídos ao seu *cluster* e, por fim, retorna à base. Com o TSP é possível avaliar todas as permutações disponíveis dos PoIs do *cluster*, enquanto a base permanece fixa como ponto inicial e final da rota. As distâncias entre pontos foram calculadas com a norma euclidiana no espaço latitude-longitude. O Algoritmo 1 apresenta o procedimento de otimização das rotas, combinando a divisão dos POIs em clusters via K-means e a determinação das rotas ótimas para cada drone através do TSP.

---

**Algoritmo 1:** Planejamento de Rotas com Clusterização e TSP

---

**Input:**  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ : conjunto de PoIs;

$b$ : ponto base;

$K$ : número de UAs disponíveis

**Output:**  $\mathcal{R} = \{R_1, R_2, \dots, R_K\}$ : conjunto de rotas otimizadas

Aplicar o algoritmo *K-means* sobre  $P$ , obtendo  $K$  clusters:

$\mathcal{C} = \{C_1, C_2, \dots, C_K\}$ , tais que  $\bigcup_i C_i = P$  e  $C_i \cap C_j = \emptyset, \forall i \neq j$ ;

**for**  $i \leftarrow 1$  **to**  $K$  **do**

Definir o conjunto de pontos  $S_i \leftarrow \{b\} \cup C_i$ ;

Resolver o Problema do Caixeiro Viajante (TSP) em  $S_i$ , minimizando:

$$\min \sum_{(u,v) \in R_i} d(u,v)$$

onde  $d(u, v)$  representa a distância euclidiana entre os pontos  $u$  e  $v$ , e  $R_i$  é uma rota fechada iniciando e terminando em  $b$ ;

Atribuir a rota ótima  $R_i$  ao UA  $i$ ;

**return**  $\mathcal{R} = \{R_1, R_2, \dots, R_K\}$ ;

---

Cada drone inicia a simulação com um nível de energia previamente definido entre o intervalo estabelecido. Para cada rota, são calculados o tempo de voo, de acordo com a distância e a velocidade dos drones (*drone\_speed*); consumo energético de deslocamento, proporcional ao tempo de voo e à potência (*power\_consumption*); e o consumo fixo associado à gravação de vídeo no PoI (*consumo\_video*).

A energia total necessária para visitar um PoI inclui o deslocamento até o ponto, a gravação e o retorno à base. Então, se a energia disponível é suficiente para completar toda a visita, o evento de gravação é executado integralmente; se a energia é suficiente apenas para deslocamento e gravação, respeitando uma reserva de segurança, é permitida uma visita parcial; caso contrário, o UA retorna imediatamente à base.

A Figura 2 apresenta as rotas otimizadas dos UAs para diferentes quantidades de UAs no cenário de monitoramento urbano. É possível notar que, à medida que o número de UAs aumenta, as regiões de responsabilidade se tornam menores, o que resulta em trajetórias mais curtas e melhor balanceamento espacial entre os drones. Isso impacta diretamente no consumo energético e no tempo necessário para a cobertura dos PoIs. As informações das rotas de cada UA, contendo a distância percorrida, o tempo e a energia final dos drones, foram salvas para serem implementadas no IoD\_Sim.

