

Simulador de Rede Multi-Hop de Drones com Estimativa Dinâmica de Qualidade de Links Utilizando Pygame

Velcides Galvão Mezzomo¹, Otávio Noura Teixeira (Orientador)¹

¹Faculdade de Engenharia de Computação – Universidade Federal do Pará (UFPA)
Tucuruí – PA – Brasil

{velcidesufpa, onoura}@gmail.com

Abstract. *This paper presents a 2D visual simulator developed using Pygame for multi-hop drone networks in line topologies. The tool implements a Packet Delivery Ratio (PDR) wireless link model (R, α) and a Time Division Multiple Access (TDMA) protocol to coordinate transmissions and mitigate link asymmetries. The system evaluates Equidistant and Equal-PDR positioning strategies across four channel scenarios: (a) no changes; (b) small abrupt change; (c) large abrupt change; and (d) gradual change. Additionally, it supports dynamic relay addition by the Base Station based on quality thresholds. Results demonstrate the superiority of the Equal-PDR strategy, which maintained a stable PDR above 63% across all scenarios. In contrast, the Equidistant approach dropped to 52.3% under high interference in the worst-case scenario (Scenario C).*

Resumo. *Este trabalho apresenta um simulador visual 2D desenvolvido utilizando Pygame para redes de drones multi-salto em topologia de linha. A ferramenta implementa um modelo de Taxa de Entrega de Pacotes (PDR) do link sem fio (R, α) e um protocolo de Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo (TDMA) para coordenar transmissões e mitigar assimetrias de link. O sistema avalia as estratégias Equidistante e Equal-PDR sob quatro cenários de canal: (a) sem mudanças; (b) pequena mudança abrupta; (c) grande mudança abrupta; e (d) mudança gradual. Adicionalmente, suporta a adição dinâmica de repetidores pela Estação Base conforme limiares de qualidade. Os resultados comprovam a superioridade da estratégia Equal-PDR, que manteve a taxa de entrega de pacotes (PDR) estável acima de 63% em todos os cenários. Em contraste, a abordagem Equidistante sofreu degradação significativa, atingindo 52,3% sob forte interferência no pior cenário (Cenário C).*

1. Introdução

O uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) expandiu-se drasticamente nos últimos anos, tornando-se uma tecnologia fundamental para o monitoramento de infraestruturas críticas, operações de busca e salvamento e vigilância em áreas remotas [Bisogni 2023]. Em muitos desses cenários, é essencial que o drone realize a captura de dados e os transmita em tempo real para uma estação base (como streaming de vídeo), permitindo o controle interativo por um operador. No entanto, o alcance limitado das tecnologias de comunicação sem fio impõe restrições severas à distância operacional [Pinto 2018].

Para superar essa limitação, a literatura propõe o uso de redes multi-salto classificadas como FANETs (Flying Ad-hoc NETWORKs), onde drones intermediários atuam

como repetidores para formar uma cadeia de comunicação. Embora essa topologia estenda o alcance, ela introduz desafios complexos: o meio sem fio é inerentemente instável e os links são frequentemente assimétricos devido a obstáculos, orientação das antenas e interferências locais [Pinto 2018]. Estratégias simples de posicionamento, como a distribuição equidistante dos drones, tendem a falhar nesses ambientes, resultando em congestionamento de buffers (backlog), atrasos excessivos e perda severa de pacotes [Pinto 2018, Bisogni 2023].

As FANETs são redes sem fio auto-organizadas compostas por grupos de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) ou drones que colaboram entre si sem a necessidade de uma infraestrutura fixa preexistente [Kaur et al. 2021].

Pesquisas anteriores estabeleceram modelos probabilísticos para descrever a Taxa de Entrega de Pacotes (PDR) em função da distância e de parâmetros de canal sem fio (R e α) [Pinto et al. 2017b]. [Pinto 2018] propôs o protocolo Dynamic Relay Placement (DRP) para equilibrar a qualidade dos links, enquanto [Bisogni 2023] avançou na estimativa dinâmica e detecção de mudanças nesses modelos para permitir que a rede se adapte a variações súbitas do canal. Todavia, a validação desses algoritmos em hardware real é custosa e complexa, exigindo ferramentas de simulação robustas que mimetizem o comportamento físico e a coordenação de acesso ao meio.

Diante deste cenário, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um simulador visual 2D em Pygame, projetado especificamente para avaliar estratégias de posicionamento e estimativa de qualidade de links em redes de drones multi-salto. A ferramenta implementa um protocolo TDMA para mitigar interferências mútuas e garantir a pontualidade das entregas [Pinto et al. 2017a]. O simulador permite comparar o desempenho da estratégia Equidistante frente à estratégia Equal-PDR sob quatro cenários dinâmicos: (a) sem mudanças; (b) pequena mudança abrupta; (c) grande mudança abrupta; e (d) mudança gradual [Bisogni 2023]. Dessa forma, o sistema oferece uma plataforma para análise detalhada do PDR de ponta a ponta e do comportamento das filas em ambientes com canais instáveis.

2. Fundamentação Teórica

2.1. Redes Multi-Hop

As redes de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) que se organizam de maneira autônoma para estabelecer comunicação sem fio são categorizadas como FANETs (Flying Ad-hoc NETWORKs) [Pasandideh et al. 2022]. Essas redes são consideradas uma evolução das redes ad-hoc móveis (MANETs) e veiculares (VANETs), distinguindo-se principalmente pela alta mobilidade dos nós em um espaço tridimensional e pela rapidez com que a topologia da rede se altera [Kaur et al. 2021, Pasandideh et al. 2022].

Em cenários de monitoramento remoto onde o drone sensor precisa operar além do alcance direto da Estação Base (BS), torna-se necessário o uso de redes multi-hop (multi-salto). Nessa configuração, drones intermediários são posicionados para atuar como repetidores (relays), formando uma cadeia que encaminha os pacotes de dados da fonte (Sensor) até o destino final (BS) [Pinto 2018].

Essa arquitetura é ilustrada na Figura 1, que apresenta a visão de uma rede sensorial aérea multi-salto realizando o streaming de dados para uma estação base por meio de

UAVs repetidores. No diagrama, observa-se o drone sensor operando em uma Área de Interesse (AoI) e transmitindo informações para a BS através de uma cadeia de repetidores (identificados como R1, R2 e R3), que têm a função de estender o alcance operacional da rede. Este modelo garante que o fluxo de dados percorra cada link de forma ordenada até o destino, superando as limitações de distância e garantindo a interatividade necessária para o controle do operador na estação base.

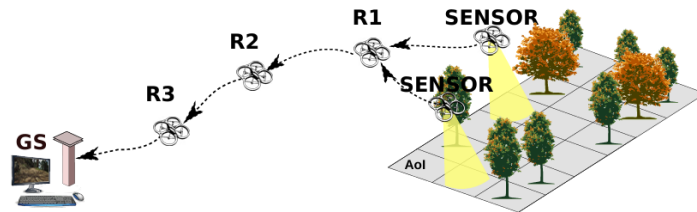


Figura 1. Representação de uma rede multi-hop de drones. [Pinto et al. 2018]

2.2. Topologia de Rede em Linha

Neste trabalho os drones são organizados em uma topologia de rede em linha, na qual os agentes são arranjados em uma sequência linear onde cada nó se comunica diretamente apenas com seus vizinhos imediatos. Essa configuração é composta por três tipos de agentes com funções distintas:

- **Fonte (Source):** O nó de sensoriamento localizado em uma das extremidades, responsável por gerar o fluxo de dados (ex: vídeo).
- **Repetidores (Relays):** Agentes intermediários que operam em um esquema de comunicação multi-salto para encaminhar os pacotes da fonte até o destino.
- **Estação Base (BS):** Localizada na extremidade oposta à fonte, é o ponto remoto fixo dedicado a receber e processar os dados coletados.

