



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA (PPGEE)

ARTUR CARVALHO ZUCCHI

**Proposta de Arquitetura FANET com cooperação entre protocolos de
comunicação e movimentação.**

São Paulo

2022

ARTUR CARVALHO ZUCCHI

Proposta de Arquitetura FANET com cooperação entre protocolos de
comunicação e movimentação.

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Engenharia de
Computação - 3141

Orientador: Prof^a Regina Melo Silveira

São Paulo

2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Zucchi, Artur Carvalho

Proposta de Arquitetura FANET com cooperação entre protocolos de comunicação e movimentação / A. C. Zucchi, R. M. Silveira -- versão corr. -- São Paulo, 2022.

97 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais.

1. Análise de desempenho 2. Arquitetura cliente/servidor 3. Protocolos de comunicação 4. Engenharia de sistemas de computação 5. Wireless
I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais II. t. III. Silveira, Regina Melo

Dissertação de autoria de Artur Carvalho Zucchi, sob o título “**Proposta de Arquitetura FANET com cooperação entre protocolos de comunicação e movimentação.**”, apresentada ao Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como requisito para obtenção do Título de Mestre.

Prof^ª. Regina Melo Silveira
Escola Politécnica da USP

Prof. João Henrique Kleinschmidt
Universidade Federal do ABC

Prof^º. Dr. Alfredo Goldman Vel Lejbman
Instituto de Matemática e Estatística da USP

Resumo

Drones, veículos aéreos não tripulados (VANTs), possuem diversas aplicações para empresas e governos. Eles podem ser usados para operações de busca e resgate, detecção e prevenção de desastres ambientais como incêndios, monitoramento de tráfico urbano ou de fronteiras entre países, entre outros. Tais aplicações são potencializadas ao aliar os VANTs às tecnologias de comunicação wireless como IEEE 802.11, popularmente conhecido como WiFi. Além de possibilitar a transferência de informações e de instruções do drone para uma estação central no solo, a comunicação wireless permite a conexão de drone para drone, princípio das redes FANET (Flying Ad Hoc Network). Essa conjuntura permite a criação de uma rede de múltiplos drones, o que pode otimizar as aplicações citadas, dado a multiplicação e a ampliação das tarefas pelos diversos drones. Nesse paradigma, em decorrência da movimentação dos drones, que geram constantes mudanças na topologia, surgem desafios como a dificuldade de definir assertivamente as rotas de transporte das informações na rede e como a limitação de alcance na comunicação do padrão IEEE 802.11. Frente a essas dificuldades, esta dissertação propõe associar o movimento à comunicação, criando uma cooperação da mobilidade dos drones com o processo de comunicação. Além disso, será abordada, também, uma arquitetura de cooperação entre o movimento e a comunicação da rede, com o objetivo de amenizar o impacto que o alcance dos dispositivos de rede podem causar no sistema de múltiplos drones. Os resultados dessa cooperação são muito positivos, gerando uma rede com altíssima disponibilidade (baixíssimas taxas de perdas de pacotes) e com pequeno atraso e baixa variação de atraso de ponta a ponta.

Palavras-chaves: VANT, FANET, Arquitetura de redes e computadores, 802.11, Arquitetura cooperativa, reconhecimento de topologia.

Abstract

Drones, unmanned aerial vehicles (UAVs), have several applications for companies and governments. They can be used for search and rescue operations, detection and prevention of environmental disasters such as fires, monitoring urban traffic or borders between countries, among others. Such applications are enhanced by combining UAVs with wireless communication technologies such as IEEE 802.11, popularly known as WiFi. The implementation of this technology enable the transfer of information and instructions from the drone to a central station on the ground and allows the connection of a drone to drone, principle of FANET networks (Flying Ad Hoc Network). This situation enables the creation of a network of multiple drones, which can optimize the applications mentioned. Various drones can work together to expand range or multiply tasks. In this paradigm, as a result of the drones mobility, which generate constant changes in the topology, challenges arise such as the difficulty of assertively defining the transport routes of information on the network and the limitation of the communication range of the IEE 802.11 standard. Faced with these difficulties, this dissertation proposes to associate the movement with communication, creating a cooperation between drone mobility and the communication process. In addition, an architecture of cooperation between network movement and communication will also be addressed, with the aim of mitigating the impact that the reach of network devices can cause in the system of multiple drones. The cooperation contributes to the creation of a network with high availability (low packet loss rates) and with delays so small that they do not impact end-to-end communication.

Keywords: Drones, FANET, Network and Computer Architecture, 802.11, topoloy-aware.

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Exemplo da lógica MPR | 30 |
| Figura 2 – Figura apresentada por Yanmaz (YANMAZ <i>et al.</i> , 2018) para exemplificar a visão holística de um sistema multi drones | 33 |
| Figura 3 – Figura apresentada por (ZAFAR; KHAN, 2016) para ilustrar o funcionamento do sistema de tecnologia híbrida | 37 |
| Figura 4 – Figura apresentada por (ANDRE <i>et al.</i> , 2014) para ilustrar o funcionamento do sistema de tecnologia híbrida | 38 |
| Figura 5 – Figura apresentada por Konatowski (KONATOWSKI; PAWIOWSKI, 2018) para exemplificar o algoritmo ACO e o seu comportamento | 41 |
| Figura 6 – Modelagem macro do funcionamento dos módulos da arquitetura. | 44 |
| Figura 7 – Modelagem do funcionamento do módulo de movimentação. | 47 |
| Figura 8 – Modelo para controle da topologia em cada PC. | 49 |
| Figura 9 – Modelagem do funcionamento do módulo de comunicação. | 52 |
| Figura 10 – Exemplo do funcionamento do PRBS | 54 |
| Figura 11 – Modelagem do funcionamento do módulo de cooperação. | 55 |
| Figura 12 – Fluxo dos Estados possíveis que a rede pode atingir. | 56 |
| Figura 13 – Modelagem da comunicação entre módulos e entre drones. | 64 |
| Figura 14 – Consolidado das médias de taxa de perda de pacote para os cenários usando o protocolo PRBS. | 65 |
| Figura 15 – Resultados para o cenário de 10 drones com os PCs ordenados e PRBS como protocolo. | 68 |
| Figura 16 – Resultados para o cenário de 20 drones com os PCs ordenados e PRBS como protocolo. | 68 |
| Figura 17 – Resultados para o cenário de 30 drones com os PCs ordenados e PRBS como protocolo. | 69 |
| Figura 18 – Resultados para o cenário de 40 drones com os PCs ordenados e PRBS como protocolo. | 69 |
| Figura 19 – Resultados para o cenário de 50 drones com os PCs ordenados e PRBS como protocolo. | 70 |

| | |
|---|----|
| Figura 20 – Resultados para o cenário de 60 drones com os PCs ordenados e PRBS como protocolo. | 70 |
| Figura 21 – Resultados para o cenário de 60 drones com os PCs desordenados e PRBS como protocolo. | 71 |
| Figura 22 – Resultados para o cenário de 60 drones com os PCs ordenados e PRBS como protocolo mas com a potência de sinal em 70dBm. | 71 |
| Figura 23 – Consolidado das médias de taxa de perda de pacote para os cenários usando o protocolo OLSR. | 72 |
| Figura 24 – Resultados para o cenário de 10 drones com os PCs ordenados e OLSR como protocolo. | 74 |
| Figura 25 – Resultados para o cenário de 20 drones com os PCs ordenados e OLSR como protocolo. | 74 |
| Figura 26 – Resultados para o cenário de 30 drones com os PCs ordenados e OLSR como protocolo. | 75 |
| Figura 27 – Resultados para o cenário de 40 drones com os PCs ordenados e OLSR como protocolo. | 75 |
| Figura 28 – Resultados para o cenário de 50 drones com os PCs ordenados e OLSR como protocolo. | 76 |
| Figura 29 – Resultados para o cenário de 60 drones com os PCs ordenados e OLSR como protocolo. | 76 |
| Figura 30 – Resultados para o cenário de 60 drones com os PCs desordenados e OLSR como protocolo. | 77 |
| Figura 31 – Resultados para o cenário de 60 drones com os PCs ordenados e PRBS como protocolo mas com a potência de sinal em 70dBm. | 77 |
| Figura 32 – Diferença percentual entre as métricas de todos os cenários (OLSR x PRBS) | 79 |

Lista de tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Tabela com resumo das principais características das redes ad Hoc . . . | 25 |
| Tabela 2 – Tabela com comparação entre as versões do padrão IEEE. | 27 |
| Tabela 3 – Modelos de mobilidade e suas principais aplicações (ZAFAR; KHAN, 2016) | 32 |
| Tabela 4 – Pontos de coleta para cenários com 60 drones. | 59 |
| Tabela 5 – Cenários a serem simulados. | 60 |
| Tabela 6 – Tabela com os parâmetros fixos da simulação. | 61 |
| Tabela 7 – Tabela das entradas existentes da memória em cache. | 63 |

Sumário

| | | |
|----------|--|----|
| | Lista de tabelas | 8 |
| 1 | Introdução | 14 |
| 1.1 | <i>Motivação</i> | 16 |
| 1.2 | <i>Justificativa</i> | 16 |
| 1.3 | <i>Hipótese</i> | 17 |
| 1.4 | <i>Objetivos</i> | 17 |
| 1.5 | <i>Organização do Documento</i> | 18 |
| 2 | Background | 19 |
| 2.1 | <i>Contextualização</i> | 19 |
| 2.2 | <i>Aplicações</i> | 20 |
| 2.3 | <i>Características</i> | 23 |
| 2.3.1 | Considerações perante o Design da Arquitetura | 24 |
| 2.4 | <i>Comunicação</i> | 26 |
| 2.4.1 | Camada Física | 26 |
| 2.4.2 | Camada de Rede | 29 |
| 3 | Estado da Arte | 31 |
| 3.1 | <i>Fanet - Flying Ad hoc Network</i> | 31 |
| 3.2 | <i>Coordenação e Cooperação dos Drones</i> | 32 |
| 3.3 | <i>Tecnologia Híbrida</i> | 35 |
| 3.4 | <i>Algoritmos de Movimento</i> | 38 |
| 3.4.1 | Algoritmos de Movimento de Enxame Bioinspirados | 39 |
| 3.4.2 | UAVs e os algoritmos de enxame | 40 |
| 4 | Arquitetura Modular Descentralizada de Cooperação | 42 |
| 4.1 | <i>Evento de Estudo</i> | 42 |
| 4.2 | <i>O conceito da Arquitetura</i> | 43 |
| 4.3 | <i>Módulo de movimentação</i> | 45 |
| 4.3.1 | Modelagem do Módulo | 46 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.3.2 | Algoritmo de Distanciamento do Vizinho e de Coesão do Destino (ADVCD) | 48 |
| 4.4 | <i>Módulo de Comunicação</i> | 51 |
| 4.4.1 | Modelagem do Módulo | 51 |
| 4.4.2 | Protocolo de Roteamento Baseado em Saltos - PRBS | 53 |
| 4.4.3 | Módulo de Cooperação | 54 |
| 4.4.4 | Modelagem do Módulo | 55 |
| 5 | Ambiente de Simulação e Validação | 58 |
| 5.1 | <i>Metodologia</i> | 58 |
| 5.2 | <i>Cenários e Simulação</i> | 59 |
| 5.2.1 | Definição dos Cenários | 59 |
| 5.2.2 | Definição dos Parâmetros da Simulação | 60 |
| 5.3 | <i>Comunicação de Controle</i> | 61 |
| 5.3.1 | Comunicação entre os módulos | 62 |
| 6 | Análise dos Resultados Obtidos | 65 |
| 6.1 | <i>Protocolo de Roteamento Baseado em saltos (PRBS)</i> | 65 |
| 6.1.1 | Distância e a quantidade de vizinhos | 66 |
| 6.1.2 | Saturação da rede - roteamento no limite | 67 |
| 6.1.3 | Correlação com o Atraso | 67 |
| 6.2 | <i>Protocolo Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)</i> | 67 |
| 6.2.1 | Comprimento da Nuvem | 72 |
| 6.2.2 | Afastamento dos Drones | 73 |
| 6.3 | <i>Cooperação do Movimento com a Comunicação</i> | 73 |
| 6.3.1 | Discussão sobre o OLSR | 78 |
| 6.3.2 | Discussão sobre o PRBS | 78 |
| 6.3.3 | Análise comparativa entre os protocolos | 79 |
| 6.4 | <i>A possibilidade da Tecnologia Híbrida</i> | 80 |
| 6.4.1 | Comportamento do OLSR | 81 |
| 6.4.2 | Comportamento do PRBS | 81 |
| 6.4.3 | Conclusões sobre a tecnologia híbrida: | 82 |
| 6.5 | <i>Análise de trabalhos correlatos</i> | 83 |

| | | |
|---|--|----|
| 7 | Conclusão | 86 |
| | REFERÊNCIAS | 88 |
| A | Movimento derivado do Algoritmo de Distanciamento do Vizi- nho e de Coesão do Destino (ADVCD) | 95 |

Lista de abreviaturas e siglas

| | |
|-------|---|
| AODV | Ad-hoc On Demand Distance Vector |
| DSDV | Destination-Sequenced Distance Vector routing |
| FANET | Flying Ad Hoc Networks |
| IoT | Internet of Things |
| IEEE | Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos |
| MANET | Mobile Ad Hoc Networks |
| MIMO | Multiple-input and multiple-output |
| OLSR | Optimized Link State Routing Protocol |
| RREQ | Route Request packet |
| RREP | Route Reply packet |
| SDN | Software Defined Network |
| UAV | Unmanned Aerial Vehicle |
| VANET | Veicular Ad Hoc Networks |
| VANT | Veículo Aéreo Não Tripulado |
| PC | Ponto de Coleta |
| MPR | Multipoint Relay |
| ABC | Artificial Bee Colony |
| ACO | Ant Colony Optimization |
| HNA | Host and Network Association |
| MID | Declaração de Interface Múltipla |
| TC | Topology Control |
| ADVCD | Algoritmo de Distanciamento do Vizinho e de Coesão do Destino |

PRBS

Protocolo de roteamento baseado em saltos

1 Introdução

A estruturação de projetos de fiscalização e monitoramento de regiões remotas ou de difícil acesso terão sempre como um dos principais requisitos a infraestrutura. A tendência é que regiões como, por exemplo, a fronteira do Brasil com a Colômbia, tenham pouquíssimas instalações que permitam a entrada de tecnologias habituais de vigilância e de segurança (XIMENES, 2018). Em uma tarefa complexa como monitorar a região citada, as tecnologias escaláveis, como drones - veículos aéreos não tripulados (VANT), surgem como possíveis soluções para o desafio.

A utilização de VANTs para monitorar áreas tem crescido muito nos últimos anos em razão da flexibilidade de seu uso, que permite a coleta de fotos, vídeos ou de dados provenientes de sensores sem a necessidade de estrutura física no local. Eles podem coletar dados com qualquer dispositivo cujo peso permita o voo, como diversos tipos de sensores ou câmeras fotográficas, e cobrir áreas extensas em tempos relativamente curtos devido ao alto dinamismo que possuem no movimento. E, apesar das muitas aplicações com o uso de apenas um drone (KAWAGUTI, 2010) (PETRONOTÍCIAS, 2020) (FONTES, 2020), há a possibilidade de criar um sistema com múltiplos drones. A utilização de diversos drones pode potencializar ainda mais as vantagens apresentadas acima, flexibilizando sobremaneira a solução. Num sistema com mais de um drone, a comunicação entre eles se torna um fator de interesse muito grande. O sistema pode se tornar mais eficiente com a utilização das tecnologias de comunicação wireless, permitindo que todos os dados coletados possam ser enviados para bases de controle, numa operação cooperativa entre os drones.