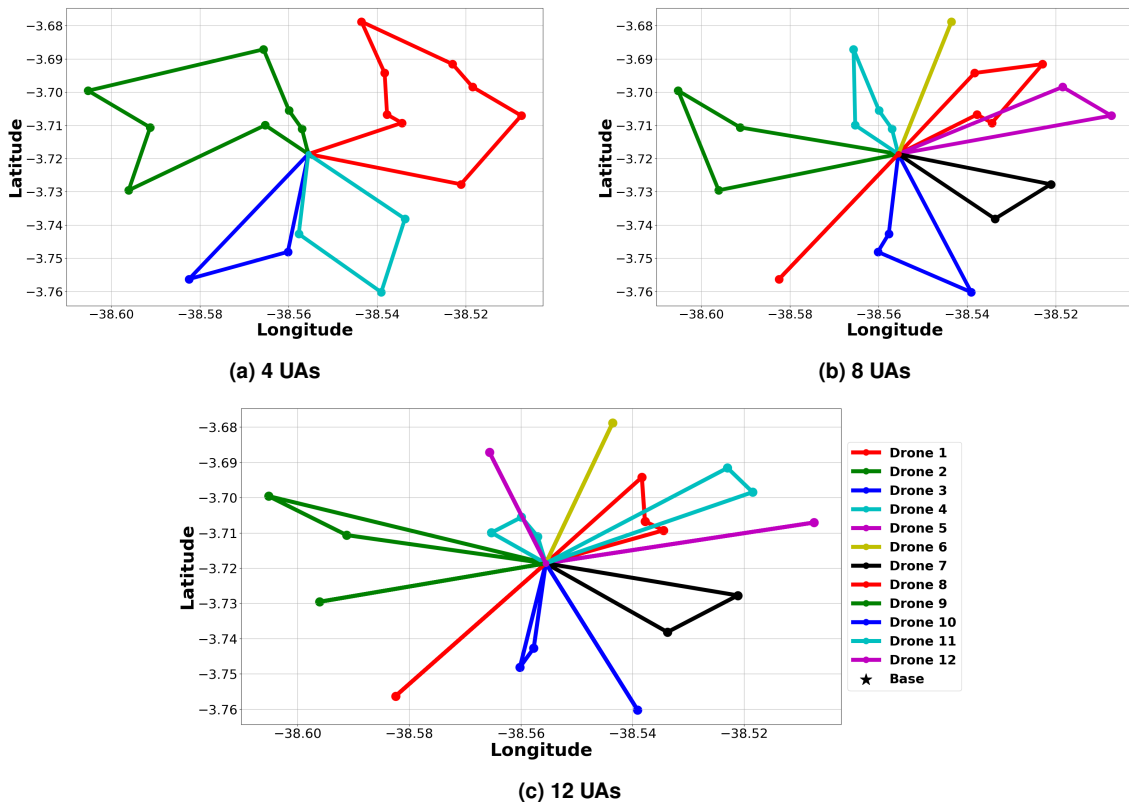


Figura 2 Rotas otimizadas para diferentes quantidades de UAs.

### 4.3. Resultados

Com as rotas definidas e o ambiente configurado no simulador, os experimentos foram executados para observar a cobertura dos PoIs com as diferentes quantidades de UAs. Outro ponto foi avaliar o impacto do uso do RIC na rede e quais possíveis benefícios ele pode trazer. Na Figura 3, são apresentados os resultados dos PoIs monitorados com 4, 8 e 12 UAs sem o uso de RIC. Em cada configuração, os PoIs são divididos em visitados (que correspondem aos pontos que os drones monitoraram por 30s), representados pelos pontos verdes; visitados parcialmente (quando o drone precisa retornar imediatamente à base, sem concluir o monitoramento) representado pela cor amarela; e, não visitados (que

indica que o drone teve que retornar a base antes de chegar ao ponto), representado pela cor vermelha.