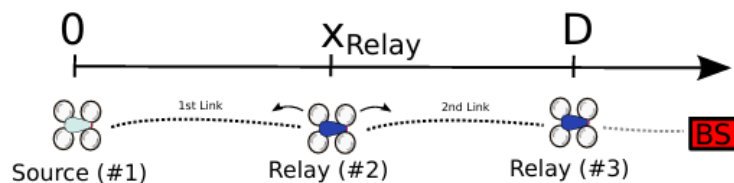


Figura 2. Vista superior de uma rede multi-hop em linha, composta por uma fonte (Source #1), dois repetidores (Relay #2 e #3) e uma Estação Terrestre (BS). [Pinto et al. 2017b]

2.3. Taxa de Entrega de Pacotes (PDR)

A Taxa de Entrega de Pacotes (PDR - Packet Delivery Ratio) é uma métrica de desempenho que avalia a Qualidade de Serviço (QoS) de uma rede ao medir a proporção de pacotes entregues com sucesso ao seu destino em relação ao total de pacotes enviados. Um valor de PDR elevado indica uma entrega de dados eficiente, enquanto valores baixos revelam uma performance degradada devido a perdas no canal sem fio [Bisogni 2023].

2.3.1. Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo (TDMA)

Para evitar colisões e garantir a pontualidade na entrega de fluxos de dados intensos, como vídeo em tempo real, o sistema utiliza o Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo (TDMA - Time-Division Multiple Access) [Pinto et al. 2017b]. O TDMA organiza as transmissões dividindo o tempo em rodadas periódicas de duração fixa T , onde cada enlace possui um slot exclusivo (s_i) para transmitir [Bisogni 2023].

Conforme implementado no simulador deste trabalho e em conformidade com o estudo de caso de referência, utilizou-se um período de rodada TDMA (T) de 200 ms. Essa periodicidade permite que os nós sincronizem suas transmissões de forma distribuída, ajustando a fase dos slots para minimizar sobreposições e interferências mútuas [Bisogni 2023].

2.3.2. Cálculo do PDR

A mensuração do PDR ocorre de forma instantânea em cada rodada TDMA. O PDR do link entre um nó emissor i e um nó receptor j no instante k é definido pela razão entre o número de pacotes recebidos (N_r) e o número de pacotes enviados (N_s), conforme a Equação 1 [Bisogni 2023]:

$$P_{i,j}(k_j) = \frac{N_j^{(r)}(k_j)}{N_i^{(s)}(k_j)} \quad (1)$$

Para uma rede multi-salto em linha, o PDR de rede (P_{net} ou end-to-end PDR) representa a probabilidade de um pacote atravessar todos os saltos com sucesso. Assumindo a independência dos links garantida pelo isolamento do TDMA, o PDR de rede é o produto dos PDRs individuais de cada link, definido pelas Equações 2 e 3 [Bisogni 2023]:

$$P_{net}(d) = \prod_{e_i \in E} P_{e_i}(d_{e_i}) \quad (2)$$

$$d = [d_{e_1} \ \dots \ d_{e_{n-1}}] \quad (3)$$

Onde:

- **$P_{net}(d)$:** É o PDR da rede (também chamado de PDR end-to-end ou de ponta a ponta). Representa a probabilidade total de um pacote de dados atravessar com sucesso todos os links da cadeia, desde o drone fonte até a Estação Base.
- **$P_{e_j}(d_{e_j})$:** É a Taxa de Entrega de Pacotes do link individual e_j . Este valor é uma probabilidade (entre 0 e 1) que depende do comprimento específico desse link (d_{e_j}) e das condições do meio (parâmetros R e α).
- **d :** É o vetor de comprimentos dos links. Ele agrupa as distâncias de todos os segmentos da cadeia em uma única entidade matemática para fins de otimização.

2.3.3. Modelo de PDR do Link Sem Fio

A qualidade da comunicação em um link sem fio entre drones é severamente influenciada pela distância física entre os agentes. Para modelar essa relação, este trabalho adota o modelo matemático proposto por [Pinto et al. 2018], que descreve a probabilidade P de entrega de um pacote em um link individual como uma função da distância d , conforme a Equação 4:

$$P_{i,j}(d_{i,j}) = e^{-\log(2)\left(\frac{d_{i,j}}{R_{i,j}}\right)^{\alpha_{i,j}}} \quad (4)$$

Nesta formulação, o modelo é governado por dois parâmetros fundamentais que caracterizam as condições do canal:

- **R (Alcance Crítico):** Representa a distância na qual a probabilidade de entrega de pacotes é de exatamente 50%. Links com maiores valores de R possuem uma capacidade de alcance superior.
- **α (Expoente de Decaimento):** Define a inclinação da curva de queda do sinal. Valores elevados de α indicam que o link permanece estável por distâncias maiores, mas sofre uma degradação extremamente abrupta ao se aproximar do limite R .

Diferente de modelos teóricos que assumem propagação isotrópica, a aplicação prática deste modelo revela que os links são inerentemente assimétricos [Pinto et al. 2018]. Essa assimetria decorre de obstáculos físicos, interferência eletromagnética local e, principalmente, da orientação e ganho das antenas dos drones [Pinto 2018]. No simulador, este modelo é a base para a implementação das estratégias de posicionamento, permitindo que os repetidores prevejam o PDR teórico e ajustem suas coordenadas para compensar as variações do ambiente e maximizar a eficiência da rede de ponta a ponta [Bisogni 2023].

3. Metodologia

Este capítulo descreve a arquitetura do simulador desenvolvido, as ferramentas tecnológicas utilizadas e a lógica de execução dos protocolos de rede e movimentação dos agentes. O sistema foi projetado para mimetizar as condições de rede de drones em linha, permitindo a validação de algoritmos de posicionamento sob variações dinâmicas de canal [Pinto 2018, Bisogni 2023].

3.1. Software de Simulação

O simulador foi construído utilizando a linguagem Python 3.10+ [Python Software Foundation 2026], utilizando a biblioteca Pygame para a renderização visual. A escolha do Pygame [Pygame Developers 2026] justifica-se pela sua eficiência em lidar com simulações baseadas em passos de tempo (time-steps) e pela facilidade de visualização das interações entre os nós em tempo real. Operações matriciais e cálculos de vetores de movimento foram processados com a biblioteca NumPy [NumPy Developers 2026]. O software foi implementado tendo como base os projetos desenvolvidos por Pinto e Bisogni.

3.1.1. Parâmetros de Simulação

A configuração do simulador é regida pela classe SimConfig, que centraliza as variáveis operacionais para garantir a reprodutibilidade dos testes. O número total de drones é definido pelo parâmetro `n_drones`, configurado como 6 agentes para compor a rede em linha. Seguindo a lógica do sistema, o drone Fonte (Source) é sempre designado pelo último identificador da cadeia (`source_id = n_drones - 1`), enquanto os demais atuam no como de repetidores. A Base Station, localizada no centro do mapa, gerencia a ativação dinâmica desses repetidores: a simulação inicia com zero repetidores ativos (`initial_relays_active = 0`), e a BS insere novos nós conforme o PDR do link upstream (drone vizinho posterior) cai abaixo de 0,90 (`upstream_pdr_min`) ou quando são detectadas 10 rodadas de silêncio (`upstream_tau_p_rounds`) [Bisogni 2023].