Os VANTs, aliados aos pequenos e leves dispositivos computacionais que permitem a comunicação por meio dos padrões 5G, rádio, bluetooth, 802.11 ou 802.15.4 (zigbee), possibilitam que a mobilidade e seu gerenciamento sejam baseados em software conectado e compartilhado pela nuvem de drones, o que contribui para facilitar a instalação e escalabilidade de sistemas de múltiplos VANTs (GOERZEN; KONG; METTLER, 2010). Os drones apresentam, entretanto, uma série de limitações que precisam ser levadas em conta para a construção de um sistema desses: as condições físicas do drone, as condições ambientais de voo ou a escassez/ausência de infraestrutura. Não é recomendado, por exemplo, o uso da tecnologia 5G em locais onde não há cobertura de sinal ou o uso de

rádios de longo alcance devido ao grande consumo de energia essencial para a durabilidade do voo, ou de tecnologias de pequeno alcance como o bluetooth porque a confiabilidade da comunicação pode ser um fator crucial para o projeto e há interesse no crescimento constante do alcance da rede (BEKMEZCI; SAHINGOZ; TEMEL, 2013) (KHAN *et al.*, 2017) (CRUZ, 2018) (WANG *et al.*, 2017) (GUPTA; JAIN; VASZKUN, 2016) (HAYAT; YANMAZ; MUZAFFAR, 2016) (ERDELJ *et al.*, 2017).

A dependência de infraestrutura e das restrições físicas para a comunicação de um sistema de vários drones é, pois, um desafio. E uma proposta alternativa está na construção de redes Ad hoc entre os drones, o que se denomina de Flying Ad hoc Network (FANET). Os drones podem se comunicar entre si para transmitir os dados de um nó ao outro até atingir a borda da rede, onde pode haver um sorvedouro de informações coletadas. Uma rede FANET possui algumas características marcantes que a diferencia de redes comuns e também de outras redes Ad hoc como as redes móveis Ad hoc (MANET - Mobile Ad hoc Network) ou as redes Ad hoc veiculares (VANET - Vehicular Ad hoc Network) (BEKMEZCI; SAHINGOZ; TEMEL, 2013) (KHAN *et al.*, 2017) (CRUZ, 2018) (WANG *et al.*, 2017) (GUPTA; JAIN; VASZKUN, 2016) (MAAKAR; SINGH; SINGH, 2019) (GUILLEN-PEREZ; CANO, 2018), dessas características podemos citar:

- Alta Mobilidade: os nós em uma rede FANET se movem constantemente e em muitos casos em alta velocidade;
- Topologia Dinâmica: dada a constante movimentação, a topologia da rede pode ser alterada constantemente se não houver uma coordenação no movimento que impeça a mudança;
- Propagação do Rádio: dado que os nós da rede FANET estão localizados em sua grande maioria, a uma altura considerável, o raio de propagação do rádio pode sofrer maiores interferências;
- Densidade da Rede (# nós/área monitorada): No geral o número de drones presentes em uma rede FANET é, consideravelmente, menor. Muitos projetos visam alocar um mínimo número de drones para tentar abranger o máximo de área possível por questões econômicas ou técnicas. Uma alta densidade de drones pode gerar complexidades na movimentação, aumentando a possibilidade de colisões, e na comunicação, tornando ainda mais complexo o controle da rede como um todo, da busca da rota a entrega do pacote;

- Restrições de energia: A energia disponível para o drone deve ser calculada visando o uso para voo, para coleta de informações e para a comunicação. O seu rápido consumo pode ser um problema crítico para a rede e deve ser levada em conta;

1.1 *Motivação*

A criação de uma rede FANET, em que os drones se coordenam e transmitem os dados coletados por meio de uma rede wireless é a base de estudo deste projeto. A relativa escassez literária e a perspectiva de alcance do estudo, dado o alto grau de impacto social, econômico e governamental que o estudo pode atingir são as grandes motivações para este projeto, precedidas, no entanto, pelo interesse pela área de arquitetura de redes e computadores. Tal interesse possibilitou pesquisas mais avançadas que levaram ao entendimento de um novo paradigma, a comunicação Ad hoc e, conseqüentemente, ao conceito das redes MANET, VANET e FANET. O estudo tem como foco a área de FANET por considera-la pouco explorada, com muito potencial para novas ideias e soluções e com alta perspectiva de benefício para a sociedade na área militar, comercial e civil, seja no controle de desastres naturais, operações de busca e reconhecimento, vigilância de fronteiras, prevenção de incêndios florestais, medições importantes para agricultura, monitoramento de tráfico, entre outros (BEKMEZCI; SAHINGOZ; TEMEL, 2013) (KHAN *et al.*, 2017).

1.2 *Justificativa*

O projeto abordará redes FANET em que um drone será responsável por coletar uma determinada informação em pontos determinados e utilizar os outros drones como links da rede até o sorvedouro/servidor, que estará aguardando o envio da informação. Para que isso seja possível, os drones precisam se movimentar entre os diversos pontos de coleta, impactando diretamente a descoberta de rotas para a comunicação. Esse cenário remete ao desafio de unir as características presentes em uma rede FANET, com o movimento da rede e dos drones e com uma aplicabilidade que possua requisitos sensíveis como a confiabilidade da rede, a baixa variação da latência (jitter) e a própria latência.

Este projeto busca, portanto, propor um modelo de cooperação entre os protocolos de roteamento e o movimento dos dispositivos, que possibilite a criação de uma rede remota, que não possui infraestrutura, com alta disponibilidade e com um maior controle da escalabilidade e variação do atraso.

1.3 Hipótese

A união de uma rede FANET com o movimento e a necessidade de uma alta disponibilidade da rede se torna muito complexa se não houver uma topologia de rede constante, programável ou, pelo menos, previsível. Caso contrário, será extremamente complexo garantir o envio de informações sem haver perdas sensíveis, atrasos, consumo excessivo de energia e/ou perda na disponibilidade da rede. E para resolver esse problema, este projeto propõe uma cooperação do movimento com a comunicação, criando um protocolo de roteamento que enxergue ou preveja o padrão ou a lógica do movimento para, então, criar as rotas. Propõe-se, portanto, demonstrar que essa cooperação é viável e poderá criar uma rede FANET robusta, com alta disponibilidade, que não sofra com a latência ou sua variação, que possua uma baixa taxa de perda de pacotes e ainda gere um baixo custo energético de funcionamento dos drones.

1.4 Objetivos

Neste cenário consideramos que os drones estão em uma missão de coleta de informações. Será levado em conta que os pontos de coleta já foram definidos, por meio, por exemplo, de algoritmos baseados no problema do caixeiro-viajante ou de qualquer algoritmo de busca e reconhecimento. A partir dos pontos de coleta que se dá início ao objetivo principal deste projeto: a criação de uma arquitetura cooperativa que irá permitir o trabalho em conjunto da movimentação e da comunicação de uma nuvem de drones em uma missão para coletar e enviar informações de diversos pontos pré-definidos.

1.5 Organização do Documento

Os capítulos que se seguem neste documento irão descrever toda a estruturação da dissertação e estão organizados da seguinte forma: o capítulo 2 apresenta alguns conceitos necessários para este trabalho, abordando com detalhes as redes FANET (Flying Ad hoc Network), as tecnologias de rede e os algoritmos de roteamento que serão utilizados; o capítulo 3, apresenta a revisão bibliográfica que servirá de estudo e base para a formulação da ideia deste projeto, realizando um resumo de como sistemas de múltiplos drones são tratados em trabalhos relacionados; o capítulo 4 apresenta a descrição da arquitetura proposta, explicando a modularização da arquitetura e seus respectivos módulos; o capítulo 5 apresenta como a arquitetura será implementada e testada afim de validarmos a hipótese deste trabalho, explicitando as ferramentas de simulação, a metodologia e os cenários de simulação; os resultados da simulação, assim como as considerações sobre estão detalhadas na seção 6; e, por fim, o trabalho é concluído com a seção 7.

2 Background

Neste capítulo serão discutidos os conceitos essenciais para esta dissertação: as redes FANET e as tecnologias sem fio utilizadas, IEEE 802.11. Primeiramente, será realizada uma avaliação das redes FANET, abordando os princípios básicos que definem esse tipo de rede, seguido de alguns cenários de uso e aplicações. As características da rede serão comparadas com as outras redes Ad hoc, Manet e Vanet, explicitando as considerações para o design da rede, os protocolos de comunicação com ênfase na camada de rede e as questões latentes conjuntamente com os desafios que a área apresenta. Após o detalhamento do conceito de rede Ad hoc, serão abordadas as tecnologias para a estruturação da camada de rede. O padrão IEEE 802.11 será descrito por meio de um resumo histórico e dos diversos avanços e versões lançadas. E o padrão IEEE 802.15.4 será discutido pela visão do paradigma dos dispositivos IoTs.

2.1 Contextualização

O paradigma das redes FANET, sendo uma derivação das redes Ad hoc móveis, é relativamente novo comparado com outros tipos de redes e arquiteturas de computadores. Consiste em uma rede de nós voadores autônomos (drones/VANTs) que são capazes de se comunicar entre si e, também, com seus arredores para atingir o objetivo da rede (SINGH; VERMA, 2015) (BEKMEZCI; SAHINGOZ; TEMEL, 2013) (KHAN *et al.*, 2017) (MAAKAR; SINGH; SINGH, 2019). E como toda rede Ad hoc, uma rede FANET não se baseia em uma infraestrutura centralizada, como uma rede cabeada que depende de outros dispositivos de rede (CRUZ, 2018) (ZAFAR; KHAN, 2016). A troca de pacotes é realizada de drone para drone, permitindo que a informação chegue ao destino por meio de múltiplos saltos entre os nós intermediários (BEKMEZCI; SAHINGOZ; TEMEL, 2013).

Um sistema de múltiplos VANTs aliado às tecnologias de comunicação, criando uma rede FANET, pode gerar um ramo de oportunidades para diversas áreas da sociedade. Os desafios são muitos para cada cenário implantado (ZAFAR; KHAN, 2016). Em seguida serão, então, detalhadas e discutidas as aplicações, as características, as arquiteturas plausíveis e os desafios que esse paradigma possui.

2.2 Aplicações

O uso de uma nuvem de drones com tecnologia de comunicação acoplada, ou seja, de uma rede FANET pode trazer benefícios como:

- Escalabilidade: A cobertura de uma área com o uso de redes FANETs pode ser facilmente aumentada adicionando-se novos VANTs e adotando esquemas de roteamento dinâmico eficientes (WANG *et al.*, 2017) (CRUZ, 2018).
- Custo Reduzido: O custo de implantação e manutenção de UAVs é menor do que o custo de, por exemplo, estruturar e construir uma rede cabeada (WANG *et al.*, 2017) (CRUZ, 2018).
- Resiliência: Em FANETs, se um UAV se tornar inoperante (devido às condições físicas ou qualquer falha no sistema UAV), as missões FANET ainda podem prosseguir com o resto dos UAVs voando (WANG *et al.*, 2017).
- Tempo de Execução: Dependendo da tarefa designada para a rede, o tempo de execução pode ser muito menor com o uso da rede ao invés de um único drone (WANG *et al.*, 2017) (CRUZ, 2018).

Essas vantagens podem ser muito importantes para determinados cenários e aplicações de uma rede FANET, cada qual com suas características e arquiteturas. Dada a importância de se entender as possíveis aplicações para, então, trabalhar com tais redes, serão indicados, abaixo, os cenários mais comuns e suas respectivas peculiaridades.

Aplicações possíveis para uma rede FANET que foram mapeadas por alguns estudos encontrados na literatura (BEKMEZCI; SAHINGOZ; TEMEL, 2013) (CRUZ, 2018) (GUPTA; JAIN; VASZKUN, 2016) (MAAKAR; SINGH; SINGH, 2019) são:

Operações de Busca e Resgate

Mapear uma grande área territorial é um trabalho árduo e realizar uma operação de busca e resgate nela pode ser ainda mais complexa. A rede FANET, dada a sua capacidade de abrangência, sua escalabilidade e sua relativa facilidade de implementação, possui uma boa aplicabilidade nesse tipo de operação (BUJARI *et al.*, 2017).

A rede é empregada no monitoramento de áreas inacessíveis para mecanismos comuns de busca, detectando sinais provenientes de telefones celulares ou coletando fotos

e vídeos para localizar algo ou alguém (HAYAT; YANMAZ; MUZAFFAR, 2016). Diversas estratégias de busca podem ser traçadas usando UAVs. Essas estratégias são discutidas considerando fatores importantes como qualidade dos sensores, limitação de energia, presença de obstáculos e modelo de comunicação entre UAVs.

Dada a diversidade dessa aplicação, que pode ser trabalhada como no estudo de (Olivieri de Souza; ENDLER, 2020) em que os drones são apenas "coletadores" de informação e não precisam, necessariamente, transmiti-las em tempo real para uma base central, bastando que ele retorne a base ou tenha um ponto específico de despejo das informações coletadas. Entretanto, se a operação for monitorada por uma central, os VANTs devem estar sempre conectados a ela, formando uma rede que permita streamings de vídeos, por exemplo.

Detecção de Incêndios Florestais

O uso de redes FANETs para a detecção de incêndios florestais acontece pelo monitoramento do calor ou do risco de incêndio de acordo com sensores específicos que alertam sobre desastres. As áreas arborizadas são as mais afetadas por este tipo de perigo. Em (CASBEER *et al.*, 2005), por exemplo, o autor desenvolve uma lógica de reconhecimento de incêndios em que o drone irá sempre percorrer os limites do calor gerado. O drone, que pode atuar de forma individual ou em dupla, percorre os limites do incêndio até encontrar uma base e transferir os dados necessários.

Em geral, os drones se mantêm estacionários ou se movem lentamente em torno das áreas que podem ser aquelas com maior probabilidade de surgimento de fogo (BUJARI *et al.*, 2017) (ZAFAR; KHAN, 2016). Após a detecção do incêndio, a rede de drones poderá, por exemplo, monitorá-lo e, portanto, a conectividade é um requisito não só para avisar da descoberta como continuar monitorando e enviando as informações para a base central.

Monitoramento Urbano e de Tráfego

Com os avanços tecnológicos atuais não são só os drones que estão se conectando, mas tanto carros, onibus ou quaisquer outros veículos podem estar acoplados com alguma tecnologia de comunicação. Carros se comunicando, por exemplo, podem evitar desastres

em rodovias ou em cidades. Esse paradigma pode ser potencializado com o uso da rede FANET dada a amplitude da visão dos drones para além da escala humana (ZAFAR; KHAN, 2016) (BUJARI *et al.*, 2017). Os drones podem detectar e notificar travamentos de tráfego viário facilmente. Outra hipótese seria o próprio monitoramento de rodovias ou de cidades para que ações de socorro médico ou policial possam ser acionadas.