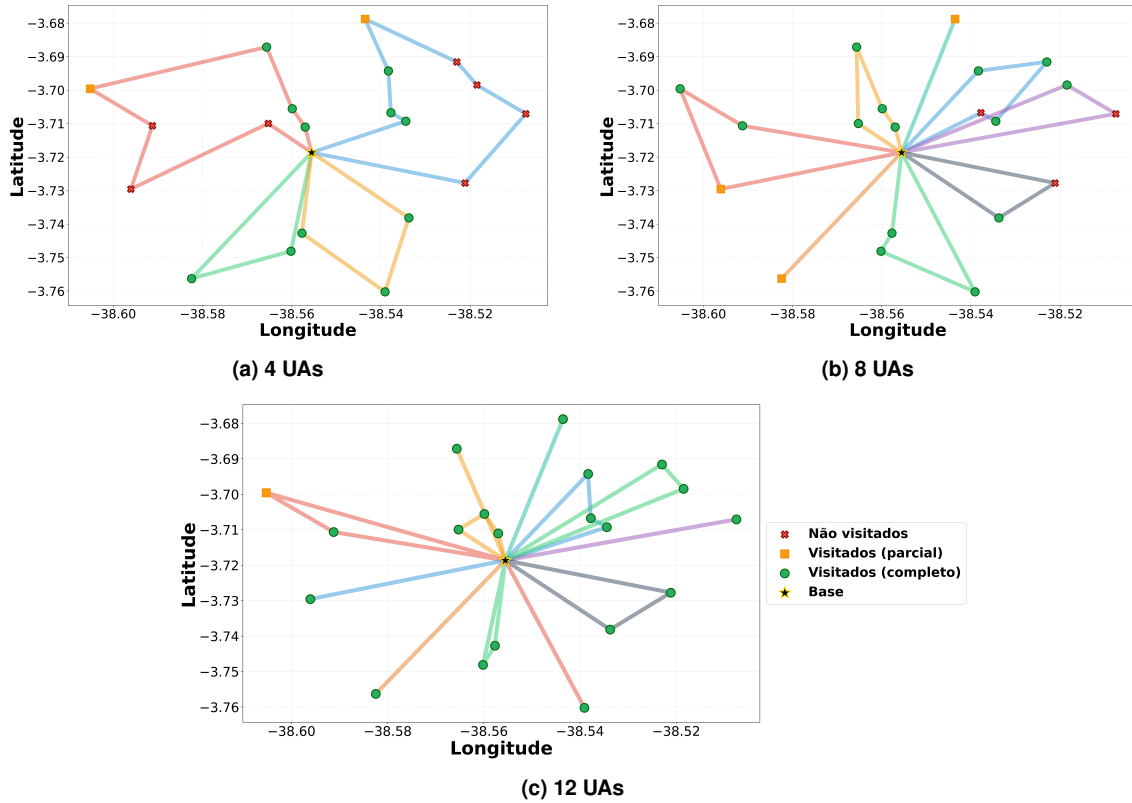


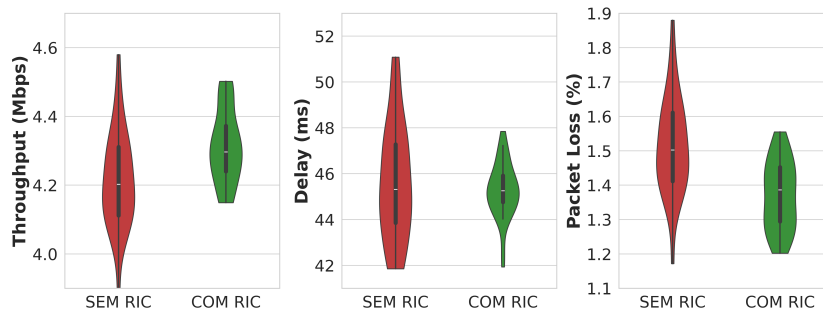
Figura 3 Pols Visitados - Sem RIC.

Para garantir rigor estatístico e reduzir o efeito da aleatoriedade das simulações baseadas no ns-3, cada cenário experimental foi executado 33 vezes, utilizando sementes aleatórias diferentes. As métricas de desempenho de rede, consumo energético e cobertura da missão foram coletadas em todas as execuções e agregadas para análise estatística. Os resultados são apresentados a seguir por meio de *Violin plot*, que representam a distribuição dos dados considerando todas as execuções, e mostram a mediana, a dispersão dos dados e os *outliers*.

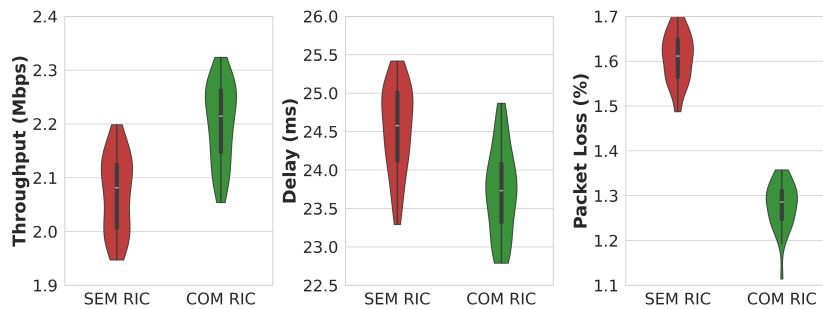
As Figuras 4, 5 e 6 apresentam o impacto do sistema RIC no desempenho da rede, avaliada aqui por meio do *throughput*, latência e taxa de perda de pacotes para diferentes quantidades de UAVs. Quanto ao *throughput*, é possível observar que a implementação do RIC (representado pela cor verde) preserva ou aumenta levemente a taxa de transmissão em Mbps por drone. Esse mesmo comportamento é observado inclusive com o aumento no número de drones. Além de apresentar os dados das execuções por drone, as figuras ainda trazem as médias dos drones obtidas durante as execuções.

Quanto à estabilidade da conexão, os gráficos de perda de pacotes mostram melhora consistente com o RIC. A latência apresenta melhoria significativa apenas com 8 e 12 UAVs, conforme Tabela 3.