O ambiente virtual possui dimensões fixas (1200x1000 pixels) para comportar a trajetória semicircular de 400 metros de raio. A escala é definida em 1 pixel para cada 1 metro (`px_per_meter = 1.0`), garantindo que as distâncias calculadas no canal sem fio correspondam à visualização 2D.

Os drones operam com uma velocidade máxima (`max_speed`) de 2,8 m/s. Ao entrar em modo de retorno, o simulador aplica uma redução gradual de velocidade quando o drone está a menos de 220 metros da Estação Base (`rtb_slowdown_radius`), com um ajuste final ("snap") quando atinge o raio de 8,0 metros para pouso preciso.

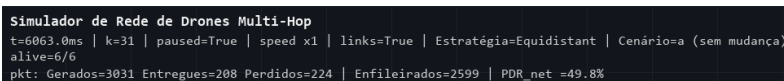
O acesso ao meio é parametrizado com uma rodada total (`tdma_round_ms`) de 200 ms. Dentro dessa janela, cada pacote leva 2,0 ms para ser transmitido (`tdma_pkt_tx_ms`), e o drone fonte gera novos dados exatamente nesse mesmo intervalo de 2,0 ms, cada pacote contém uma mensagem simples "Hello, GroundStation".

A ativação das estratégias de movimento é feita via `flaBS` booleanas (`MODE_EQUIDISTANT` ou `MODE_EQUAL_PDR`), ou seja, `true` ou `false`. Da mesma forma, os cenários de mudança de canal ('b', 'c' ou 'd') são habilitados individualmente, permitindo testar a reação do sistema a mudanças abruptas ou graduais. Quando nenhum dos cenários estiver como `true`, será utilizado o cenário 'a'.

Cada drone possui uma bateria configurada com carga total de 100 unidades. O consumo é parametrizado pelo custo de 0,01 unidades por pixel voado, permitindo simular restrições de autonomia durante a execução da missão.

3.1.2. Interface

O simulador possui uma interface simples na qual é exibida a trajetória percorrida pelos drones, demonstrada na Figura 3, 4 e 5.



```
Simulador de Rede de Drones Multi-Hop
t=6063.0ms | k=31 | paused=True | speed x1 | links=True | Estratégia=Equidistant | Cenário=a (sem mudança)
alives=6/6
pkt: Gerados=3031 Entregues=208 Perdidos=224 | Enfileirados=2599 | PDR_net =49.8%
```

Figura 3. Interface do Simulador Parte Superior. Fonte: Autor

A parte superior da interface do simulador monitora em tempo real o status operacional e as métricas de desempenho da simulação. Ela apresenta parâmetros como o

tempo decorrido (t) em milissegundos e o índice da rodada TDMA atual (k), além de estados de execução como o multiplicador de velocidade, a indicação de pausa e a visibilidade dos enlaces (links) entre os drones. A interface detalha as configurações ativas, exibindo a estratégia de posicionamento utilizada (Equidistante ou Equal-PDR) e o cenário de simulação (a, b, c ou d), bem como o número de drones operacionais na frota (alive). Adicionalmente, são fornecidas métricas vitais de tráfego de dados, informando o total de pacotes gerados pela fonte, os entregues à estação base, os perdidos devido a falhas no canal sem fio e os enfileirados nos buffers de transmissão, finalizando com o valor da PDR_{net} , que expressa a Taxa de Entrega de Pacotes global da rede de ponta a ponta.

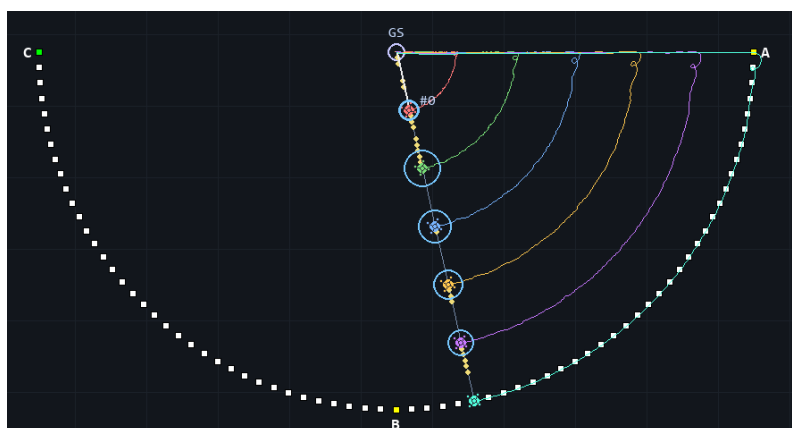


Figura 4. Interface do Simulador Parte Central. Fonte: Autor

Na parte central da interface temos a trajetória percorrida pelos drones, onde alguns elementos gráficos foram implementados para facilitar a visualização, cada drone possui uma cor que define a cor do tracejado que será a rota percorrida pelo mesmo. Durante a execução, quadrados amarelos transitam entre os links simulando o encaminhamento de pacotes entre os nós da rede.

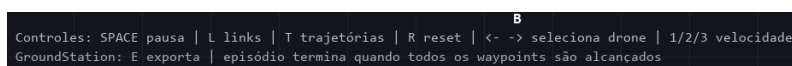


Figura 5. Interface do Simulador Parte Inferior. Fonte: Autor

Na parte inferior temos os comandos disponíveis, tecla espaço pausa a simulação, L exibe/oculta os links entre os drones, T exibe/oculta trajetórias, R reinicia a simulação, seta para direita/esquerda seleciona o drone exibindo seu número, 1/2/3 aumenta/diminui a velocidade e por fim E exporta os dados em CSV e JSON no momento atual. Ao fim de cada simulação os dados são exportados automaticamente.

3.2. Trajetória

Em nossas simulações a fonte segue a trajetória determinística proposta em [Bisogni 2023], composta por 73 waypoints pré-definidos formando um semicírculo (arco $A \rightarrow B \rightarrow C$), gerando o tráfego de pacotes que serão encaminhados pelos relays para a BS.

Os repetidores irão se mover dinamicamente conforme as estratégias de posicionamento definidas, e será adicionado um novo relay a rede sempre que o PDR total

da rede for menor que 90%, esse valor é adotado para assegurar que a rede se expanda preventivamente, antes que a qualidade do sinal degrade a um ponto que comprometa a interatividade do operador ou o fluxo de dados em tempo real. A quantidade de drones estabelecida é de 6 drones incluindo a Source, pois notou-se que quanto maior quantidade de drones, maior será o delay [Bisogni 2023]. Ao fim da trajetória, todos os drones retornam para a estação base.

3.3. Estratégias de Posicionamento

A alocação de repetidores consiste na estratégia de determinar as coordenadas espaciais dos nós intermediários com o objetivo de elevar a Qualidade de Serviço (QoS) da rede, focando especialmente na manutenção da conectividade e na otimização da taxa de entrega de pacotes [Bisogni 2023]. Em redes de drones, o posicionamento adequado é um desafio crítico, pois as ligações sem fio são inerentemente instáveis e frequentemente assimétricas devido a fatores como a distância física, interferência eletromagnética localizada e a orientação das antenas durante o voo [Pinto et al. 2018].

Embora a literatura apresente abordagens complexas para a maximização teórica do PDR de rede, como a estratégia de posicionamento ótimo [Bisogni 2023], este trabalho concentra-se na simulação e avaliação de apenas duas estratégias fundamentais: a Equidistante e a Equal-PDR.