Patrulha e Reconhecimento

O cenário de uma patrulha pode ser muito parecido com o de Operações de Busca e Resgate, mas o grande diferencial está no movimento pré-definido da rede de drones. A rede também tem o objetivo de monitorar uma área específica, porém, neste caso, não há o estabelecimento prévio de um alvo; espera-se um alerta para qualquer anomalia na área percorrida. As tarefas de vigilância podem incluir a coleta de imagens de objetos e locais de interesse espalhados por grandes áreas, o que pode demandar um alto processamento computacional e, conseqüentemente, um alto gasto energético no drone (BUJARI *et al.*, 2017) (CRUZ, 2018). O policiamento de fronteira é um caso que exemplifica bem essa aplicação, no qual a nuvem de drones pode detectar não apenas distúrbios humanos não planejados, incluindo aqueles envolvendo armas e drogas, mas também travessias ilegais de fronteira.

Gestão de Propriedade e Produção Agrícola

O uso de pequenas redes de drones podem superar as dificuldades espaciais e temporais em propriedades de terra, trazendo informações relacionadas à qualidade das safras, crescimento e outros possíveis problemas em questão de minutos (George *et al.*, 2013). Eles podem coletar dados de sensores espalhados pela propriedade, coletar fotos/vídeos afim de facilitar o trabalho de monitoramento ou de qualquer outro cenário de estudo agrícola, como condições de cultivo, propriedades do solo, entre outros.

Ampliação e Gestão de Redes

Casos como o Aquila (FACEBOOK, 2018), drone desenvolvido pelo Facebook para fornecer acesso de internet em áreas ainda sem coberturas, tem sido foco de diversos

estudos. Porém, o uso de múltiplos drones, ao invés de apenas um, pode também cumprir esse papel ao conectar um ponto de acesso a outros dispositivos que não estejam no alcance ou simplesmente criar uma rede de comunicação entre um grupo de pessoas ou dispositivos em uma área remota com um custo muito menor.

2.3 Características

Uma rede Ad hoc de veículos voadores (FANET) é uma derivação das redes MANET e, conseqüentemente, das redes VANET, cujo conceito central está na independência perante as infraestruturas de comunicação como 5G, pontos de acesso, cabeamentos ou até satélites (BEKMEZCI; SAHINGOZ; TEMEL, 2013) (KHAN *et al.*, 2017). As redes em questão apresentam características comuns, que serão descritas abaixo, e também peculiaridades que estão listadas na tabela 1.

A seguir são elencadas as principais características de uma rede Ad hoc:

- Topologia Dinâmica: em redes Ad hoc os nós da rede podem se movimentar livremente, seguir um caminho pré-definido ou seguir um algoritmo de mobilidade. E isso irá, conseqüentemente, afetar a topologia da rede obrigando que haja protocolos de roteamento especializados em definir as rotas da rede para acompanhar seu dinamismo.
- Autonomia no Controle da Rede: dado que a rede Ad hoc não possui, obrigatoriamente, um controle centralizado, os próprios nós assumem o controle. As regras para o controle podem estar descentralizadas em cada drone, criando uma rede de nós autônomos. Ou o controle pode ser de responsabilidade exclusiva de um líder específico, como nos casos de clusterização (WU *et al.*, 2019). Há, inclusive, redes Ad hoc híbridas, nas quais o controle pode ser exercido centralizado num líder ou não.
- Comunicação de Múltiplos Saltos: dado que a topologia é dinâmica e que não há um centralizador como os roteadores ou pontos de acesso, a comunicação é dada por múltiplos saltos entre os nós. A rede é reprogramada para que os nós operem como receptores e emissores ao mesmo tempo. Protocolos de roteamento especializados foram desenvolvidos para esses cenários, principalmente para as redes MANET, que possuem um número de estudos mais abrangentes (BEKMEZCI; SAHINGOZ; TEMEL, 2013).

- Densidade da Rede: redes Ad hoc tendem a ter uma variação em sua densidade da rede pois dependem muito do espaço que estão cobrindo e do número de nós presentes na rede. Entretanto, a densidade é um fato importantíssimo para montar a arquitetura de comunicação da rede (BEKMEZCI; SAHINGOZ; TEMEL, 2013).

Apesar das redes Ad hoc possuírem, em comum, as características descritas acima, a rede FANET possui diferenças significativas nas características indicadas a seguir:

- Mobilidade: o nó em uma rede FANET se movem constantemente, podendo ter uma velocidade alta e um caminho pré-definido ou um algoritmo de mobilidade.
- Mudanças de Topologia: As mudanças na topologia de uma rede MANET são lentas e graduais, o oposto da FANET dada a mobilidade dos nós.
- Propagação de rádio: Enquanto os nós em uma rede MANET ficam perto do chão, onde o sinal não sofre uma alta reflexão. Os drones em uma rede FANET estão a uma altura considerável o que pode modelar, consideravelmente, a forma de propagação do sinal de comunicação.
- Densidade de nós na rede ($\#$ nós / monitorados área): A densidade de nós nas duas redes pode ser considerada baixa porque a tendência é alocar um número mínimo de nós para tentar abranger a área monitorada. Apesar disso, a rede FANET tende a ter uma densidade menor devido ao movimento constante e ao tamanho da área, que, normalmente, é maior.

2.3.1 Considerações perante o Design da Arquitetura

A arquitetura de uma rede FANET pode variar muito devido à liberdade que suas características propiciam, seja pela autonomia no controle, pelo dinamismo na topologia, pela densidade da rede e outros fatores já citados. Na pesquisa de Ilker (BEKMEZCI; SAHINGOZ; TEMEL, 2013), ele fornece uma condensação de todas as considerações que devem ser levadas em conta para a definição da arquitetura em si, resumidas a seguir:

1. Adaptabilidade: o design da arquitetura de uma rede FANET deve estar preparado para se adaptar a uma série de mudanças e/ou falhas.
 - a) A mobilidade faz com que toda a rede se adapte a mudança da localização, o que afeta, principalmente, os protocolos de roteamento. E o desempenho da

Tabela 1 – Tabela com resumo das principais características das redes ad Hoc

| Características de Redes Adhoc | | | |
|---------------------------------------|--|--|--|
| | MANET | VANET | FANET |
| Mobilidade do Nó | Baixa mobilidade, nós normalmente fixos. | Alta mobilidade, velocidades distintas. | Altíssima mobilidade. |
| Modelo de Mobilidade | Randômica ou até fixa. | Regular e padronizada devido aos requisitos urbanos. | Mobilidade pré definida ou uso de modelos de mobilidade específicos para sistemas de múltiplos drones. |
| Densidade | Baixa | Alta | Muito baixa |
| Mudança de Topologia | Lenta e controlada | Rápida com padrões temporais e espaciais | Rápida e possivelmente controlada |
| Consumo de Energia | Atrelado a eficiência da comunicação | Perene | Atrelado a tecnologia do drone e da comunicação |
| Processamento Computacional | Baixo, baseado em sensores | Alto | Alto |

rede está diretamente atrelado a capacidade de adaptação nas mudanças de rotas.

- b) A falha em um drone deve ser tratada na programação da coordenação entre eles para que outro drone assuma o papel do que sofreu baixa ou que uma outra alternativa seja implementada para dar seguimento a missão da rede.
 - c) As condições ambientais também devem ser consideradas devido à necessidade de programar o voo e também a comunicação, dado que uma barreira física pode impedir a comunicação entre um ou mais drones.
 - d) Os sistemas de múltiplos drones sempre terá uma ou mais missões, mas caso seja necessário alterá-las, o sistema deve estar preparado para tal.
2. Escalabilidade: a facilidade em implementar cada vez mais drones em uma rede FANET deve ser levada em consideração dado que o número de drones afeta a densidade e, conseqüentemente, muda os caminhos de roteamento dos pacotes. Deve-se analisar os limites do sistema e prepará-lo para mudanças súbitas perante esse fator.
 3. Latência: fator que depende muito da aplicabilidade da rede, mas a necessidade de impedir colisões entre os drones, por exemplo, implica na necessidade de diminuir a latência da rede.

4. Restrições Físicas do Drone: a escolha dos drones a serem utilizados na rede deve se atentar ao tempo de voo, devido ao consumo energético, e ao peso dos equipamentos embutidos.
5. Requisito de Largura de Banda: uma solução de streaming de vídeos, como a proposta nesse projeto, requer uma largura de banda relativamente alta por não tolerar latência ou perda de comunicação.

2.4 Comunicação

As considerações apresentadas na seção anterior em relação à arquitetura da rede impactam diretamente o módulo de comunicação. A escolha da tecnologia de comunicação, o IEEE 802.11, assim como os protocolos de roteamento devem levar em conta todos os requisitos pontuados acima.

2.4.1 Camada Física

Dado que a comunicação entre os drones deve ser sem fio, as possibilidades para a camada física se limitam aos meios de comunicação por ondas de rádio. As soluções estudadas para a construção da arquitetura desse projeto e que se adequam ao contexto FANET são: IEEE 802.11 e 802.15.4. De início, os padrões foram estudados, respectivamente, pela capacidade de um alta vazão e pelo alcance que o padrão pode atingir, mas cada uma possui suas peculiaridades que serão muito importantes para este trabalho. A subseção que se segue, portanto, irá descrever cada um desses padrões.

IEEE 802.11

Wireless LAN (WLAN, também conhecido como Wi-Fi) é um conjunto de tecnologias de rede que se populizou por fornecer internet não cabeada para residências e escritórios. Suas aplicações, no entanto, vão muito além disso. O padrão IEEE 802.11 opera, normalmente, nas bandas de frequência Industrial, Science and Medical (ISM) de 2,4 GHz e 5 GHz. Ele foi padronizado pelo comitê IEEE Local Area Network / Metropolitan Area Network (8802-11, 1999) e possui diversas ramificações da ideia inicial, criadas visando

cada qual sua aplicabilidade e necessidade. As versões 1997, a, b, g, n, ac e a p são os exemplos dessa ramificação e suas características podem ser comparadas na tabela 2 (ABDELRAHMAN; MUSTAFA; OSMAN, 2015a)(SHARMA; SINGH, 2016).

Tabela 2 – Tabela com comparação entre as versões do padrão IEEE.

| PADRÃO | DATA DE PADRONIZAÇÃO | TAXA DE TRANSMISSÃO MÁXIMA (Mbps) | BANDA (GHz) | ALCANCE (metros) |
|----------|----------------------|-----------------------------------|-------------|------------------|
| 1997 | 1997 | 1 - 2 | 2.4 | 100 |
| 802.11a | 1999 | 54 | 5 | 80 |
| 802.11b | 1999 | 11 | 2.4 | 100 |
| 802.11g | 2003 | 54 | 2.4 | 100 |
| 802.11n | 2009 | 600 | 2.4 e 5 | 300 |
| 802.11ac | 2014 | 1000 | 5 | 160 |
| 802.11p | 2010 | 27 | 5.9 | 1000 |

Dadas as suas características básicas apresentadas como relevantes para este projeto, pode-se levantar as possíveis aplicações para cada uma das versões e pontuar seu o engajamento no projeto (KHAN; QURESHI; KHANZADA, 2019) (ABDELRAHMAN; MUSTAFA; OSMAN, 2015b).

1. 802.11-1997: A primeira versão do padrão Wi-Fi, lançada em 1997, usa a banda de 2,4 GHz gerando taxas de 1 a 2Mbps, velocidade muito inferior às das outras versões; o alcance ainda é baixo para criar uma rede FANET como desejado no projeto. Além disso não possui o conceito de Multiple Input, Multiple Output (MIMO), o que permite que um dispositivo opere como ponto de acesso e host na rede, impossibilitando o seu uso neste projeto.
2. 802.11a: Versão criada em 1999, fornece uma técnica mais eficiente para transmissão de dados com velocidade máxima de transmissão de 54 Mbps, um avanço enorme em relação à versão anterior, mas a diminuição do alcance máximo a torna insuficiente para o projeto, além de não possuir o conceito de MIMO.
3. 802.11b: Possui a mesma técnica que a versão a mas com banda menor, gerando uma velocidade de 11Mbps e aumentando um pouco o alcance máximo para 100m. Também, não possui o conceito de MIMO.
4. 802.11g: Aprovado em 2003, o 802.11g foi o sucessor do 802.11b, capaz de atingir taxas de até 54Mbps na banda de 2,4 GHz, igualando a velocidade do 802.11a e com

alcance de 100m mas dentro da faixa de frequência mais baixa. Também, não possui o conceito de MIMO.

5. 802.11n: O primeiro padrão a especificar MIMO em 2009, permite o uso em duas frequências - 2,4 e 5 GHz, com velocidades de até 600 Mbps e com alcance de até 140 metros. Padrão de interesse para o projeto devido à velocidade que pode favorecer o streaming e ao aumento do alcance da rede FANET.
6. 802.11ac: Padrão com altíssima taxa de transmissão, de 1000Mbps, devido a uma extensão e melhorias no padrão n.
7. 802.11p: Padrão criado com foco na comunicação entre veículos, mas com possibilidade, também, de comunicação do veículo com pedestres e com as infraestruturas como o 5G. Tornou-se comum em redes VANETs, devido ao alcance de 1000m, que permite uma comunicação com velocidade relativamente alta de 27Mbps.

De acordo com as especificidades das versões apresentadas, já se faz necessário excluir os padrões 1997, a, b e g devido à ausência da tecnologia que permite MIMO e, conseqüentemente, o conceito de Ad hoc em si. Dessa forma, os padrões restantes, n, ac e p, são os únicos passíveis de testes para a arquitetura que este projeto vislumbra. O último desses é o mais promissor devido à distância a que ele pode transmitir informações e ao desenvolvimento com foco numa rede análoga como a VANET. Os outros dois podem ser, também, soluções viáveis caso o alcance da rede como um todo não ultrapasse a distância máxima entre um drone e outro de 140 m e 160 m respectivamente. Além disso as taxas de transmissão podem favorecer muito o streaming de vídeos vislumbrado.

Por essas considerações, será utilizado neste projeto o padrão p mas caso os resultados não sejam satisfatórios, as outras tecnologias como n, ac podem ser testadas.

IEE 802.15.4

Zigbee é um conjunto de especificações para a comunicação sem-fio derivado do padrão IEEE 802.15.4 e focado em cenários que requerem baixa potência de operação, baixa taxa de transmissão de dados e baixo custo de implementação. Ele foi pensado em conjunto com o paradigma da Internet das Coisas devido à necessidade de se conectar diversos pequenos dispositivos com um baixo custo de energia e de implementação. Entretanto, sua padronização define um alcance de aproximadamente 100 m, distância menor que as das

redes criadas utilizando o 802.11 e, portanto, não há uma aplicabilidade para o cenário proposto por este trabalho (ZANELLA; ZORZI, 2016) (ANDRE *et al.*, 2014) (DAVOLI *et al.*, 2018). A distância entre os drones deve ser a maior possível e utilizar uma tecnologia de rede que diminui esse requisito não é recomendável. Mais detalhes sobre o conceito dessa tecnologia podem ser encontrados no trabalho de (BARONTI *et al.*, 2007).

No cenário de uma FANET, seria muito interessante se o alcance da tecnologia não limitasse a solução proposta. Entretanto, o conceito foi aprimorado para atender redes com um maior número de dispositivos, criando o ZigBee PRO e, também, o XBee-PRO. Ambos fornecem uma comunicação de longo alcance, atingindo quase 1.5 Km (ANDRE *et al.*, 2014) (KHILARE, 2016), o que não só soluciona a questão do alcance como pode fornecer uma possibilidade ainda melhor para as FANETs.

2.4.2 Camada de Rede

Optimized Link State Routing é um protocolo de roteamento pró-ativo para redes Ad hoc. É considerado pró-ativo porque a rota está sempre disponível no momento em que é necessária. Isso ocorre devido à troca regular de informações sobre a topologia da rede entre os nós. Cada nó é responsável por enviar pacotes de controle para todos os outros nós utilizando a distribuição por *broadcast*. Esse método de distribuição pode gerar uma sobrecarga na rede devido ao grande e contínuo envio de pacotes.