Para verificar se as diferenças observadas entre os cenários com e sem RIC são estatisticamente significativas, foi aplicado o teste não paramétrico de Wilcoxon signed-



**Figura 4 Avaliação da rede com 4 UAs.**



**Figura 5 Avaliação da rede com 8 UAs.**

rank. Foram realizadas 33 execuções independentes e, em cada execução, foi calculado as médias das métricas por cenário. O teste foi então aplicado sobre essas médias, sem assumir normalidade dos dados. Os resultados mostram que, no cenário com 4 UAs, o uso do RIC resulta em melhorias estatisticamente significativas no *throughput* e na taxa de perda de pacotes, enquanto não há diferença significativa no atraso. Nos cenários com 8 e 12 UAs, diferenças estatisticamente significativas são observadas para todas as métricas analisadas, indicando que os benefícios do RIC se tornam mais evidentes à medida que a densidade de UAs aumenta.

**Tabela 3 Resultados do teste de Wilcoxon (p-value)**

Drones	Throughput	Delay	Packet loss
4	0,0178	0,5965	0,0002
8	0,011	0,027	0,0008
12	0,0005	0,0007	0,0004

Embora o uso do RIC resulte na visitação de um maior número de PoIs, os resultados indicam uma redução no consumo médio de energia por tarefa realizada. No cenário com 4 UAs, observa-se uma economia aproximada de 2,2% no consumo energético por PoI quando comparado ao cenário sem RIC. Para 8 UAs, o ganho é maior, com uma redução de cerca de 10,5%, enquanto no cenário com 12 UAs a economia permanece significativa, em torno de 9,3%. Esses resultados sugerem que o controle exercido pelo RIC contribui para uma melhor coordenação da mobilidade dos UAs e para uma utilização mais eficiente dos recursos de rede, reduzindo deslocamentos redundantes, períodos de hovering improdutivo e retransmissões associadas a condições adversas de comunicação. Como consequência, cada visita a um PoI é realizada de forma mais eficiente do ponto de vista energético. A normalização do consumo em Joules por PoI permite, assim, uma

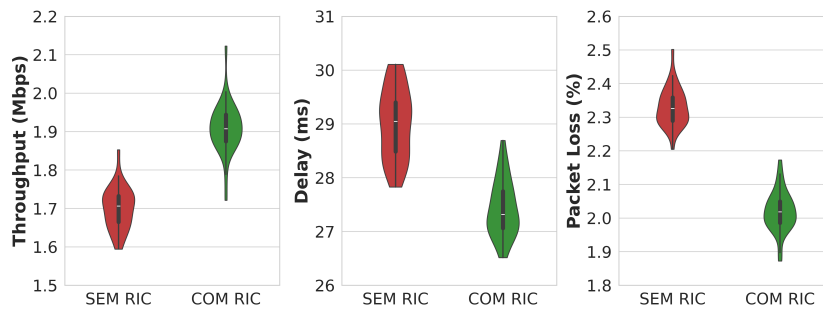


Figura 6 Avaliação da rede com 12 UAs.

comparação justa entre os cenários, evidenciando que o RIC aumenta a eficiência operacional do sistema, mesmo quando a carga total de trabalho é superior.

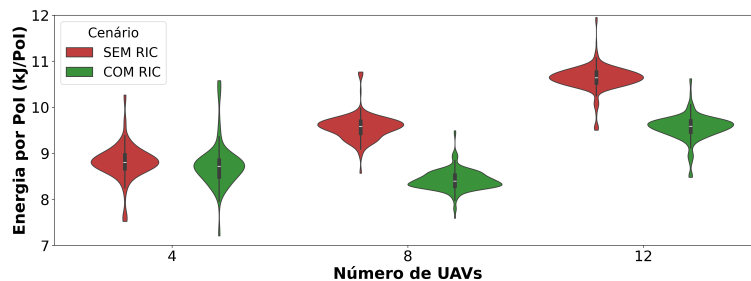


Figura 7 Consumo de Bateria COM e SEM RIC.

Com o uso do RIC visando a economia de bateria, há um acréscimo no número de PoIs visitados. Na Figura 8 é possível observar que, no cenário de 4 UAVs, os pontos anteriormente visitados de forma parcial conseguem ser visitados de forma integral, além do monitoramento de 2 novos pontos. O mesmo ocorreu no cenário com 8 UAVs, onde existiam 17 PoIs visitados (sendo 3 visitados parcialmente), e com o RIC esse número passou para 19. No cenário com 12 UAVs, apenas um PoI não havia sido visitado completamente, o que tornou-se possível com o uso do RIC.