3.3.1. Posicionamento Equidistante

A estratégia Equidistante é considerada a abordagem "ingênua" para o posicionamento de repetidores em redes multi-salto em linha. O seu princípio fundamental consiste em posicionar cada drone repetidor exatamente no ponto médio geométrico entre os seus dois vizinhos imediatos: o nó a montante (upstream) e o nó a jusante (downstream). Isso significa que o repetidor não necessita conhecer ou estimar os parâmetros probabilísticos R (alcance) e α (decaimento) dos links para decidir seu movimento, ele baseia-se estritamente nas coordenadas geográficas fornecidas pelos vizinhos, e pode resultar em uma performance sub-ótima [Bisogni 2023].

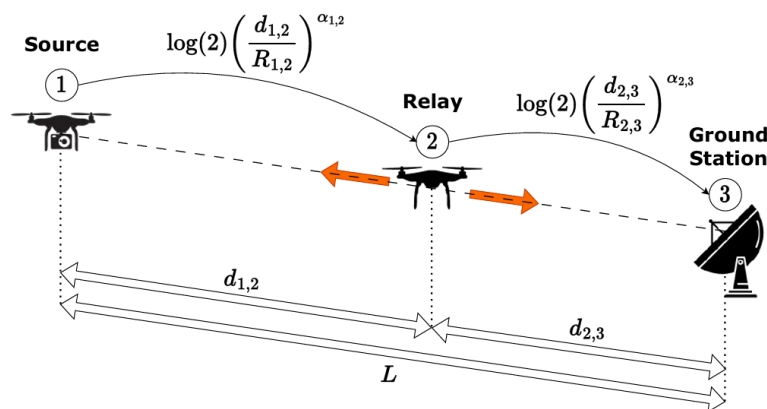


Figura 6. Posicionamento Equidistante. [Bisogni 2023]

Em termos de topologia de rede, se uma cadeia possui um comprimento total L e é composta por n saltos, a estratégia equidistante resultará em links com comprimentos

uniformes ($d=L/n$). Embora essa distribuição seja a que maximiza o PDR e a vazão em cenários ideais de espaço aberto, onde todos os enlaces sem fio são idênticos e simétricos, ela apresenta limitações severas em ambientes reais. No algoritmo 1 exemplificamos quais são os passos para determinar o posicionamento dos relays.

Algorithm 1: Algoritmo de Posicionamento Equidistante (MODE_EQUIDISTANT)

```

1 for every  $T$  do
2    $upstream\_pos \leftarrow retrieve\_last\_position(upstream\_node);$   $\triangleright$  retorna a
   última posição do vizinho anterior (BS ou relay anterior)
3    $downstream\_pos \leftarrow retrieve\_last\_position(downstream\_node);$   $\triangleright$  retorna a
   última posição do vizinho posterior (relay seguinte ou Source)
4    $target \leftarrow$ 
   ComputeEquidistantPosition( $upstream\_pos, downstream\_pos$ );
5   SetWaypoint( $target$ );  $\triangleright$  Movimenta para a posição definida
6 function ComputeEquidistantPosition
   ( $upstream\_pos, downstream\_pos$ ):
7    $target \leftarrow (upstream\_pos + downstream\_pos) / 2.0;$   $\triangleright$  calcula o ponto
   médio (equidistante)
8   return  $target$ ;  $\triangleright$  define waypoint

```

Conforme discutido por [Pinto 2018] e [Bisogni 2023], links sem fio em operações aéreas são inerentemente assimétricos devido a obstáculos físicos, zonas de interferência e à orientação das antenas durante o voo. Em tais condições, manter distâncias iguais entre os drones frequentemente resulta em um desempenho de rede degradado: links mais fracos na cadeia tornam-se gargalos, causando acúmulo de pacotes nos buffers (backlog), atrasos excessivos e perda de dados por estouro de fila.

No simulador desenvolvido, esta estratégia é utilizada para fornecer um contraste de desempenho em relação a métodos que compensam as assimetrias do canal.

3.3.2. Posicionamento Equal-PDR (PDR igual)

A estratégia Equal-PDR (Equal Packet Delivery Ratio) é uma abordagem de posicionamento adaptativo que visa mitigar os efeitos das assimetrias nos enlaces sem fio, as quais são inerentes a ambientes operacionais com interferências localizadas ou obstáculos físicos. Diferente da abordagem equidistante, que se baseia puramente na geometria, o Equal-PDR busca um ponto de equilíbrio onde a Qualidade de Serviço (QoS), medida pela taxa de entrega de pacotes, seja balanceada entre os links adjacentes de um repetidor. Este conceito é inspirado em sistemas de repetidores de energia sem fio, como o proposto por [Lu et al. 2020], que utiliza a distribuição equitativa de carga para otimizar o desempenho global de sistemas de longa distância.

O objetivo fundamental desta estratégia é garantir que nenhum link individual se

torne um "gargalo" para o tráfego da rede. Uma vez que o PDR total de uma rede em linha (ponta a ponta) é derivado do produto das probabilidades de sucesso de cada salto, um único enlace com desempenho desproporcionalmente baixo degrada severamente a confiabilidade de toda a cadeia. Ao adotar o posicionamento Equal-PDR, o drone repetidor avalia a qualidade do link que recebe dados (upstream) e do link para o qual os encaminha (downstream), movendo-se dinamicamente para compensar disparidades. Na prática, se o link de saída for mais fraco devido a uma zona de interferência, o drone se posicionará mais próximo do vizinho posterior para "ajudar" a conexão, sacrificando parte da distância do link anterior, que possui melhores condições de propagação.

O funcionamento detalhado desta lógica no simulador é apresentado no algoritmo 2. Este processo ocorre de forma distribuída, onde cada repetidor utiliza apenas informações e parâmetros de link fornecidos por seus vizinhos imediatos na cadeia. Através de um método de busca numérica, o drone identifica a distância ideal que iguala as probabilidades teóricas de entrega de ambos os links e, em seguida, utiliza a técnica de interpolação linear para definir suas novas coordenadas no plano 2D, mantendo-se sempre alinhado ao eixo da rede.

Algorithm 2: Algoritmo de Posicionamento Equal-PDR (MODE_EQUAL_PDR)

```

1 for every  $T$  do
2    $upstream\_pos \leftarrow retrieve\_last\_position(upstream\_node)$ ;  $\triangleright$  retorna a
   última posição do vizinho anterior (BS ou relay
   anterior)
3    $downstream\_pos \leftarrow retrieve\_last\_position(downstream\_node)$ ;  $\triangleright$  retorna a
   última posição do vizinho posterior (relay seguinte
   ou Source)
4    $R\_up, \alpha\_up \leftarrow \_R\_for\_link, \_alpha\_for\_link (upstream\_id, drone\_id)$ ;
    $\triangleright$  parâmetros do link upstream
5    $R\_down, \alpha\_down \leftarrow \_R\_for\_link, \_alpha\_for\_link$ 
    $(downstream\_id, drone\_id)$ ;  $\triangleright$  parâmetros do link downstream
6    $target \leftarrow$ 
    $ComputeEqualPDRPosition(d\_total, R\_up, \alpha\_up, R\_down, \alpha\_down)$ ;
7    $SetWaypoint(target)$ ;  $\triangleright$  Movimenta para a posição definida
8 function  $ComputeEqualPDRPosition$ 
    $(d\_total, R\_up, \alpha\_up, R\_down, \alpha\_down)$ :
9    $d\_total \leftarrow \|downstream\_pos - upstream\_pos\|_2$ ;  $\triangleright$  distância total
   entre upstream-downstream
10  Find  $d\_up \in [0, d\_total]$  such that;  $\triangleright$  Faz uma busca nas distâncias
   para encontrar em qual distância o pdr será igual
11   $target \leftarrow upstream\_pos + \frac{d\_equal\_pdr}{d\_total}(downstream\_pos - upstream\_pos)$ ;
    $\triangleright$  Calcular a posição-alvo (target) sobre o segmento
   de reta que une os vizinhos
12  return  $target$ ;  $\triangleright$  define waypoint