Embora o protocolo apresente problemas com requisitos de largura de banda em uma rede Ad hoc, ele pode otimizar a comunicação fornecendo o caminho mais curto usando multiponto relay (MPR). O MPR funciona escolhendo um número de nós vizinhos que ajudarão a transmitir pacotes de controle para a rede, reduzindo o excesso de informações na rede. OLSR tem quatro tipos de mensagens de controle importantes:

- HelloMessages: Eles são usados para descobrir informações sobre status do link;
- Mensagens de controle de topologia (TC): Elas são usadas periodicamente para enviar informações sobre a seleção da lista de nós vizinhos, para propagar o MPR;
- Declaração de Interface Múltipla (MID): Mensagem enviada para toda a rede pelos MPRs. É utilizado para avisar outros nós, que o respectivo nó possui várias interfaces / endereços;

- Host and Network Association (HNA): é o mesmo tipo de mensagem do TC, mas com a diferença de que tem validade. Embora uma mensagem TC precise relatar um cancelamento, o HNA não tem um prazo definido.

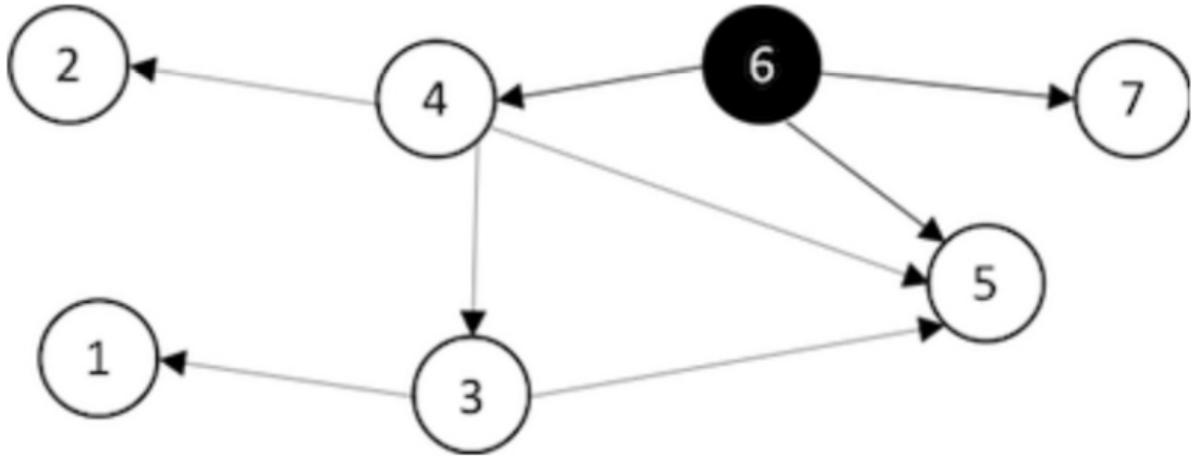


Figura 1 – Exemplo da lógica MPR

A Figura 1 é uma exemplificação da lógica MPR. O nó seis cria uma mensagem TC e a envia para quatro, cinco e sete. O nó 4 transmite TC (6) do nó seis e o nó 3 transmite TC (6.4) do nó 4 e assim por diante.

3 Estado da Arte

No capítulo que se segue será apresentada a revisão da literatura referente a três temas: Fanet - Flying Ad hoc Network, Coordenação e Cooperação dos Drones e Tecnologia Híbrida.

3.1 *Fanet - Flying Ad hoc Network*

O paradigma das redes FANET é relativamente novo em relação a outras áreas ou a outras redes Ad hoc, como redes MANET. A literatura sobre o assunto ganhou uma abordagem mais ampla a partir de 2013. Naquele ano, Ilker Bekmezci ([BEKMEZCI; SAHINGOZ; TEMEL, 2013](#)) escreveu uma extensa e abrangente revisão sobre o tema, com enfoque na comunicação entre VANTs - as arquiteturas e os protocolos de comunicação possíveis. Todas as arquiteturas propostas têm pelo menos um drone conectado à base, considerando duas possibilidades: arquitetura hierárquica, em que um drone é responsável por conectar a rede de VANTs com a base e arquitetura individualizada ([LIU; ZHANG; ZHANG, 2008](#)), em que qualquer drone pode se conectar a base.

Quando se trata de redes de computadores, os protocolos de roteamento exercem uma grande influência no desempenho da rede e, por isso, Bekmezci apresenta um estudo de diversos protocolos, listados a seguir. Enquanto Bekmezci se concentrava na questão da comunicação, Khan ([KHAN *et al.*, 2017](#)) realizou uma extensa pesquisa sobre o paradigma das redes FANET. Ele se concentra em cenários de aplicativos e arquiteturas possíveis, comparando a FANET com as outras redes Ad hoc - Rede Móvel Ad hoc e Rede Ad hoc de Veículos. São discutidos todos os desafios do protocolo de comunicação para todas as camadas físicas, MAC, de rede e de transporte, incluindo considerações sobre o uso de camada cruzada. Na camada de rede, Khan aponta os mesmos tipos de protocolos de roteamento de Bekmezci, indicados a seguir:

- Protocolos de Roteamento Estático - protocolos baseados na suposição de que não há mudanças na topologia da rede,
- Protocolos de roteamento pró-ativo - protocolos que mantêm a topologia da rede constantemente atualizada para cada nó,

- Protocolos de Roteamento Reativo - protocolos que buscam e mantêm as informações de uma rota de acordo com a demanda de comunicação,
- Protocolos de roteamento híbrido - protocolos que combinam práticas reativas e pró-ativas,
- Protocolos de roteamento baseados em posição/geográficos - protocolos que são baseados no fato de que cada nó conhece a posição geográfica de outros,
- Protocolos de Roteamento Hierárquico - protocolos que foram criados para o cenário onde os nós são divididos em grupos e cada grupo possui um líder. Este está conectado com outros líderes ou com a base e que cada nó do grupo está conectado a ele.

Além dos pontos mencionados acima, outro grande problema discutido é o modelo de mobilidade dos drones em uma rede FANET. Cada modelo, segundo Khan e Zafar (ZAFAR; KHAN, 2016) apresenta sua aplicação, conforme mostrado na Tabela 3. O modelo *Manhattan Grid* permite simulações de áreas urbanas complexas pois gera um movimento análogo aos veículos nas ruas de Manhattan, um mapa em grade. Em *Random waypoint*, o nó se locomove em uma linha reta para uma localização randômica com velocidade constante (BIOMO; KUNZ; ST-HILAIRE, 2014). No caso do modelo *Reference Point Group*, os nós se movimentam randomicamente mas sempre em relação a um nó líder. E, por último, o modelo *Gauss Markov* em que o vetor velocidade dos nós é definido de acordo com o vetor anterior por meio das equações gaussianas (BIOMO; KUNZ; ST-HILAIRE, 2014).

Tabela 3 – Modelos de mobilidade e suas principais aplicações (ZAFAR; KHAN, 2016)

| MODELO | APLICAÇÃO |
|-----------------------|----------------------------|
| Manhattan Grid | Áreas urbanas complexas |
| Random WayPoint | Sistemas de Patrulha |
| Reference Point Group | Missões de busca e resgate |
| Gauss Markov | Redes confiáveis |

3.2 Coordenação e Cooperação dos Drones

A união dos modelos de mobilidade com os protocolos de roteamento apresentados acima é uma das formas de se configurar uma rede de drones. Cada cenário/aplicação poderia escolher o modelo de mobilidade e aplicar o melhor protocolo de roteamento para ele. Mas, qualquer que seja o cenário, fica evidente que o equilíbrio entre a movimentação e

a comunicação se faz necessário. A possibilidade de aplicar um roteamento hierárquico, por exemplo, em que um drone é definido líder já é uma tentativa de criar uma coordenação entre a comunicação e o roteamento da informação. Em se havendo sempre um líder, fica mais fácil definir qual drone se comunica com a central e, também, como é feita a comunicação dentro do grupo. Propostas que usam essa ideia podem ser vistas nos artigos de Arafat ([ARAFAT; MOH, 2019](#)), Shi ([SHI; LUO, 2012](#)), Wu ([WU *et al.*, 2019](#)) ou na revisão de Ilker ([BEKMEZCI; SAHINGOZ; TEMEL, 2013](#)). Este último, por exemplo, defende que a ideia de dividir os drones em grupos poderia endereçar os problemas decorrentes dos protocolos de roteamento existentes e melhorar a escalabilidade do sistema como um todo.

A ideia de associar o movimento com a comunicação ganha ainda mais força com o estudo realizado anteriormente a esse ([ZUCCHI; SILVEIRA, 2018](#)), cujos resultados mostram que sem cooperação não haverá como os protocolos apresentarem um desempenho factível. Yanmaz ([YANMAZ *et al.*, 2018](#)) reforça essa ideia ao apresentar uma visão holística dos sistemas de múltiplos VANTs. De início, o artigo descreve holisticamente como um sistema de multi-VANTs pode ser configurado, especificando três grandes áreas a serem configuradas:

- Sensores (Coleta de dados)
- Comunicação
- Coordenação

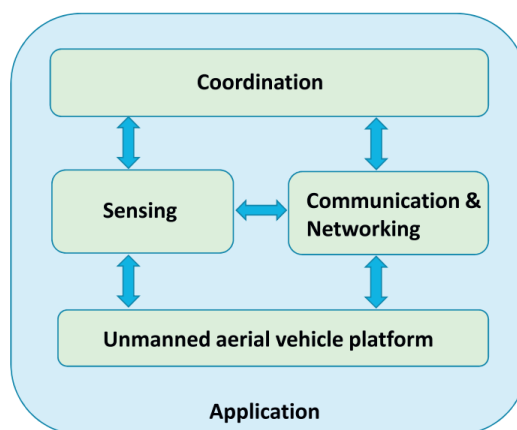


Figura 2 – Figura apresentada por Yanmaz ([YANMAZ *et al.*, 2018](#)) para exemplificar a visão holística de um sistema multi drones

Ainda dentro do objetivo de tentar criar um modelo único para todos os sistemas de múltiplos drones, o autor pontua que esses sistemas podem ser usados em diversas situações, mas os parâmetros iniciais devem partir sempre da escolha do:

- Tipo de drone
- Tipo de algoritmo usado na coordenação e comunicação entre os drones
- Tipo de aplicação desejada

Após essa explicação holística perante um sistema de múltiplos drones, o autor pontua a importância de haver uma rede cooperativa entre os drones, na qual todos os dados mensuráveis devem ser compartilhados para que sejam interpretados, possibilitando, posteriormente, uma reorganização da rede como um todo. Dessa forma, métricas da comunicação, por exemplo, podem influenciar a movimentação dos drones, aproximando-os ou afastando-os. As rotas dependem da topologia e esta, por sua vez, do movimento.

Outros autores também apresentam o conceito da coordenação como solução para redes de múltiplos drones. Gu ([GU *et al.*, 2018](#)) propõe um sistema cooperativo de drones, em que as rotas de comunicação são programadas de acordo com o planejamento da movimentação proveniente da ordenação prévia das tarefas. Fadlullah ([FADLULLAH *et al.*, 2016](#)) também aborda a questão, ao propor uma movimentação programada dos drones, usados como multiplicadores para criar uma rede confiável em que pontos no solo se comuniquem com a base. O algoritmo proposto pelo autor usufrui, inclusive, de análises instantâneas da rede, como o congestionamento dos links, para programar a movimentação. Algo que será trabalhado nessa dissertação.

Scherer ([SCHERER *et al.*, 2015](#)) abstrai ainda mais a ideia ao propor uma estrutura, composta de diversos módulos, sejam de comunicação, de movimentação e de streaming que podem operar centralizados na base ou descentralizados nos próprios drones. A partir desses módulos, o autor apresenta um sistema que utiliza diversos drones, para ampliar e dar maior confiabilidade para a rede de comunicação que envia os vídeos coletados para a base. Assim como Scherer, Churyumov ([CHURYUMOV *et al.*, 2018](#)) e Causa ([CAUSA; FASANO; GRASSI, 2018](#)) também reforçam o conceito de módulos e defendem a ideia de que é importantíssimo para uma nuvem de drones ter um mecanismo que identifique falhas e as corrija, criando um cenário de coordenação e cooperação.

3.3 Tecnologia Híbrida

A coordenação e a cooperação entre os drones só é possível com o resultado da comunicação entre eles. Há diversas tecnologias possíveis para se criar essa comunicação, mas todas devem ser sem fio, como os padrões IEEE 802.11, 4G/5G ou comunicação via satélite. O foco inicial deste projeto estava no IEEE 802.11. Mas suas características, como o baixo alcance da comunicação, 180m no máximo, e o alto consumo de energia, dado que o protocolo IEEE 802.11 foi elaborado para altas taxas de transmissão de dados, são importantes questões a serem trabalhadas para que o sistema de múltiplos drones se coordene de forma eficiente.

As questões citadas acima são tratadas pelos autores Torsten ([ANDRE *et al.*, 2014](#)), Pereira ([PEREIRA *et al.*, 2020](#)), Zhou ([ZHOU NAN;CHENG, 2015](#)), Zafar ([ZAFAR; KHAN, 2017](#)), Khan ([KHAN; KHALID; KHANZADA, 2019](#)) e Silva ([SILVA *et al.*, 2017](#)). Todos reforçam a dificuldade de se basear no protocolo IEEE 802.11 com a finalidade de habilitar a comunicação concomitantemente com a coordenação e controle dos drones. Os autores defendem que o padrão IEEE 802.11 se adequa muito bem ao processo de comunicação de altas taxas de dados, mas propõem o uso da tecnologia ZigBee, especializado em comunicações de baixas taxas de dados, com baixa latência e baixo consumo energético, como uma alternativa para sistemas de múltiplos VANTs. Alguns o veem como substituto ao IEEE 802.11 como no trabalho de Pereira ([PEREIRA *et al.*, 2020](#)), que avalia uma rede FANET baseada apenas no IEEE 802.15.4. Outros defendem a ideia de usar os benefícios deste na coordenação e na troca de pacotes de controle entre os drones apenas, deixando a transmissão dos dados coletados pelo sistema para a camada baseada no IEEE 802.11. Há uma exceção dentro desses trabalhos, pois Khan ([KHAN; QURESHI; KHANZADA, 2019](#)) propõe o uso de outro padrão, o IEEE 802.15.1, mas possui o mesmo ponto de partida dos demais ao visar o uso concomitante de dois padrões para usufruir dos benefícios de ambos. O objetivo de todos é diminuir, principalmente, o impacto energético com o Zigbee ou com o IEEE 802.15.1 pois ambos foram desenhados para baixas taxas de transferência e, também, operam em *hardwares* leves ([ZHOU NAN;CHENG, 2015](#)). O padrão IEEE 802.15.4 apresenta, também, uma baixa latência na comunicação ([PEREIRA *et al.*, 2020](#)) ([ANDRE *et al.*, 2014](#)), essencial e benéfico para a coordenação ser precisa e amplamente divulgada na rede sem atrasos consideráveis. Uma falha ou atraso na

comunicação pode causar impactos no desempenho ou até perda de drones, seja por colisões ou por movimentações deturpadas pelo atraso.