#### 4.4. Discussão

Os resultados obtidos mostram que o RIC na arquitetura O-RAN melhora a coordenação da rede, gerando uma melhoria no desempenho da rede, eficiência energética e cobertura de monitoramento em cenários com múltiplos UAVs (4, 8 e 12). O controle adaptativo possibilita que os *handovers* e ajustes de potência deixem as associações entre UAVs e eNBs mais estáveis, mantendo o throughput mesmo com aumento do número de drones e reduzindo retransmissões e variações de latência.

Com menos perdas de pacotes e atrasos, a bateria é usada de forma mais eficiente, resultando em redução no gasto total, variando conforme a quantidade de drones. Consequentemente, a capacidade de monitoramento aumenta, permitindo que UAVs completem visitas a PoIs que, sem o RIC, seriam realizadas parcialmente ou não concluídas.

É importante destacar que nem sempre os ganhos aumentam à medida que adicionamos mais UAVs. Em cenários com maior quantidade de drones, a redução no consumo de energia tende a ser menor, considerando que a própria redundância espacial e a distância

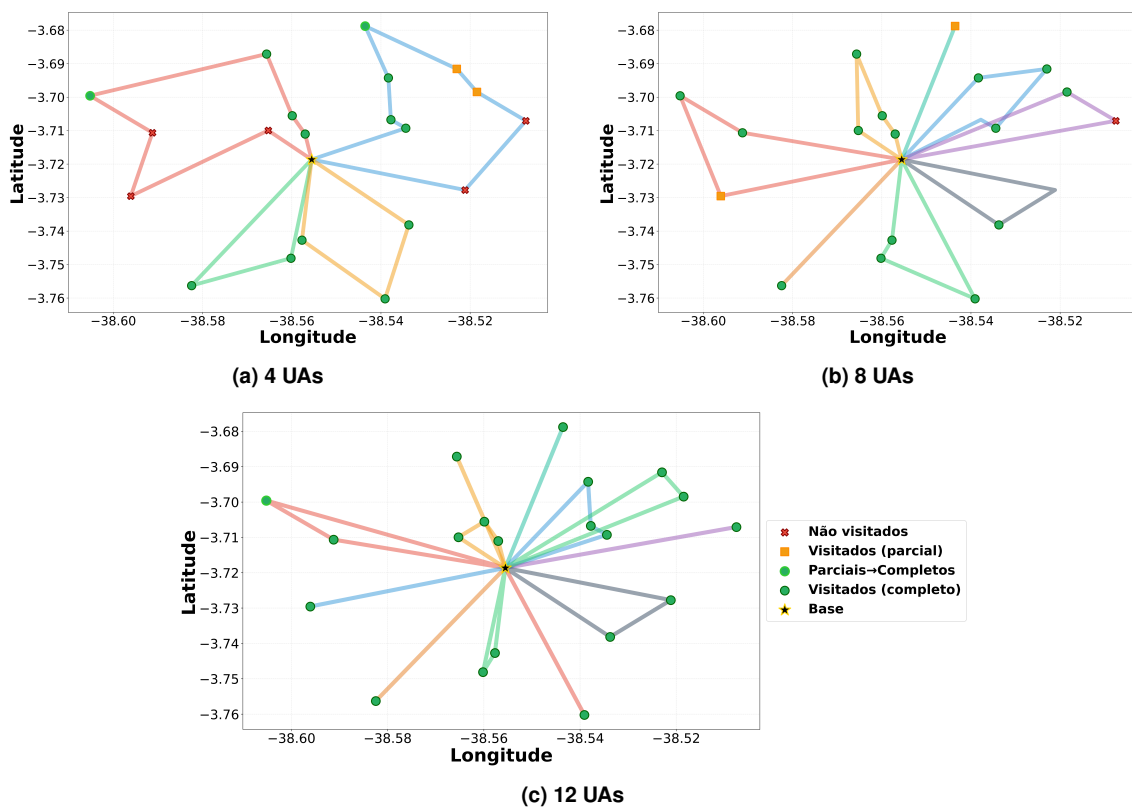


Figura 8 Pols Visitados - Com RIC.

percorrida por cada drone limitam o efeito do RIC na rede. Isso mostra que a energia, mobilidade e desempenho de rede precisam ser avaliados juntos, já que melhorar em um aspecto nem sempre gera ganhos proporcionais nos outros. Outro ponto importante é que o modelo de simulação não considera os efeitos do terreno urbano nem utiliza distância geodésica no planejamento de rotas. A distância euclidiana em lat-lon foi usada como aproximação.