```

3.4. Modelando o PDR dos Links

A topologia simulada é composta por 7 nós: uma Estação Base (BS), cinco repetidores e um drone Fonte. No fluxo operacional do simulador, o drone Fonte (UID 5) gera o tráfego que percorre a cadeia através dos repetidores seguindo a ordem: $5 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 0 \rightarrow \text{BS}$. Seguindo a lógica de escalonamento da rede, a BS ativa repetidores dinamicamente sempre que o PDR do link upstream cai abaixo do limiar de 0,90.

3.4.1. Modelo dos Links

No ambiente simulado, o sucesso das transmissões é governado por um processo estocástico onde os pacotes são descartados conforme a probabilidade definida pela Equação (4). Para cada enlace i,j na rede, os parâmetros do modelo ($R_{i,j}, \alpha_{i,j}$) são configurados de forma individualizada, permitindo que a simulação reflita as assimetrias comuns em cenários reais de FANETs. Os valores específicos utilizados para caracterizar esses enlaces estão detalhadamente listados na Tabela 1, a notação 'rev.' é empregada para identificar o enlace reverso (reversed link) em cada segmento da cadeia.

Tabela 1. Parâmetros utilizados nos modelos de link. [Bisogni 2023]

Link Number	Link	Model set 1		Model set 2		Model set 3	
		$R^{(1)}$ (m)	$\alpha^{(1)}$	$R^{(2)}$ (m)	$\alpha^{(2)}$	$R^{(3)}$ (m)	$\alpha^{(3)}$
6	0, BS	90	3.4	90	3.4	90	3.4
6rev.	BS, 0	90	3.4	90	3.4	90	3.4
5	1,0	104	2.2	104	2.2	104	2.2
5rev.	0,1	104	2.2	104	2.2	104	2.2
4	2,1	148	2.8	148	2.8	148	2.8
4rev.	1,2	148	2.8	148	2.8	148	2.8
3	3,2	167	3.7	147	3.7	83	3.7
3rev.	2,3	167	3.7	147	3.7	83	3.7
2	4,3	83	3.7	103	3.7	167	3.7
2rev.	3,4	83	3.7	103	3.7	167	3.7
1	5,4	110	3.3	110	3.3	110	3.3
1rev.	4,5	110	3.3	110	3.3	110	3.3

A parametrização do simulador organiza-se em três grupos distintos de modelos (Model Sets). O Model Set 1 fundamenta-se em exemplos experimentais consolidados na literatura [Pinto et al. 2017b] e é aplicado como configuração padrão para o Cenário (a), que representa uma missão sob condições ambientais invariantes e sem alterações de modelo. Este conjunto serve como baseline para a avaliação da estabilidade da rede e da eficácia do posicionamento inicial dos drones.

Os conjuntos subsequentes, denominados Model Sets 2 e 3, são introduzidos para compor cenários de teste específicos que serão detalhados na seção de cenários de simulação [Bisogni 2023]. O objetivo primordial desses conjuntos é avaliar a performance da rede em ambientes diferentes. Ao induzir variações abruptas (Set 2) ou severas (Set 3) na qualidade do link sem fio, o simulador permite verificar o impacto direto dessas oscilações no desempenho da rede e a capacidade da estratégia Equal-PDR de reagir a tais mudanças, otimizando a topologia em tempo real para mitigar a perda de dados.

3.5. Cenários de Simulação

Para avaliar a robustez e a capacidade de adaptação das estratégias de posicionamento (Equidistante e Equal-PDR), o simulador submete a rede a quatro cenários de variabilidade ambiental [Bisogni 2023]. Esses cenários são disparados pela progressão do drone Fonte (UID 5) ao longo de sua trajetória semicircular, permitindo observar a reação dos repetidores a mudanças súbitas ou graduais na qualidade do canal.

As alterações de modelo concentram-se nos enlaces Link 2 (4→3) e Link 3 (3→2), que atuam como os pontos de estresse da topologia. Os cenários são definidos como segue:

- **Cenário (a) - Modelo Invariante:** Representa o caso base (baseline), onde os parâmetros de link permanecem fixos no Model Set 1 durante toda a missão. Este cenário valida o desempenho das estratégias em condições ideais de estabilidade.
- **Cenário (b) - Pequena Mudança Abrupta:** Quando o drone fonte atinge o Waypoint B (ponto central do arco), o simulador altera instantaneamente os parâmetros dos links 2 e 3 para o Model Set 2. Neste conjunto, o alcance R do Link 2 aumenta de 83m para 103m, enquanto o do Link 3 reduz de 167m para 147m, induzindo uma assimetria leve.
- **Cenário (c) - Grande Mudança Abrupta:** Similar ao cenário anterior, a transição ocorre no Waypoint B, mas para o Model Set 3. Neste caso, os valores de R entre os links 2 e 3 são invertidos ($83m \leftrightarrow 167m$), simulando uma entrada brusca em uma zona de alta interferência.
- **Cenário (d) - Mudança Incremental/Gradual:** Este cenário mimetiza condições reais onde a interferência varia conforme o drone se desloca pelo espaço. A transição entre o Model Set 1 e o Model Set 3 ocorre de forma contínua entre os Waypoints B e C. A variação é regida por um fator de interpolação linear $q(k)$, calculado em função do ângulo de azimute (bearing angle) do drone fonte em relação à Estação Base, conforme as Equação 5 [Bisogni 2023].

A transição gradual no Cenário (d) é expressa matematicamente como:

$$\text{Parâmetro}(k) = q(k) \cdot \text{Model Set 1} + (1 - q(k)) \cdot \text{Model Set 3} \quad (5)$$

Onde $q(k)$ varia de 1 a 0 à medida que a fonte completa o arco final da missão. Esta modelagem detalhada permite quantificar o atraso de resposta do sistema e o impacto da precisão da estimativa de parâmetros na manutenção do PDR da rede.

4. Resultados e Análise

Nesta seção, analisa-se a Taxa de Entrega de Pacotes (PDR - Packet Delivery Ratio) da rede sob duas estratégias distintas de posicionamento: Equidistante e Equal-PDR. Para fins de avaliação do desempenho máximo que cada algoritmo pode alcançar.

Para cada combinação de estratégia e cenários operacionais ('a', 'b', 'c' e 'd'), apresentam-se as trajetórias percorridas pelos UAVs, bem como a evolução do PDR de todos os seis enlaces que compõem a cadeia ativa de comunicação: {5,4}, {4,3}, {3,2}, {2,1}, {1,0} e {0,BS}. e o PDR total da rede. A análise estende-se até a conclusão da simulação, quando o drone fonte atinge o waypoint final da missão (BS).

Por fim, os resultados consolidados são apresentados em um gráfico que sintetiza o desempenho global da rede em cada cenário. Esta abordagem permite avaliar não apenas a eficácia de cada algoritmo em manter a vazão de dados, mas também a sua rapidez de resposta frente às mudanças de canal induzidas nos Model Sets.