Em adendo a todos esses benefícios da implementação da rede com tecnologia híbrida, os autores Torsten ([ANDRE *et al.*, 2014](#)), Pereira ([PEREIRA *et al.*, 2020](#)) e Zhou ([ZHOU NAN;CHENG, 2015](#)) introduzem o módulo XbeePro como solução para a barreira do alcance do IEEE 802.11. O módulo é um componente eletrônico com conectividade sem fio que permite um alcance de 6.5Km segundo Pereira ([PEREIRA *et al.*, 2020](#)) ou 1.5km segundo Torsten ([ANDRE *et al.*, 2014](#)) e suporta o padrão IEEE 802.15.4.

Nos trabalhos citados nesta seção há duas visões. A primeira foca apenas no IEEE 802.15.4 como uma alternativa substitutiva ao IEEE 802.11. No caso de Pereira ([PEREIRA *et al.*, 2020](#)), o ZigBee, junto com o módulo XBeePRO, é usado para criar a comunicação drone para drone e drone para a base central, o sorvedouro. Ele não propõe uma coordenação, dado que ele trabalha com quatro cenários específicos. Em todos, o drone tem total autonomia para monitorar uma determinada área sozinho, sendo que em três ele se comunica direto com a base central e, no último, há apenas um drone extra que estende o alcance do outro. Por outro lado, Silva ([SILVA *et al.*, 2017](#)) foca em usar o ZigBee sem o módulo extra, restringindo o alcance dos drones a 150 metros. O autor visa analisar o desempenho do IEEE 802.15.4 em cenários de três ou quatro drones sem um protocolo de roteamento claro.

A segunda visão, que aborda o conceito de uma arquitetura híbrida do ZigBee com o IEEE 802.11, é introduzida por Zafar ([ZAFAR; KHAN, 2017](#)). Na figura 3 é evidenciado que ZigBee é o padrão da comunicação drone para drone e o IEEE 802.11 da comunicação drone para sorvedouro. Entretanto o autor foca apenas em analisar o desempenho da comunicação entre os drones perante os protocolos de roteamento comuns de redes Ad hoc - o AODV, o DSDV (Destination-Sequenced Distance Vector routing) e OLSR (Optimized Link State Routing Protocol), não realizando um trabalho com uma arquitetura híbrida de fato. Khan ([KHAN; KHALID; KHANZADA, 2019](#)), por outro lado, propõe um esquema híbrido do IEEE 802.11 com o IEEE 802.15.1. Os resultados da simulação de um cenário de $1km^2$ com 42 drones se movimentando, segundo modelo pré-definido, foram muito positivos com um ótimo desempenho em taxa de transmissão e atraso. Isso fortalece os benefícios de aliar uma tecnologia leve e de baixo custo energético como o IEEE 802.15.1 com a alta taxa de transmissão do IEEE 802.11. Entretanto, o autor finaliza com uma

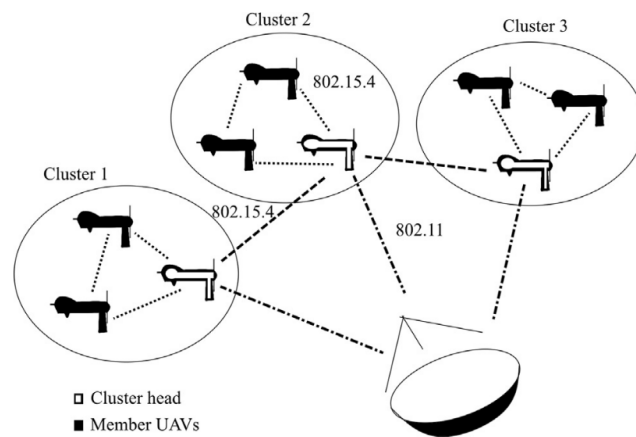


Figura 3 – Figura apresentada por (ZAFAR; KHAN, 2016) para ilustrar o funcionamento do sistema de tecnologia híbrida

ressalva da solução, explicitando que ela não resolve a dependência de se realizar múltiplos saltos para a entrega do pacote, a questão do *backhaul*, como identificado pelo autor.

A arquitetura híbrida é abordada por Zhou (ZHOU NAN; CHENG, 2015) com o termo "redes heterogêneas", unindo o IEEE 802.11 com o IEEE 802.15.4, este com o módulo XBee-PRO acoplado. O autor realiza uma revisão completa dos cenários, das aplicações, dos desafios e da bibliografia de redes de múltiplos drones e, então, descreve sua proposta de uma rede de duas camadas, ar e solo. Os drones, no ar, tem o objetivo de potencializar a rede de veículos no solo, fornecendo informações e, também, estendendo a rede como um todo. Zhou defende que a combinação do XBee-PRO com o IEEE 802.15.4 nos drones possibilita uma rede de maior alcance com baixa taxa de transmissão, utilizando-se dispositivos leves, o que favoreceria a coordenação na movimentação aérea. Enquanto que, para transmitir imagens ou vídeos, o padrão IEEE 802.11 seria capaz de prover as altas taxas de transmissão necessárias.

Torsten (ANDRE *et al.*, 2014) sugere, também, um conceito análogo para uma rede complexa de drones que podem não apenas coletar informações de uma área como, também, conectar pontos no solo com a borda da rede, ampliando a área de cobertura. A transmissão de dados coletados seria feita por meio do padrão IEEE 802.11 e o controle e a coordenação dos drones pelo padrão IEEE 802.15.4. O conceito, que pode ser visto na figura 4, para o autor, possui um grande potencial e ele o descreve com detalhes, mostrando a arquitetura, o design e os desafios do sistema. Entretanto, assim como Zhou, ele não apresenta nenhuma simulação ou teste, nem dados para comprovar os benefícios de sua ideia.

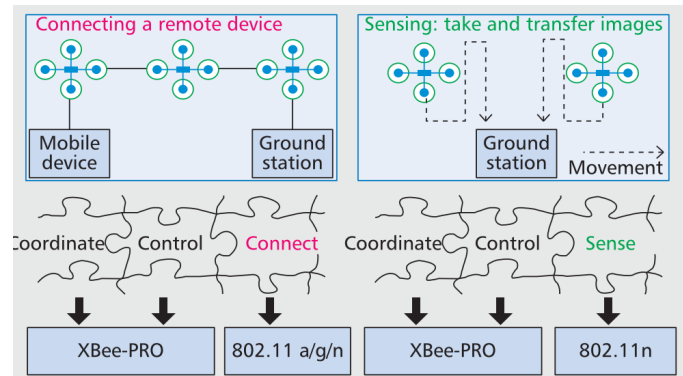


Figura 4 – Figura apresentada por (ANDRE *et al.*, 2014) para ilustrar o funcionamento do sistema de tecnologia híbrida

Esta dissertação pretende, então, se basear nos autores citados acima para desenhar e simular uma arquitetura de rede de drones com tecnologia híbrida (IEEE 802.11 e IEEE 802.15.4) com o objetivo de coletar informações de diversos pontos. Este trabalho irá, também, incluir um módulo de cooperação no qual ambos os padrões poderão trocar informações, otimizando alguns processos. Diversos cenários de testes serão simulados para poder avaliar a viabilidade, pontuando os benefícios e ônus da arquitetura proposta.

3.4 Algoritmos de Movimento

O interesse no uso de enxames autônomos de drones vem aumentando em várias aplicações, gerando sistemas complexos com restrições de segurança e eficiência para garantir operações confiáveis. Com o intuito de maximizar a segurança do movimento, é necessário projetar a movimentação do enxame de forma que se evite colisões entre vizinhos e/ou obstáculos no ambiente. Por outro lado, para garantir que os drones tenham energia suficiente para completar uma missão de forma confiável, devemos também obter eficiência durante a execução da missão, minimizando a distância de viagem dos drones. E todos os trabalhos considerados nesse estudo levam em conta ambos os pontos acima para propor um algoritmo de movimentação para o enxame de drones (ROBERGE; TARBOUCHI; LABONTE, 2013) (PITRE; LI; DELBALZO, 2012) (TEACY *et al.*, 2010) (LI; SUN; XU, 2006) (SÁNCHEZ-GARCÍA; REINA; TORAL, 2019) (SHAO *et al.*, 2020) (PHUNG; HA, 2021) (WU *et al.*, 2018) (KONATOWSKI; PAWŁOWSKI, 2018) (TENG *et al.*, 2020) (MARRO; GONÇALVES, 2013).

3.4.1 Algoritmos de Movimento de Enxame Bioinspirados

O termo "Swarm" se refere justamente a um grupo de unidades, como, por exemplo, pássaros, abelhas ou dispositivos, que cooperam entre si trocando informações relevantes, principalmente para a movimentação, o que pode ser denominado de inteligência coletiva. Essa permite resolver um sistema complexo com vários integrantes e requisitos sensíveis (KONATOWSKI; PAWŁOWSKI, 2018).

A inteligência, normalmente, não tem um líder, mas possui uma lógica compartilhada por todos os integrantes do enxame (KONATOWSKI; PAWŁOWSKI, 2018). Algo que se assemelha a lógica de redes Ad hoc. O comportamento de um depende da interpretação de seus próprios resultados e da comunicação com os outros. E com isso, o sistema entra numa busca contínua por uma solução heurística (sub-ótima) (ROBERGE; TARBOUCHI; LABONTE, 2013) (KONATOWSKI; PAWŁOWSKI, 2018). E a solução ótima na busca de um caminho para o enxame é representada por uma função de custo desenvolvida para atender múltiplos objetivos (ROBERGE; TARBOUCHI; LABONTE, 2013). Dentre esses algoritmos heurísticos, três são muito famosos: Particle Swarm Optimization (PSO), Artificial Bee Colony (ABC) e Ant Colony Optimization (ACO).

Particle Swarm Optimization (PSO)

O PSO foi inspirado no comportamento de pássaros procurando por comida e sua implementação se baseia na definição de um função que considera várias partículas em um determinado espaço.

Cada uma dessas partículas determina sua própria movimentação levando em consideração sua localização passada e atual e a movimentação de algumas partículas vizinhas (KONATOWSKI; PAWŁOWSKI, 2018). Esse cálculo ocorre de forma iterativa em todas as partículas, gerando um movimento coordenado entre todo o enxame que está otimizado dado a função de cálculo (PHUNG; HA, 2021).

Artificial Bee Colony (ABC)

O ABC foi inspirado pelo comportamento das abelhas na busca por néctar e, também, utiliza informação do enxame como um todo para se chegar numa solução ótima de movimentação de cada integrante. No caso das abelhas, a "dança" é a forma de comunicar as outras do que ocorreu com a abelha em questão (KONATOWSKI; PAWIOWSKI, 2018).

As partículas dentro do algoritmo ABC podem ser divididas em três grandes grupos (KONATOWSKI; PAWIOWSKI, 2018): (1) coletora engajada, que sabe a localização de uma determinada fonte de alimento e a transmite para o restante do enxame; (2) coletora desengajada e olheira, partícula que procura organicamente outras fontes de energia; e, por último, (3) coletora desengajada e observadora, que aguarda a transmissão de outra partícula para agora sobre a coleta. Pode ser que (2) encontre uma fonte de alimento e a quantidade é tanta que necessita de outra coletora, dessa forma lança um sinal para chamar uma observadora. Essa última passa a se tornar uma coletora engajada.

Ant Colony Optimization (ACO)

O ACO foi inspirado pelo comportamento das formigas na orientação das demais dentro de uma colônia e, também, na busca por alimento fora. A comunicação das formigas se baseia em feromônios que cada uma solta no caminho, orientando as subsequentes com esse vestígio. A quantidade do feromônio é que define a escolha do caminho por uma determinada formiga. O mesmo ocorre com o algoritmo criado para simular esse comportamento, pois cada integrante do enxame tem a capacidade de armazenar informações sobre o caminho percorrido até então (KONATOWSKI; PAWIOWSKI, 2018), isso fica mais claro ao estudarmos a figura 5.

3.4.2 UAVs e os algoritmos de enxame

A proposta mais comum e latente na bibliografia que envolve enxames de UAVs e os algoritmos apresentados na subseção acima está no uso adaptado desses para encontrar a melhor e mais otimizada rota de movimentação. Sua adaptação se dá, na maioria dos casos, na criação de uma função de custo que deverá ser minimizada pelo algoritmo de

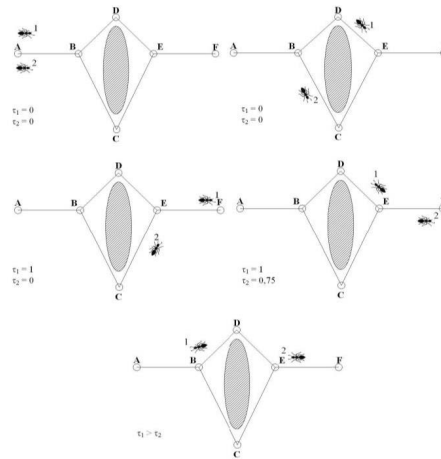


Figura 5 – Figura apresentada por Konatowski (KONATOWSKI; PAWŁOWSKI, 2018) para exemplificar o algoritmo ACO e o seu comportamento

enxame e, conseqüentemente, resultar iterativamente na movimentação de cada um dos drones.

No caso de Roberge (ROBERGE; TARBOUCHI; LABONTE, 2013), a função leva em conta o tamanho do caminho encontrado, a altitude, as zonas de perigo, a quantidade de energia e combustível a ser consumida, entre outros parâmetros. O mesmo itera essa função até atingir seu valor mínimo e encontrar a solução sub-ótima. Pitre (PITRE; LI; DELBALZO, 2012) apresenta um conceito semelhante, mas os parâmetros de sua função estão mais interligados com as informações coletadas e suas respectivas análises, dado que seu objetivo final é a de detectar e encontrar objetos de interesse no solo. Shikai (SHAO *et al.*, 2020) complementa essa ideia ao usar informações sobre os obstáculos enfrentados pelos UAVs também. E Xiande (WU *et al.*, 2018) tece uma crítica sobre a eficiência do PSO em achar a solução ótima e sugere o uso do suavizador Rauch–Tung–Striebel (RTS) para otimizá-lo.

Lamont (LAMONT; SLEAR; MELENDEZ, 2007), Teacy (TEACY *et al.*, 2010), Li (LI; SUN; XU, 2006), Sanches (SÁNCHEZ-GARCÍA; REINA; TORAL, 2019), Phung (PHUNG; HA, 2021), Teng (TENG *et al.*, 2020) e Marro (MARRO; GONÇALVES, 2013) seguem o mesmo conceito de introduzir novos parâmetros e estudar a influência desses na eficiência da montagem das rotas de movimentação. E se baseando em todos esses autores que esse trabalho se propôs a adaptar o algoritmo PSO para garantir alguns requisitos na movimentação e, conseqüentemente, otimiza-la. A movimentação tem que garantir que todo drone esteja a uma distância mínima e a uma distância máxima de pelo menos um dos seus vizinhos, evitando, respectivamente, colisões e desconexões da rede.

4 Arquitetura Modular Descentralizada de Cooperação

Na seção que se segue, será discutido a proposta deste trabalho, que terá como base uma arquitetura modular e descentralizada com três módulos: cooperação, movimentação e comunicação. Será descrito o evento de estudo que motivou a concepção da arquitetura, deixando evidente o objetivo de conceber a cooperação entre o movimento e a comunicação dos drones. Em seguida a arquitetura será explicada conjuntamente com dois algoritmos essenciais para seu funcionamento: o Algoritmo de Distanciamento do Vizinho e de Coesão com o Destino (ADVCD) e o Protocolo de Roteamento Baseado em Saltos (PRBS).