## 5. Conclusão

Este trabalho apresentou uma avaliação experimental do uso da arquitetura O-RAN no monitoramento urbano com UAs, considerando métricas de desempenho de rede, consumo energético e cobertura. A partir de simulações realizadas com o IoD-Sim sobre o ns-3, analisou-se o impacto da atuação de um controlador RIC baseado em regras heurísticas no controle da comunicação entre UAs e eNBs, sem alterações no planejamento de mobilidade.

Os resultados indicam que a atuação do RIC melhora o desempenho da rede, reduzindo a latência e a taxa de perda de pacotes, ao mesmo tempo em que preserva o throughput por UA e reduz o consumo energético entre 2,2% e 10,5% por PoI visitado, dependendo da quantidade de UAs em operação. Entretanto, observou-se que esses ganhos diminuem à medida que o número de UAs aumenta, evidenciando limitações de escalabilidade associadas ao maior tráfego de sinalização e à crescente complexidade da rede em cenários mais densos.

Como trabalhos futuros, pretende-se avaliar o impacto das mensagens de KPIs

no canal de controle da rede, investigando diferentes intervalos de coleta e estratégias de agregação de métricas, de forma a quantificar o custo de sinalização introduzido pelo RIC. Além disso, planeja-se comparar o controle heurístico adotado neste trabalho com técnicas mais complexas, como abordagens baseadas em algoritmos de aprendizado, permitindo comparar a complexidade, escalabilidade, desempenho de rede e eficiência energética.

## Referências

- Feitosa, L., Barbosa, V., Bittencourt, L., Oliveira, F., Junior, J. R., and Silva, F. (2025). Entregas aéreas por drones: Uma avaliação de desempenho considerando colisões dos drones e logística de reparo. In *Anais do XLIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pages 546–559, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.
- Hilario, B. A., Passos, D., and Guerra, R. (2023). Arquitetura de simulação de missões com drones com aspectos mais realistas de comunicação ar-terra. In *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*, pages 99–112. SBC.
- Kong, X., Ni, C., Duan, G., Shen, G., Yang, Y., and Das, S. K. (2024). Energy consumption optimization of uav-assisted traffic monitoring scheme with tiny reinforcement learning. *IEEE Internet of Things Journal*, 11(12):21135–21145.
- Li, H., Tang, X., Zhai, D., Zhang, R., Li, B., Cao, H., Kumar, N., and Almogren, A. (2024). Energy-efficient deployment and resource allocation for o-ran-enabled uav-assisted communication. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 8(3):1128–1140.
- Lucchesi, L., Endler, M., and de Souza, B. J. O. (2024). Dynamic effects of communication delay, failure rates, and speed on uav swarm formation. In *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*, pages 588–601. SBC.
- Mahboob, S., Dai, J., Soysal, A., and Liu, L. (2025). Transforming future 6g networks via o-ran-empowered ntns. *IEEE Communications Magazine*.
- Mara, S. T. W., Norcahyo, R., Jodiawan, P., Lusiantoro, L., and Rifai, A. P. (2022). A survey of adaptive large neighborhood search algorithms and applications. *Computers & Operations Research*, 146:105903.
- Mohsan, S. A. H., Othman, N. Q. H., Li, Y., Alsharif, M. H., and Khan, M. A. (2023). Unmanned aerial vehicles (uavs): Practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends. *Intelligent service robotics*, 16(1):109–137.
- Niknam, S., Roy, A., Dhillon, H. S., Singh, S., Banerji, R., Reed, J. H., Saxena, N., and Yoon, S. (2022). Intelligent o-ran for beyond 5g and 6g wireless networks. In *2022 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pages 215–220. IEEE.
- Sun, C., Chetty, S. B., Fontanesi, G., Zhang, J., Mohajerzadeh, A., Grace, D., and Ahmadi, H. (2025). Energy consumption reduction for uav trajectory training: A transfer learning approach. In *2025 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pages 1–6. IEEE.
- Zhou, B., Liu, W., and Yang, H. (2023). Unmanned aerial vehicle service network design for urban monitoring. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 157:104406.