4.1. Cenário 'a'

As Figuras 7 e 8 mostram as trajetórias dos drones no cenário 'a' (sem mudança), utilizando as estratégias de posicionamento Equidistante e Equal-PDR, respectivamente.

O comparativo do PDR total dos links e da rede, é demonstrado da Tabela 2.

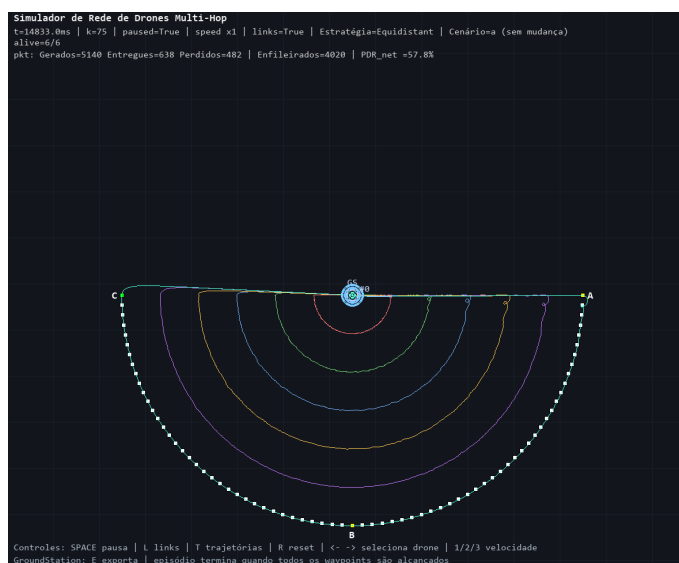


Figura 7. Trajetória dos drones no cenário 'a' (Posicionamento Equidistante).
Fonte: Autor

4.2. Cenário 'b'

As Figuras 9 e 10 mostram as trajetórias dos drones no cenário 'b' (pequena mudança abrupta), utilizando as estratégias de posicionamento Equidistante e Equal-PDR, respectivamente.

O comparativo do PDR total dos links e da rede, é demonstrado da Tabela 3.

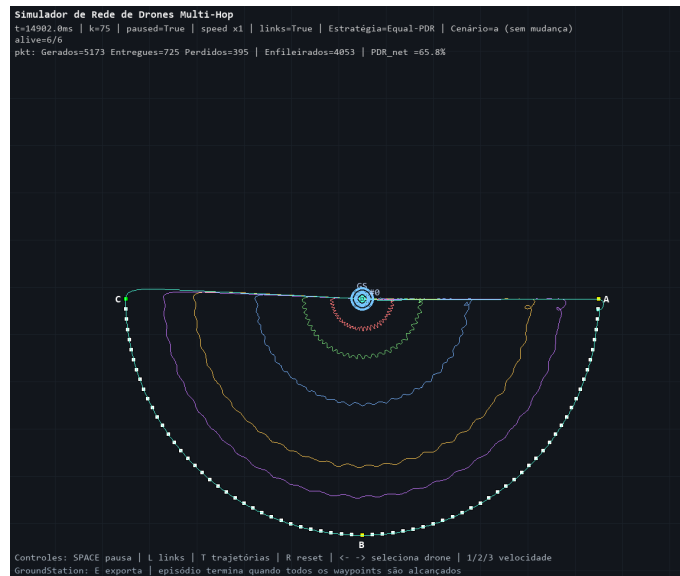


Figura 8. Trajetória dos drones no cenário 'a' (Posicionamento Equal-PDR).
Fonte: Autor

Tabela 2. Comparação do Pnet por link/rede - Cenário 'a'. Fonte: Autor

Link Number	Link	Pnet Equidistante	Pnet Equal-PDR
6	0, BS	89.35%	95.52%
5	1, 0	86.54%	93.03%
4	2, 1	96.33%	93.09%
3	3, 2	98.34%	93.83%
2	4, 3	85.66%	92.77%
1	5, 4	92.06%	91.38%
Pnet total da rede		57.80%	65.80%

Tabela 3. Comparação do Pnet por link/rede - Cenário 'b'. Fonte: Autor

Link Number	Link	Pnet Equidistante	Pnet Equal-PDR
6	0, BS	86.32%	95.78%
5	1, 0	88.08%	93.86%
4	2, 1	96.45%	93.74%
3	3, 2	98.23%	93.46%
2	4, 3	86.05%	91.35%
1	5, 4	91.07%	88.21%
Pnet total da rede		56.50%	63.50%

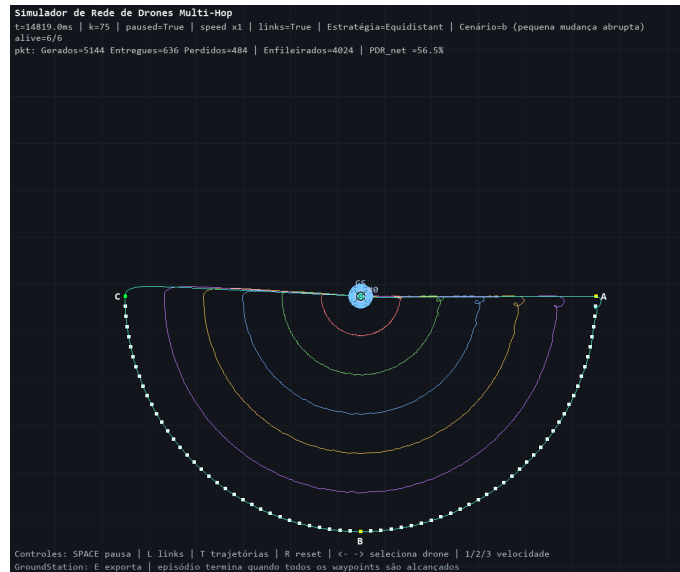


Figura 9. Trajetória dos drones no cenário 'b' (Posicionamento Equidistante).
 Fonte: Autor

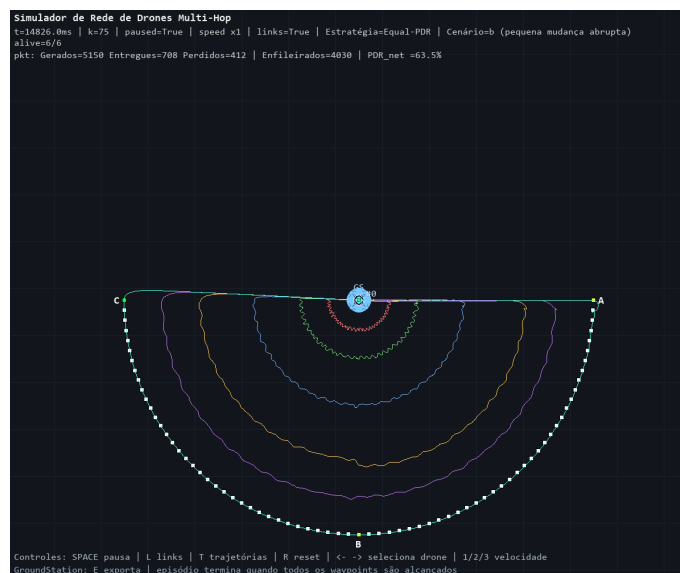


Figura 10. Trajetória dos drones no cenário 'b' (Posicionamento Equal-PDR).
 Fonte: Autor

4.3. Cenário 'c'

As Figuras 11 e 12 mostram as trajetórias dos drones no cenário 'c'(grande mudança abrupta), utilizando as estratégias de posicionamento Equidistante e Equal-PDR, respectivamente.