4.1 Evento de Estudo

O ponto de partida desse projeto leva em consideração as aplicações de *operações de busca e resgate, detecção de incêndios florestais, patrulha e reconhecimento, ampliação e gestão de redes e gestão de propriedade e produção agrícola*, que foram citadas na seção 2. A aplicação de *monitoramento urbano e de tráfego* é a única que não será levada em consideração por apresentar um conceito muito mais amplo, no qual se faz necessário agregar diversos outros participantes a rede. O monitoramento do tráfego com o uso de drones pode ser muito mais eficaz se esses estiverem conectados aos transportes terrestres, como carros, caminhões e até bicicletas, e às infraestruturas de tráfego e comunicação, como radares, semáforos e células de rede 5G. Esse escopo abrangente não faz parte do interesse e foco desse projeto. As demais aplicações podem, também, serem amplificadas com mais participantes a rede, mas o uso exclusivo de uma rede apenas de drones possui benefícios e aplicabilidades de extrema importância e que serão aprofundadas na seção de resultados.

Todas as aplicações que estão no escopo desse estudo podem possuir, dependendo de seu foco, um requisito comum: a alta disponibilidade da rede para a devida coleta e a comunicação de dados. Seja em um cenário de patrulha e reconhecimento em que há uma base central recebendo as informações coletadas pelos drones para análise em tempo real, ou seja na ampliação de uma rede em um local remoto que necessita de um alto controle de disponibilidade e confiabilidade para trafegar um dado de uma borda da rede a outra ou seja em qualquer outro cenário que possua o conceito de uma base central, sorvedouro

das informações coletadas, que demanda o dado coletado pela nuvem de drones em tempo real.

Dentre esses cenários é comum a necessidade de movimentação dos drones para, justamente, haver uma maior cobertura de área. Porém, com a constante troca de posições dos drones, a descoberta das rotas de comunicação se torna um desafio significativo, impactando diretamente o requisito de disponibilidade da rede e, conseqüentemente, o recebimento em tempo real das informações pelo sorvedouro. Na seção seguinte, portanto, será detalhada a proposta de como esse trabalho pretende enfrentar tal desafio por meio de uma arquitetura modular descentralizada de cooperação entre a movimentação e a comunicação.

4.2 O conceito da Arquitetura

A dissonância entre a comunicação, ou seja, a descoberta de rotas e a constante movimentação dos drones ficou muito evidente em um estudo prévio (ZUCCHI; SILVEIRA, 2018). Os protocolos de roteamento (AODV, OLSR e DSDV), criados para redes Ad hoc mas com foco em redes Manet, não foram desenvolvidos para trabalhar em uma topologia tão dinâmica e mesmo os protocolos pró-ativos começam a gerar atrasos sensíveis em redes menos densas e mais dinâmicas, além de consumir muita energia e ter uma sobrecarga de pacotes de controle para tentar reconduzir as rotas. E com a leitura de trabalhos que estudam o movimento dos drones, como os trabalhos de Wu (WU *et al.*, 2019), Casbeer (CASBEER *et al.*, 2005), Maistrenko (MAISTRENKO; ALEXEY; DANIL, 2016), Scherer (SCHERER *et al.*, 2015), entre outros, reforçou-se a ideia da cooperação do movimento com a comunicação. A movimentação de um drone deveria guiar a mudança na topologia e, conseqüentemente, nas rotas de comunicação. Além de que não há uma razão para haver movimentos estruturantes e desconexos com o objetivo durante uma comunicação específica. E para orquestrar essa ideia a arquitetura proposta foi dividida entre módulos com responsabilidades bem definidas: comunicação, coordenação e cooperação.

A arquitetura será composta de três módulos, conforme pode-se ver na figura 6. O módulo de movimentação será responsável por definir a movimentação de cada um dos drones, garantindo a separação mínima entre os drones e a direção correta de cada drone para a formação da topologia, dada as localizações dos respectivos vizinhos, o ponto

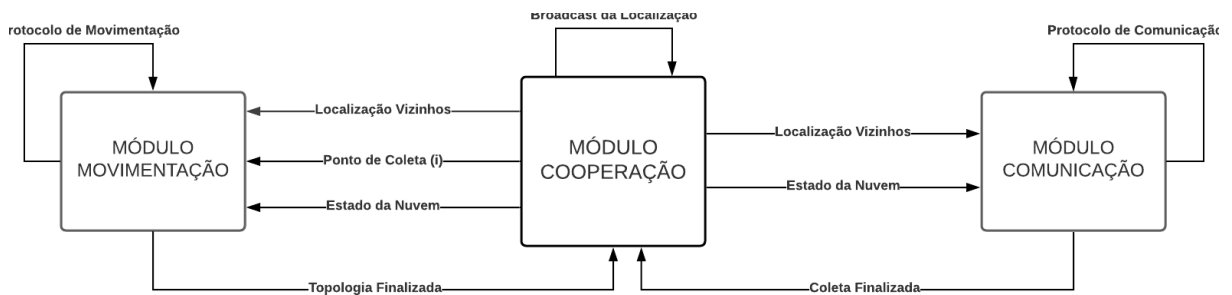


Figura 6 – Modelagem macro do funcionamento dos módulos da arquitetura.

de coleta em questão e o estado da nuvem como um todo. Enquanto que o módulo de comunicação se responsabiliza por orquestrar a comunicação da rede, controlando o início e o fim da coleta e definindo as rotas com base na localização dos vizinhos e no padrão da movimentação da nuvem como um todo. Ambos dependem dos protocolos ADVCD e PRBS, respectivamente, e da participação do módulo de cooperação, pois esse gere os estados da rede e todas as comunicações de controle, definindo o comportamento dos demais módulos e permitindo sua cooperação.

E apesar de descrevermos uma arquitetura para a rede como um todo, não haverá uma estrutura centralizada que controle suas ações. A criação de uma FANET ampla com o uso de diversos drones, gerando um alcance de quilômetros, necessita agir de forma descentralizada para evitar latências em seu controle que possam gerar colisões entre os drones ou falhas na descobertas das rotas de comunicação, por exemplo. Com isso, os módulos da arquitetura serão instanciados e executados de forma descentralizada em cada um dos drones, mas sempre dependentes da comunicação de pacotes de controle entre todos os drones, o que será melhor explicado na subseção sobre o módulo de cooperação. E, por último, é importante destacar que os módulos são assíncronos, apesar da dependência de informações um do outro. Suas iterações não dependem de um novo *input* dos outros módulos, mas a iteração i sempre utilizará os últimos dados recebidos.

Nas sessões abaixo, portanto, serão descritos com mais detalhes os três módulos da arquitetura. De início, será visto o módulo de movimentação por ser, obrigatoriamente, o primeiro a ser iniciado. Logo em seguida, será abordado o módulo de comunicação para que, por fim, o raciocínio seja finalizado com o módulo de cooperação.

4.3 Módulo de movimentação

Baseado no cenário em que há sempre um sorvedouro aguardando as informações de algum outro ponto conectado a rede de drones, esse estudo considerou que a nuvem de drones recebeu n pontos de coleta (PC). Cada PC é uma localização em que os drones deverão coletar e transmitir informações diretamente para o sorvedouro. Ou seja, a nuvem iniciará a coleta no ponto A, depois irá se locomover para o ponto B, posteriormente para o C, e assim por diante, até o final dos n pontos de coleta. A definição da ordem dos pontos de coleta não será discutida aqui, pois será considerado que a ordem de coleta já foi pré-definida, seja pelo algoritmo de Salesman (Olivieri de Souza; ENDLER, 2020) (CASBEER *et al.*, 2005) (YANMAZ *et al.*, 2018) (BINOL *et al.*, 2018) ou por qualquer outra forma de otimizar o caminho da nuvem de drones.

Movimentar os drones e a nuvem em si de PC a PC cria desafios de movimentação e, conseqüentemente, de comunicação. O primeiro exige um controle da distância mínima entre cada drone para não haver colisões. O caminho de um deve ser planejado de forma que esteja sempre a uma distância que impeça o choque e a perda de drones, gerando o primeiro requisito de separação mínima entre drones. O cálculo dessa distância mínima só será possível se a localização de cada membro da rede for compartilhada, pelo menos, com seus vizinhos. Com isso, nenhum drone poderá se perder da nuvem, ou seja, deve estar a uma distância máxima que permita a comunicação com pelo menos um drone da rede. Caso contrário, teríamos que criar uma lógica para tratar essas exceções, o que não é o foco desse trabalho. Além disso, a movimentação deve levar em conta o destino dos drones para a montagem da topologia da rede, controlando a direção, sentido e velocidade de cada um. Com isso, a movimentação possui quatro requisitos essenciais que o módulo deve levar em consideração:

1. controlar a distância entre os drones para evitar que a distância mínima seja desrespeitada,
2. controlar o vetor direcional dos drones para formar devidamente a topologia da rede,
3. controlar a distância máxima de cada drone com seus vizinhos para garantir que ele esteja conectado a pelo menos um drone e o mesmo não se desprenda da rede e

4. garantir o compartilhamento da localização de cada drone para seus respectivos vizinhos para possibilitar o controle da distância mínima, da distância máxima e do vetor direcional do drone.

4.3.1 Modelagem do Módulo

O módulo de movimentação tem como princípio básico a análise recorrente e constante da movimentação do respectivo drone para, então, definir seu trajeto. Para que isso seja possível, foi implementada a lógica de iterações para termos um ciclo que inicia com todos os drones no ponto inicial (sorvedouro) e finaliza apenas após a coleta em todos os PCs e o devido retorno ao sorvedouro. Mas antes do início do ciclo, ou seja, no momento de instanciar o módulo, alguns parâmetros são pré-definidos:

1. Topologia da rede durante a coleta, ou seja, quando os drones atingem o ponto de coleta, será sempre linear.
2. Ordenação dos drones não sofre alteração durante o movimento, ou seja, um respectivo drone terá sempre os mesmos vizinhos e isso é definido no instante zero da movimentação.
3. Drone líder será aquele que realizará a coleta e que avisará os demais drones, diretamente ou indiretamente, da finalização da coleta. A definição do líder é decorrente da movimentação e da ordenação dos drones.

A partir dessas pré-definições, o módulo de movimentação é iniciado, assim como os demais módulos, e espera receber as primeiras informações do módulo de cooperação para iniciar as iterações.

Os parâmetros de entrada do módulo provenientes do módulo de cooperação, conforme podem ser vistos na figura 6 ou na figura 7, são:

- Estado da Nuvem: parâmetro que define o estado da nuvem. Os possíveis estados são (1) Em movimentação; (2) Movimentação finalizada; (3) Em coleta; (4) Coleta finalizada.
- Localização dos Vizinhos: lista da última localização recebida de todos os vizinhos do drone, ou seja, que estejam no alcance desse.

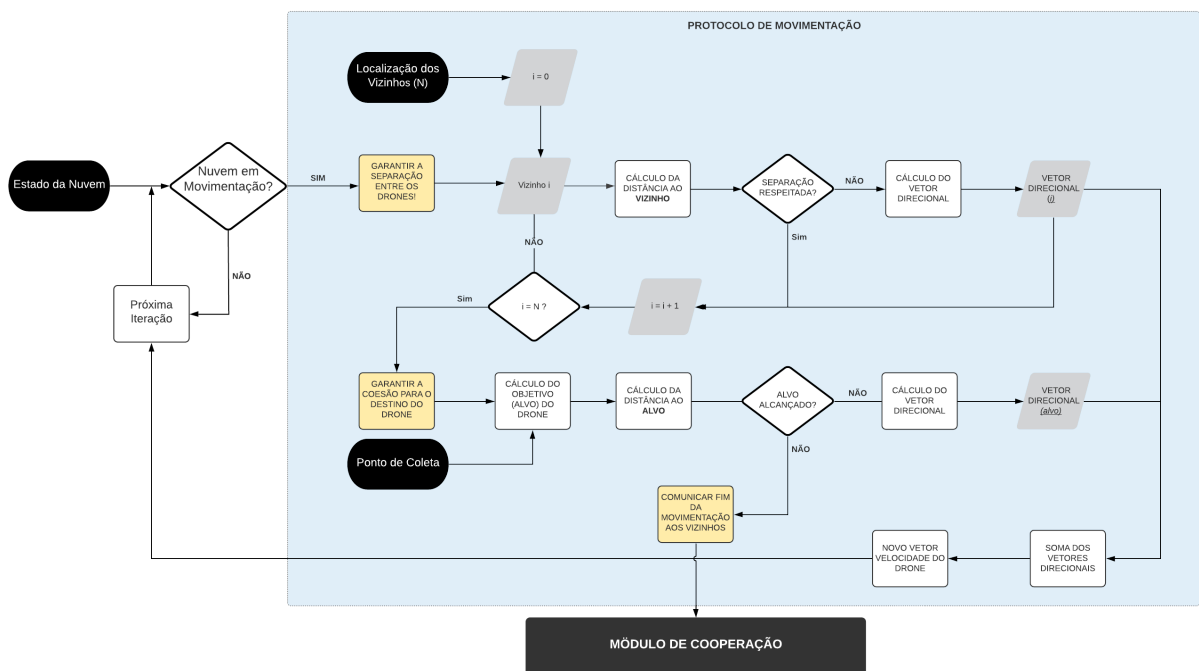


Figura 7 – Modelagem do funcionamento do módulo de movimentação.

- Ponto de Coleta: ponto de coleta i daquela iteração. Esse parâmetro é alterado apenas quando o Estado da Nuvem é dado como *coleta finalizada*.

Ao receber o Estado da nuvem como *em movimentação*, o módulo de movimentação iniciará dois processos síncronos para definir o vetor direcional do drone em questão. O vetor direcional, que possui a direção, sentido e módulo da velocidade do drone, é calculado para (1) garantir a devida separação dos drones, mínima e máxima, e (2) a coesão desses para o seu destino final.

Os dois processos citados fazem parte de um algoritmo de movimento, o **Algoritmo de Distanciamento do Vizinho e de Coesão do Destino (ADVCD)**, que se baseou no conceito do Particle Swarm Optimization (PSO). O PSO é um algoritmo meta-heurístico criado para otimizar um problema, tentando iterativamente determinar a movimentação de uma dada população de partículas de acordo com uma fórmula matemática sobre a posição e velocidade da partícula. O algoritmo explora o movimento das partículas em um determinado espaço de acordo com um fenômeno chamado de "Emergência", associado às teorias dos Sistemas Complexos, em que o movimento das partículas do enxame só seria possível com a interação entre elas. Ou seja, as partículas possuem propriedades ou comportamentos que emergem apenas quando as demais interagem em um todo mais

amplo, compartilhando informações. Essa interação associada a uma fórmula matemática gera a posição e o vetor velocidade de cada partícula, criando uma inteligência de enxame.

4.3.2 Algoritmo de Distanciamento do Vizinho e de Coesão do Destino (ADVCD)

A partir do conceito do PSO é possível remodelá-lo a fim de definir os parâmetros e a função matemática que guiará a otimização do movimento dentro do algoritmo. Os parâmetros são os mesmos citados na subseção anterior: Estado da nuvem, Localização dos vizinhos e o ponto de coleta do momento. E a função foi definida de acordo com os dois processos (separação mínima/máxima dos drones e a coesão ao destino).