O comparativo do PDR total dos links e da rede, é demonstrado da Tabela 4.

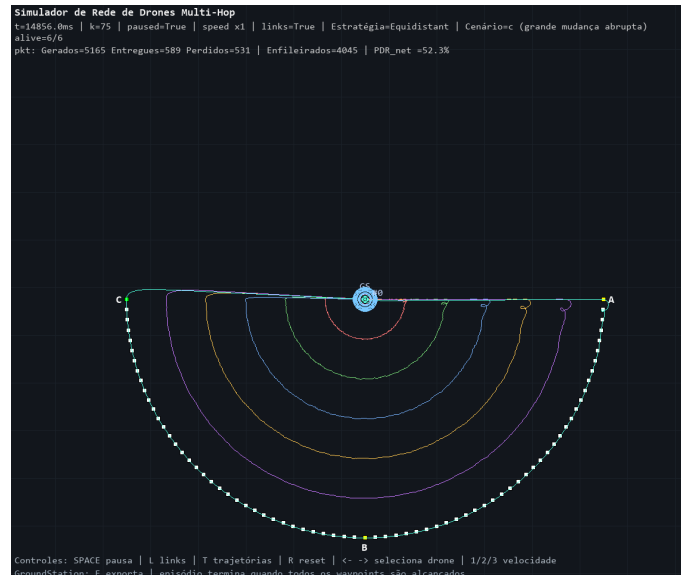


Figura 11. Trajetória dos drones no cenário 'c' (Posicionamento Equidistante).
Fonte: Autor

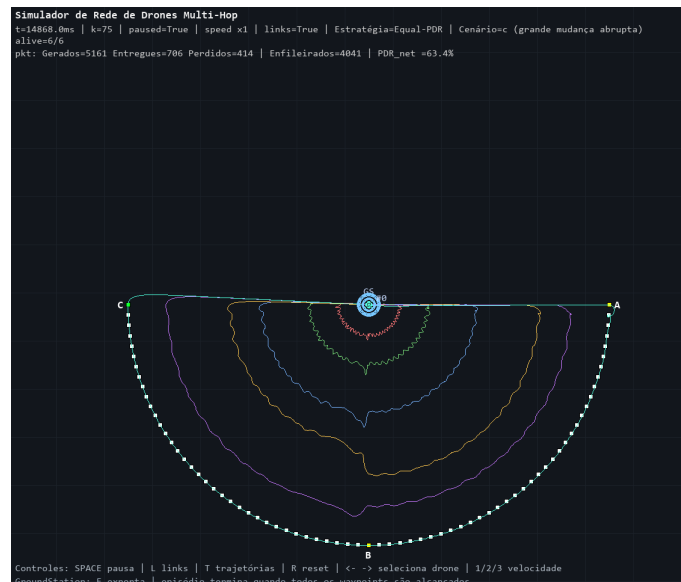


Figura 12. Trajetória dos drones no cenário 'c' (Posicionamento Equal-PDR).
Fonte: Autor

4.4. Cenário 'd'

As Figuras 13 e 14 mostram as trajetórias dos drones no cenário 'd'(mudança gradual), utilizando as estratégias de posicionamento Equidistante e Equal-PDR, respectivamente.

Tabela 4. Comparação do Pnet por link/rede - Cenário 'c'. Fonte: Autor

Link Number	Link	Pnet Equidistante	Pnet Equal-PDR
6	0, BS	87.68%	95.21%
5	1, 0	84.51%	92.89%
4	2, 1	95.29%	94.28%
3	3, 2	90.21%	93.73%
2	4, 3	90.31%	91.03%
1	5, 4	90.89%	89.10%
Pnet total da rede		52.30%	63.40%

O comparativo do PDR total dos links e da rede, é demonstrado da Tabela 5.

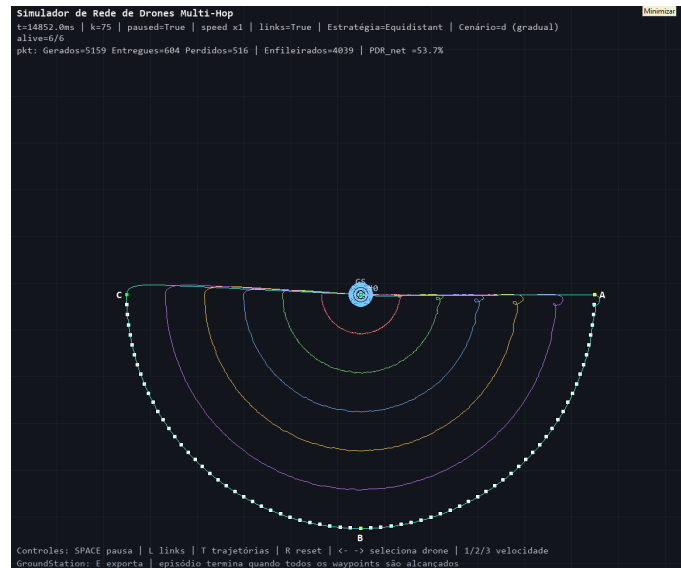


Figura 13. Trajetória dos drones no cenário 'd' (Posicionamento Equidistante). Fonte: Autor

Tabela 5. Comparação do Pnet por link/rede - Cenário 'd'. Fonte: Autor

Link Number	Link	Pnet Equidistante	Pnet Equal-PDR
6	0, BS	88.80%	96.08%
5	1, 0	85.35%	92.39%
4	2, 1	93.87%	93.16%
3	3, 2	97.95%	89.31%
2	4, 3	84.47%	93.90%
1	5, 4	91.16%	92.82%
Pnet total da rede		53.70%	64.40%

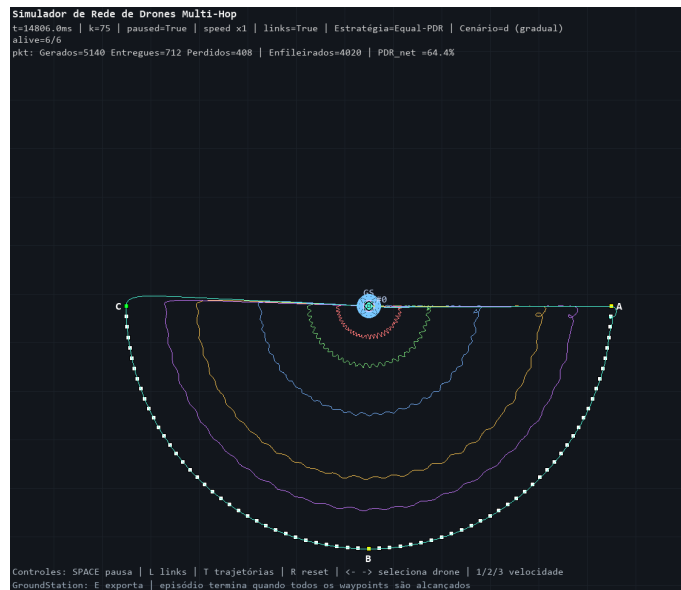


Figura 14. Trajetória dos drones no cenário 'd' (Posicionamento Equal-PDR).
Fonte: Autor