O primeiro passo do ADVCD é garantir a separação dos drones, validando se cada drone está a uma distância mínima/máximo dos demais. Na figura 7 pode ser visualizado o ciclo que valida a localização de cada vizinho, calculando a distância entre cada um. Se a distância não estiver respeitando os limites mínimo e máximo, calcula-se a diferença entre os vetores de posição de cada drone e acrescenta-se essa diferença normalizada a velocidade do drone.

Após essa primeira etapa, o algoritmo analisa, na mesma iteração e de forma síncrona, a coesão do movimento de cada drone em relação ao seu destino. Ele valida se o drone em questão está em direção à posição do destino definido para esse dado ponto de coleta. Se o drone ainda não tiver alcançado o destino, o algoritmo, então, calcula a diferença entre a posição e o destino, gerando um novo vetor direcional. Esse é acrescido, também, a velocidade do drone, somando-se aos vetores direcionais calculados no processo anterior. A movimentação da nuvem como um todo pode ser vista no exemplo do anexo A.

O ADVCD leva em consideração que:

- Cada drone receberá a localização de todos os drones que estão a uma distância menor que a *distância_máxima* dele mesmo. Se o drone não receber a localização de um outro, entende-se que não são vizinhos.
- Cada drone possui um destino que é derivado do ponto de coleta da iteração presente. Isso ocorre pois a nuvem de drones terá uma topologia específica para cada ponto de coleta, o que obriga a cada drone ter um destino específico na movimentação.
- A topologia final da rede será sempre linear, ligando o PC e o sorvedouro (S) em uma linha reta. A única modificação dela estará no deslocamento (offset) entre os

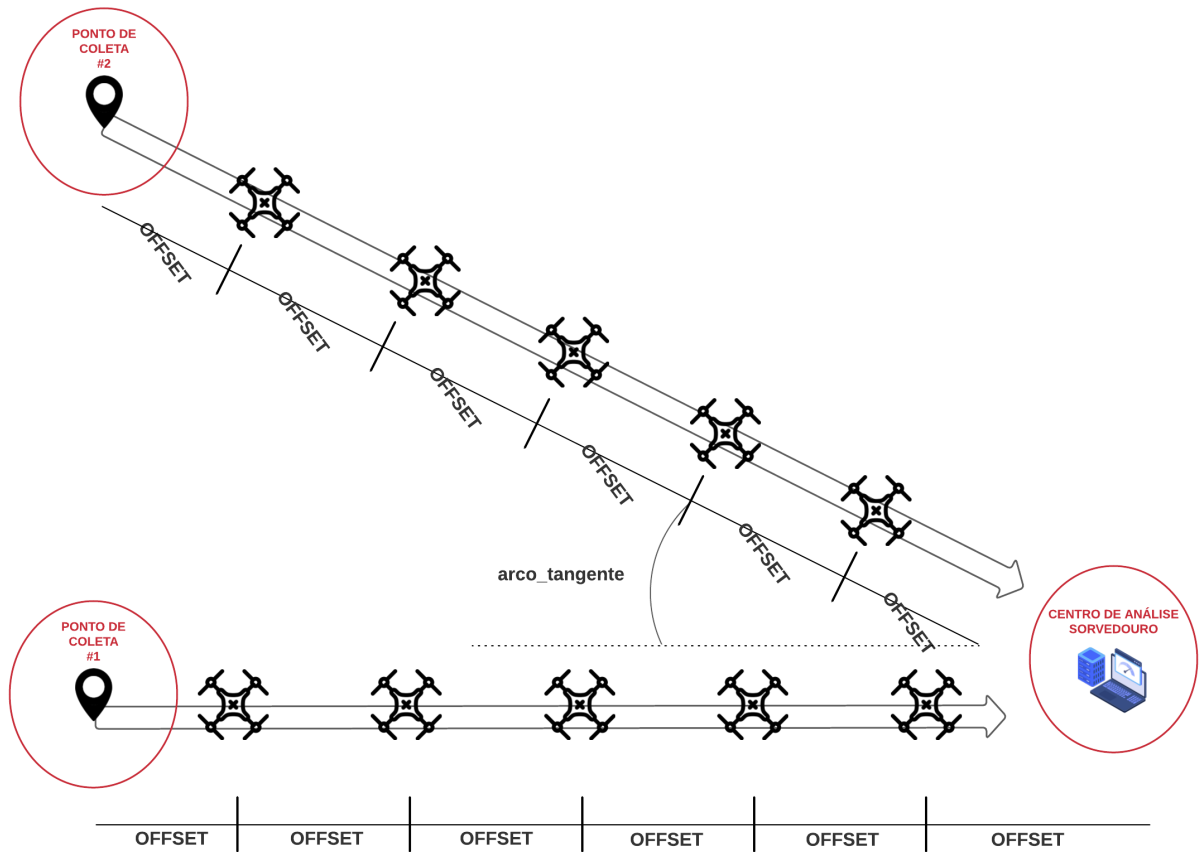


Figura 8 – Modelo para controle da topologia em cada PC.

drones, dependendo da distância entre PC e S. Na imagem 8 fica evidente essa lógica e as diferentes topologias.

Definição da Topologia da Rede

A montagem da topologia se baseia diretamente ao cálculo das coordenadas de destino de cada um dos drones participantes da nuvem. Sendo que cada drone estará separado de um deslocamento (*OFF_SET*) que é a divisão entre a distância de PC a S e o número de drones presentes na rede, como na fórmula 1.

$$OFF_SET = \frac{Dist(PC, S)}{(\#drones)} \quad (1)$$

Em seguida, calculamos o ângulo entre as coordenadas de PC e S, como na equação 2, para calcular as coordenadas do destino de cada drone. Na equação 3 e 4 a variável *i*

representa o número do drone e, conseqüentemente, o acréscimo do deslocamento para cada drone subsequente.

$$\text{arco_tangente} = \frac{\text{coordenada_PC}}{\text{coordenada_S}} \quad (2)$$

$$\text{Coordenada_Destino_Drone}_x^i = \text{Coordenada_S}_x + \text{OFF_SET} * i * \text{cosseno}(\text{arco_tangente}) \quad (3)$$

$$\text{Coordenada_Destino_Drone}_y^i = \text{Coordenada_S}_y + \text{OFF_SET} * i * \text{seno}(\text{arco_tangente}) \quad (4)$$

Definição das Responsabilidades do Módulo

Dada as definições acima, o ADVCD poderá então executar as seguintes ações recorrentes:

1. Verificar a distância mínima do drone com os seus vizinhos;
2. Verificar se há, pelo menos, um drone no alcance do outro, pois o algoritmo não irá permitir a separação completa de um drone com os demais;
3. Definir iterativamente e descentralizadamente o vetor velocidade de cada drone levando em consideração os pontos 1, 2 e a distância até o respectivo destino. Isso ocorrerá até que o drone líder, aquele cujo destino é o PC, se encontre próximo o suficiente do PC;
4. Comunicar o fim da movimentação quando cada drone atingir o seu respectivo destino;

O processo de comunicar o fim da movimentação é realizado individualmente por cada drone, enviando essa informação para o módulo de cooperação. E da visão individual de cada drone, isso significa, apenas, o fim de sua própria movimentação. A montagem final da topologia depende do drone líder avisar da sua chegada ao destino e, também, da orquestração do módulo de cooperação ao analisar as comunicações dos vizinhos. Processo esse que será descrito na subseção sobre o módulo de cooperação.

4.4 Módulo de Comunicação

O módulo de comunicação terá, também, dois processos bem definidos. Ambos operam em momentos distintos e dependem da variável de Estado da rede. O primeiro processo engloba o controle perante o início e o fim da coleta, algo que é exclusivo do drone líder. Ou seja, os demais drones não realizam a gestão do *status* da coleta. O segundo processo, que é operado individualmente em todos os drones, envolve a descoberta das rotas da comunicação para garantir a disponibilidade da rede. Somente com isso que será possível transmitir os dados coletados no PC e todos os dados de controle da rede, sejam as coordenadas dos drones vizinhos ou o aviso de finalização da coleta ou da montagem da topologia. Com isso, a comunicação possui dois requisitos essenciais que o módulo deve levar em consideração:

1. controlar o status da coleta por meio do drone líder e
2. garantir a devida descoberta e gestão das rotas de comunicação para permitir a comunicação de pacotes de controle e pacote de dados da coleta.

4.4.1 Modelagem do Módulo

O módulo de comunicação, ao contrário do módulo de movimentação, possui ciclos controlados por segundos. Ou seja, os ciclos que percorrem o fluxo evidenciado na figura 9 ocorrem em intervalos de 1 segundo e não são instantâneos com *threads* subsequentes. Para iniciar esses ciclos não há nenhuma pré-definição necessária e o início é dado conjuntamente com a movimentação. E para iniciar qualquer ciclo, o módulo depende de dois parâmetros de entrada provenientes do módulo de cooperação:

- Estado da Nuvem: parâmetro que define o estado da nuvem. Os possíveis estados são (1) Em movimentação; (2) Movimentação finalizada; (3) Em coleta; (4) Coleta finalizada.
- Localização dos Vizinhos: lista da última localização recebida de todos os vizinhos do drone, ou seja, que estejam no alcance desse.

A partir do *input* do Estado da Nuvem que o módulo inicia seus ciclos, dado que essa é a variável que definirá qual processo irá ocorrer: a coleta e transmissão de dados ou

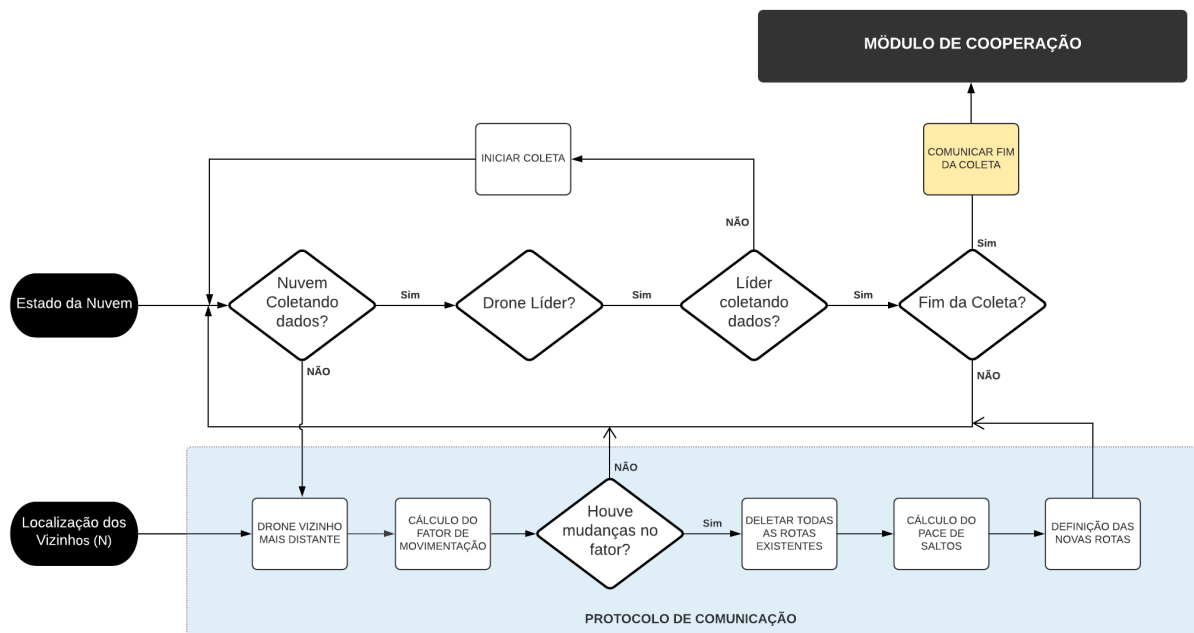


Figura 9 – Modelagem do funcionamento do módulo de comunicação.

a movimentação junto com a montagem da topologia, junto com a descoberta de rotas de comunicação e a transmissão de pacotes de controle. Se a nuvem estiver no estado *”Em coleta”*, então o módulo de comunicação irá, primeiro, validar se o drone em questão é o líder. Se não for, nada acontece, mas no caso contrário ele valida, também, se o líder iniciou a coleta. Se a coleta não estiver em curso, o módulo orienta o líder a iniciar, se não aguarda o líder comunicar o fim da coleta, o que também considera que o sorvedouro recebeu todos os pacotes de dados transmitidos.

Após o fim da coleta, a nuvem de drones deve, novamente, se mover para um novo ponto de coleta e com isso a topologia da rede será afetada. E para garantir que a disponibilidade da rede é de suma importância que as rotas de comunicação sejam definidas e configuradas em cada drone. Com isso, da-se início ao segundo processo que envolve a descoberta das rotas de comunicação de acordo com um algoritmo de roteamento: o Protocolo de Roteamento Baseado em Saltos (PRBS), proposta desse trabalho como forma de otimizar a busca por rota e de criar a cooperação entre movimento e comunicação.

O PRBS será detalhado na seção seguinte, mas vale ressaltar que esse projeto pretende comparar o protocolo idealizado com o OLSR, protocolo que foi visto como o de melhor desempenho em uma rede de drones em um trabalho recente (ZUCCHI; SILVEIRA, 2018) e foi explanado na seção 2. Na seção 6, ambos os protocolos serão comparados afim

de entender a real contribuição da cooperação do movimento com a comunicação, dado que o OLSR não possui nenhuma conexão direta e clara com o movimento.

4.4.2 Protocolo de Roteamento Baseado em Saltos - PRBS

Considerando que o objetivo do trabalho é criar uma conexão entre o movimento e a comunicação, se faz necessário que o protocolo de roteamento enxergue, de alguma forma, o algoritmo de movimentação. E essa conexão entre algoritmos deve ser instantânea para não consumir um tempo relevante que contribua para um acréscimo na latência da rede. Essa consideração conjuntamente com o tipo de movimentação que não altera a ordem dos drones, que forma topologias lineares e que possui requisitos já citados - distância mínima entre vizinhos, compartilhamento de localização, controle da distância máxima - tiveram uma influência enorme na concepção do PRBS.

A necessidade de não se criar nenhuma latência extra contribuiu para a criação do PRBS, pois esse foi elaborado para operar de forma assíncrona ao algoritmo de movimentação, ou seja, não dependendo do resultado desse último. O protocolo criado se torna independente por operar com alguns pressupostos conhecidos da movimentação em sua lógica:

1. a ordem dos drones não se altera, o segundo será sempre o segundo, o terceiro também e assim por diante e
2. a topologia será sempre linear. Com isso definido, o cálculo da rota se baseia no número de saltos necessários para que o último drone, aquele mais perto do ponto de coleta, consiga se comunicar com o Sorvedouro.