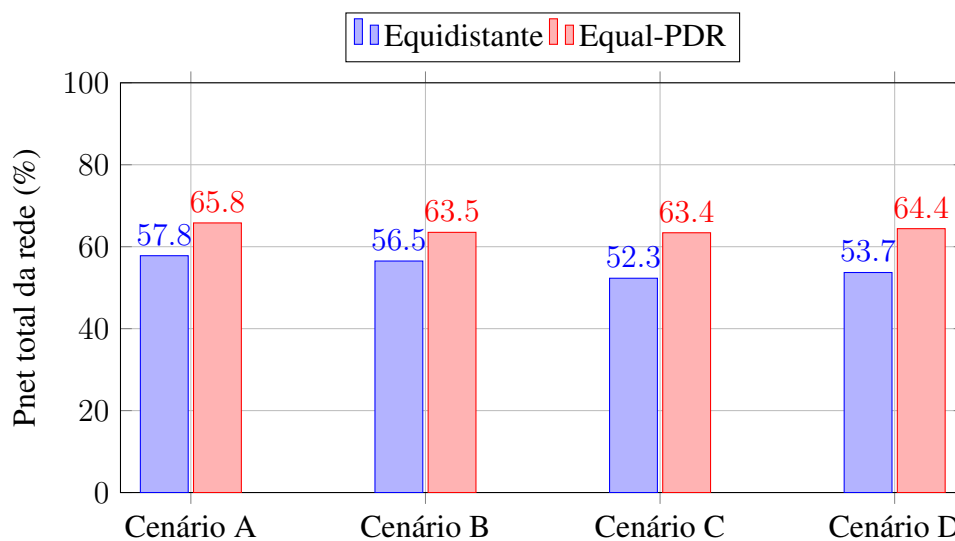


Figura 15. Comparação do Pnet total da rede entre as estratégias Equidistante e Equal-PDR

Os resultados apresentados no gráfico da Figura 15 demonstram a superioridade consistente da estratégia Equal-PDR em relação à abordagem Equidistante em todos os cenários de simulação. Enquanto a estratégia Equidistante apresenta quedas acentuadas no desempenho, chegando a 52,3% no Cenário C, o algoritmo Equal-PDR mantém a rede estável com taxas de entrega superiores a 63%. Essa vantagem ocorre porque o Equal-PDR identifica links assimétricos (gargalos) e reposiciona os repetidores para equilibrar a qualidade dos saltos adjacentes, mitigando o impacto de interferências que degradariam severamente o PDR total da rede, que é o produto das probabilidades de cada enlace.

Mesmo no Cenário A, onde o modelo sem fio é invariante, o Equal-PDR já apre-

sentam um ganho de 8 pontos percentuais devido às assimetrias nativas dos parâmetros de alcance (R) configurados nos links iniciais. O maior destaque de resiliência observa-se nos Cenários C e D, que representam mudanças bruscas e graduais de interferência; nestes casos, a capacidade adaptativa do Equal-PDR evita que a rede sofra a degradação de performance vista na estratégia geográfica simples, garantindo uma entrega de dados superior no ponto de maior estresse ambiental.

5. Considerações Finais

Este estudo apresentou o desenvolvimento e a validação de um simulador visual 2D, implementado com a biblioteca Pygame, projetado especificamente para analisar o desempenho de redes de drones multi-salto em topologia de linha. A ferramenta integrou com sucesso um modelo de link sem fio e a coordenação de acesso ao meio via protocolo TDMA, permitindo a emulação fiel de enlaces estáveis e assimétricos, fundamentais para o estudo de FANETs em ambientes operacionais realistas. A arquitetura desenvolvida possibilitou a análise minuciosa de como diferentes estratégias de posicionamento reagem a mudanças dinâmicas no canal sem fio, mimetizando os desafios de comunicação encontrados em missões de monitoramento aéreo.

Os resultados das simulações demonstraram que a estratégia Equal-PDR superou consistentemente a abordagem Equidistante em todos os cenários de variabilidade ambiental testados. Enquanto a estratégia puramente geográfica, baseada no ponto médio entre vizinhos, apresentou quedas severas na Taxa de Entrega de Pacotes (PDR), atingindo patamares críticos de 52,3% no Cenário C, o algoritmo Equal-PDR manteve a estabilidade da rede com taxas superiores a 63%. Essa superioridade justifica-se pela capacidade do Equal-PDR de identificar links que atuam como gargalos e reposicionar os repetidores para equilibrar a Qualidade de Serviço (QoS) entre saltos adjacentes, mitigando o impacto de interferências localizadas que degradariam o desempenho global da cadeia.

Como perspectivas para pesquisas futuras, a implementação da estimativa dinâmica de parâmetros em tempo real, utilizando técnicas de Mínimos Quadrados Não-Lineares [Bisogni 2023], permitiria que os drones operassem de forma totalmente autônoma, sem conhecimento prévio dos modelos de link. Nesse sentido, a aplicação de algoritmos de Inteligência Artificial, como Redes Neurais para estimativa de modelos [Bisogni 2023] ou Aprendizado por Reforço Profundo (DRL) para otimização de trajetória e posicionamento [Pasandideh et al. 2022], surge como uma alternativa robusta para lidar com a volatilidade inerente ao canal sem fio em FANETs. Além disso, a integração de métricas de consumo energético no processo de decisão de movimento e a expansão para topologias em malha (mesh) representam caminhos promissores para aumentar a autonomia e confiabilidade de enxames de VANTs. Por fim, a validação experimental em hardware real, é fundamental para confrontar os resultados do simulador com as interferências de um ambiente físico não controlado.

Referências

Bisogni, L. (2023). Dynamic quality estimation of wireless links with autonomous agents. Master's thesis, University of Pisa/CISTER. Master Thesis in Robotics and Automation Engineering, Italy/Portugal.

- Kaur, M., Prashar, D., Rashid, M., Alshamrani, S. S., and AlGhamdi, A. S. (2021). A novel approach for securing nodes using two-ray model and shadow effects in flying ad-hoc network. *Electronics*, 10(24):3164.
- Lu, F., Zhang, H., Li, W., Zhou, Z., Zhu, C., Cheng, C., Deng, Z., Chen, X., and Mi, C. C. (2020). A high-efficiency and long-distance power-relay system with equal power distribution. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 8(2):1419–1427.
- NumPy Developers (2026). Numpy documentation. <https://numpy.org/doc/>.
- Pasandideh, F., da Costa, J. P. J., Kunst, R., Islam, N., Hardjawana, W., and Pignaton de Freitas, E. (2022). A review of flying ad hoc networks: Key characteristics, applications, and wireless technologies. *Remote Sensing*, 14(18):4459.
- Pinto, L. R. (2018). *Aerial Multi-hop Sensor Networks*. PhD thesis, Universidade do Porto - Carnegie Mellon University. PhD thesis, Portugal/USA.
- Pinto, L. R., Almeida, L., Alizadeh, H., and Rowe, A. (2017a). Aerial video stream over multi-hop using adaptive tdma slots. In *2017 IEEE Real-Time Systems Symposium (RTSS)*, pages 157–166.
- Pinto, L. R., Almeida, L., and Rowe, A. (2018). Balancing packet delivery to improve end-to-end multi-hop aerial video streaming. In *ROBOT 2017: Third Iberian Robotics Conference*, pages 807–819. Springer International Publishing.
- Pinto, L. R., Almeida, L., Rowe, A., and Almeida, L. (2017b). Characterizing multi-hop aerial networks of cots multirotors. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 13(2):898–906.
- Pygame Developers (2026). Pygame v2.6.0 documentation. <https://www.pygame.org/docs/>.
- Python Software Foundation (2026). Python documentation. <https://docs.python.org/3/>.