O cálculo do passo de saltos necessários ocorre individualmente em cada drone, de forma descentralizada e usa como base a maior distância ($m_dist_vizinhos$) do respectivo drone aos seus vizinhos. A $m_dist_vizinhos$ pode ser considerada como o distanciamento padrão que todos os drones possuem entre si e, conseqüentemente, é possível calcular a distância entre o último drone e o sorvedouro ($dist_SD$) como na equação 5.

$$dist_SD = m_dist_vizinhos * (n_drones - 1) \quad (5)$$

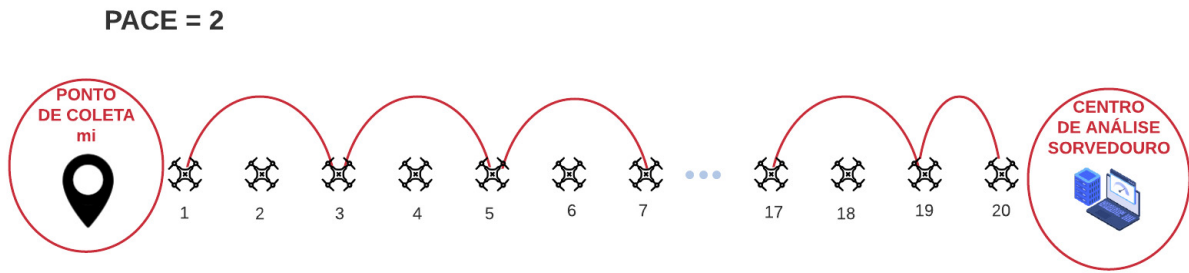


Figura 10 – Exemplo do funcionamento do PRBS

$$fator = \frac{dist_SD}{dist_max} \quad (6)$$

$$pace_saltos = inteiro\left(\frac{n_drones}{fator}\right) \quad (7)$$

A partir da $dist_SD$, podemos calcular um fator que indique quantas vezes a distância máxima entre drones ($dist_max$) foi superada entre o sorvedouro e o último drone, como na equação 6. Por meio desse fator podemos calcular qual seria o $pace$ /passo de saltos necessários para o último drone conseguir se comunicar com o sorvedouro, como na equação 7. Se a rede possuir 20 drones, a distância máxima for de 200 metros e a maior distância entre os vizinhos for de 100 metros, temos que o $pace$ de saltos necessários seria 2. Como temos 20 drones, o roteamento teria que passar do 1 ao 3, do 3 ao 5, do 5 ao 7, até chegar no 19 e, finalmente, ao último (20), como exemplificado na figura 10.

O PRBS opera, portanto, em intervalos de 1 segundos até que a topologia da rede se estabilize e a coleta possa ser iniciada. Uma vez que a topologia está montada, as rotas, conseqüentemente, estarão definidas e a coleta poderá ser iniciada. Essa gestão do Estado da Nuvem é uma responsabilidade do módulo de cooperação, que será descrito na subseção seguinte.

4.4.3 Módulo de Cooperação

Nas seções anteriores, ficou evidente que o funcionamento dos módulos de comunicação e de movimentação dependem diretamente das ações do módulo de cooperação. Esse possui uma responsabilidade diversificada, listadas abaixo, que guiam o comportamento

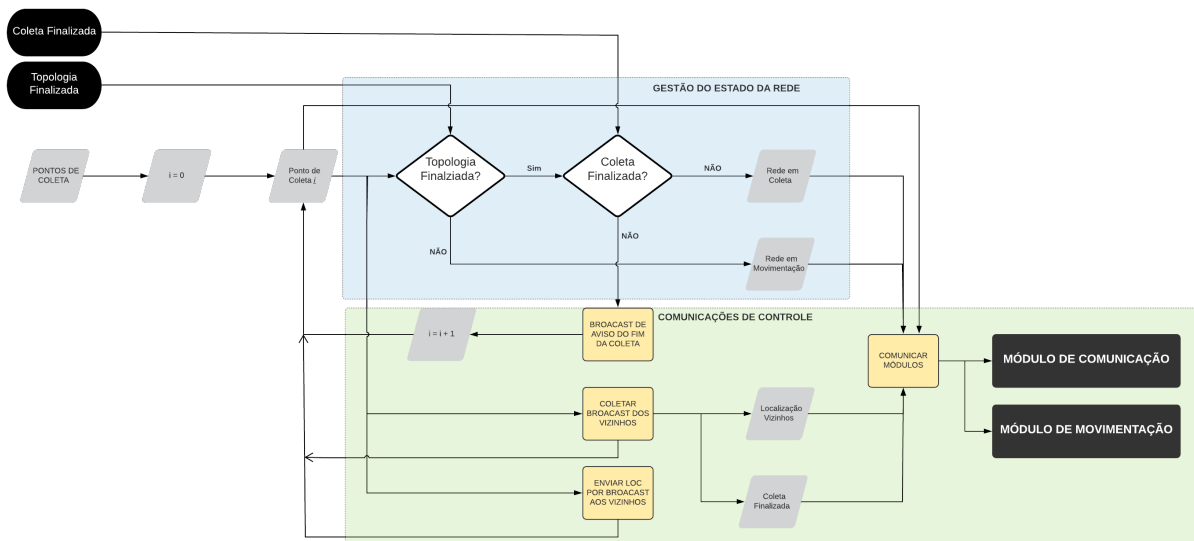


Figura 11 – Modelagem do funcionamento do módulo de cooperação.

não apenas dos módulos como da rede como um todo, criando a cooperação entre todos os drones. É, por meio desse último módulo, que os drones se comunicam, trocando todas as informações essenciais para o funcionamento da FANET.

Responsabilidades do Módulo de Cooperação:

1. Controle e definição do líder
2. Gerir a comunicação de controle entre os módulos
3. Gerir as comunicações de controle entre os drones

4.4.4 Modelagem do Módulo

O módulo de cooperação tem, como primeiras ações, a responsabilidade de definir informações essenciais para o funcionamento da rede, instanciar os módulos de comunicação, de movimentação e de cooperação nos drones. A primeira parte do módulo envolve a preparação dos módulos e da comunicação entre eles para cada drone, algo que será discutido na subseção seguinte a essa. Após essa etapa que o módulo inicia o fluxo que pode ser visto na figura 11. O fluxo se inicia com a definição do líder da rede e do primeiro ponto de coleta recebido na missão, dada a lista já ordenada. A escolha do líder é aleatória, dado que todos os drones se encontram no mesmo ponto de partida, o sorvedouro. Então, com o primeiro PC definido, o módulo entra na fase de iterações, ou seja, fluxo repetitivo até que a missão seja finalizada.

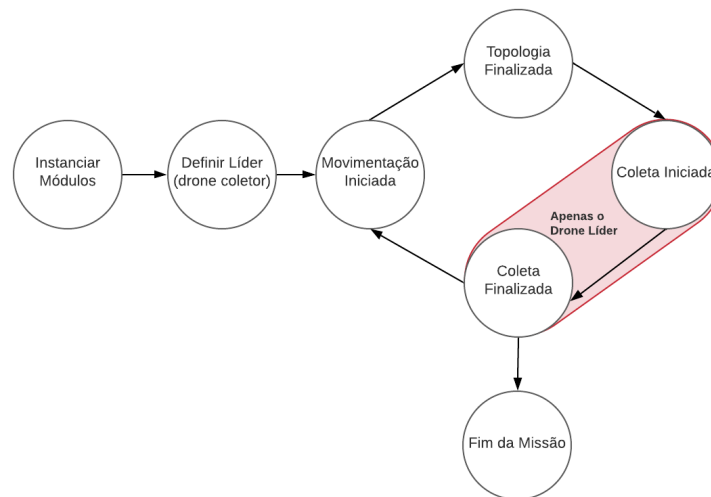


Figura 12 – Fluxo dos Estados possíveis que a rede pode atingir.

No fluxo recorrente, dado o ponto de coleta em questão, o módulo valida se a topologia está finalizada. Caso não esteja, o módulo define ou reforça o Estado da rede como "Movimentação Iniciada" e comunica os demais módulos disso. Essa etapa possui diferentes consequências para cada tipo de drone - líder ou normal. O drone normal, ao atingir seu ponto dentro da topologia, define o Estado como "Topologia Finalizada", gerando um impacto exclusivo de interromper sua movimentação. O líder, por outro lado, além de parar o movimento, inicia a coleta da informação, como pode ser visto na figura 9. Com a topologia finalizada, o módulo muda de Estado para "Coleta Iniciada", de acordo com o fim do movimento de cada drone, indicando que o respectivo está pronto para transmitir. Mas a coleta só é de fato iniciada com o drone líder atingindo esse último Estado. A mudança de cada Estado pode ser vista na figura 12.

Dado o início da coleta, o único drone que consegue mudar o estado da rede para "Coleta Finalizada" é o líder, pois apenas ele tem essa informação. Se a coleta não estiver sido finalizada e a transmissão em progresso, cada um dos módulos de cooperação de cada drone apenas armazena a informação de "rede em coleta". Quando a coleta estiver sido finalizada, o módulo de cooperação do drone líder iniciará o *broadcast* dessa informação, realizando um efeito em cascata na rede, pois cada drone fará o mesmo ao receber a informação de "coleta finalizada" até que todos estão no mesmo estado de "Coleta Finalizada". Com isso, o processo continua suas iterações, mas o ponto de coleta é alterado, seguindo para o próximo da missão.

Concomitante a esse processo, o módulo de cooperação possui, também, a responsabilidade de coletar o *broadcast* dos vizinhos e enviar a localização do respectivo drone para

os seus vizinhos, ambas são informações de controle para a rede. A coleta de *broadcast* dos vizinhos permite que o drone possua suas localizações e o próprio efeito de cascata citado acima, pois o Estado de "Coleta Finalizada" é enviada via esse mecanismo. Mais detalhes de como funciona o processo de comunicação de controle entre os módulos e os drones serão discutidos no capítulo 5.

5 Ambiente de Simulação e Validação

No capítulo 4 foi apresentado toda a arquitetura proposta nesse trabalho, incluindo o algoritmo de movimento ADVCD, o protocolo de roteamento PRBS idealizada por este trabalho e as definições da comunicação dos dados de controle. Neste capítulo será tratada a metodologia que será usada para a construção, implementação e validação desses algoritmos, essencial para demonstrar a hipótese descrita na seção 1.3.

5.1 Metodologia

Para validar a hipótese do projeto, serão implementados experimentos nos quais o sistema de múltiplos drones estará sujeito à locomoção entre os pontos de coleta, mantendo uma comunicação do início ao fim do experimento. Dessa forma, será possível demonstrar se:

- a proposta de cooperação de ambos os algoritmos é válida para cenários em que um sistema de múltiplos drones realiza a movimentação e necessita transmitir dados ao mesmo tempo,
- a ideia de utilizar redes Ad hoc tendo drones como nós da rede é uma solução viável para monitorar áreas remotas e de difícil acesso,
- o conceito da tecnologia híbrida pode contribuir em muito para que a movimentação dos drones seja mais assertiva.

A ferramenta responsável para simular/emular a proposta e, conseqüentemente, os cenários, que serão descritos em seguida, será o NS-3 (RILEY; HENDERSON, 2010). O NS-3 permite a implementação de software que simula os dispositivos de rede. Dessa forma, os drones serão dispositivos Ad hoc que poderão se movimentar e se comunicar de acordo com as demandas do software implementado neles.

Os resultados provenientes da simulação/emulação serão avaliados a partir de uma visão geral da rede e de uma média dos resultados da comunicação entre o sorvedouro e o último drone da rede. As métricas que serão validadas em ambas as análises são:

1. Latência
2. Variação da Latência - Jitter

Tabela 4 – Pontos de coleta para cenários com 60 drones.

| | | | | | | |
|------------|---------------|---------------|-------------|--------------|-------------|-----------|
| PCs | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | (0,0) | (12000,12000) | (3000,3000) | (1200,12000) | (9000,3000) | |
| | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| | (12000, 1200) | (9000,9000) | (6000,9000) | (1200,1200) | (6000,6000) | (0,0) |

3. Taxa de entrega de pacotes

4. Média de saltos

5.2 Cenários e Simulação

Conforme já comentado nas seções anteriores, este projeto partirá do pressuposto que os drones terão a missão de se locomover e coletar informações em diversos pontos de coleta previamente definidos. As simulações foram divididas em duas grandes frentes: (1) pontos de coleta ordenados para otimizar o tempo de movimentação e (2) pontos de coleta em ordem aleatória. O objetivo da primeira frente é testar a viabilidade da cooperação entre o ADVCD (movimento) e o PRBS (comunicação) no cenário proposto. E na frente subsequente, queremos apenas validar se a otimização do movimento influencia de alguma forma no desempenho dos algoritmos propostos.

5.2.1 Definição dos Cenários

A simulação terá a disposição 60 drones, que poderão ser usados em sua totalidade ou não, dependendo da distância do ponto de coleta P_{ci} e o sorvedouro S_0 e do cenário escolhido. A distância máxima que um ponto de coleta pode estar da base central/sorvedouro é de 15km dado as limitações de alcance do padrão IEEE 802.11 e do número de drones (60 drones * 250 metros). Na equação 8 define-se os pontos de coleta.

$$P_c = [P_{c1}, P_{c2}, P_{c3}, P_{c4}, P_{c5}, P_{c6}, P_{c7}, P_{c8}, P_{c9}, P_{c10}, P_{c11}] \quad (8)$$

Na tabela 4 temos todos os pontos considerados para o cenário específico de 60 drones trabalhando junto. Considerando que o P_{c1} e o P_{c11} são o início e o fim da missão, respectivamente, não haverá coleta nesses pontos.

Tabela 5 – Cenários a serem simulados.

| Cenário | n_{drones} | Pontos de Coleta | Protocolos de Roteamento | Algoritmo de Mov. | Alcance Máximo e Potência (m — dBM) |
|---------|------------|------------------------|--------------------------|-------------------|-------------------------------------|
| 1 | 10 | P_{c10} Ordenados | PRBS | ADVCD | 200 m — 40dBm |
| 2 | | | OLSR | | |
| 3 | 20 | P_{c20} Ordenados | PRBS | | |
| 4 | | | OLSR | | |
| 5 | 30 | P_{c30} Ordenados | PRBS | | |
| 6 | | | OLSR | | |
| 7 | 40 | P_{c40} Ordenados | PRBS | | |
| 8 | | | OLSR | | |
| 9 | 50 | P_{c50} Ordenados | PRBS | | |
| 10 | | | OLSR | | |
| 11 | 60 | P_{c60} Ordenados | PRBS | | |
| 12 | | | OLSR | | |
| 15 | | P_{c60} Desordenados | PRBS | | |
| 16 | | | OLSR | | |
| 17 | | | | | 200 m — 40dBm |
| 18 | | | | | 500 m — 70dBm |

Nos cenários cujo número de drones é menor que 60, os pontos de coleta foram recalculados, porém mantendo a mesma ordem e direção. O cálculo dos pontos de coleta para outros tamanhos de nuvem foi feito por meio da equação 9.

$$P_{c_j}^{n_{drones}} = P_{c_j} * \left[\frac{(n_{drones} - 1)}{(60 - 1)} \right] \quad (9)$$

A viabilidade da proposta de cooperação entre o ADVCD e PRBS será analisada por meio da discussão sobre as métricas coletadas e, também, sobre a comparação com o protocolo de roteamento OLSR. Esse irá substituir o PRBS nos mesmos cenários que a proposta foi testada. Os primeiros cenários propostos visam, exclusivamente, testar como os algoritmos propostos desempenhariam junto com o 802.11, tendo, como distância máxima para manter a comunicação, 200 metros. Entretanto, afim de validar se o uso de uma camada de enlace diferente, como o 802.15.4, poderia ter um desempenho ainda melhor, simularemos uma adaptação do 802.11 para obter um alcance maior. Para criar esse 802.11 adaptado, aumentamos a potência de transmissão em alguns cenários. Por último, será executado, também, testes em que os pontos de coleta não estarão ordenados, mas esse será testado apenas para a nuvem de 60 drones. Com isso, os cenários de simulação se encontram resumidos na tabela 5.

5.2.2 Definição dos Parâmetros da Simulação

O algoritmo de movimentação ADVCD tem como passo final a montagem da topologia para cada ponto de coleta. Quando a topologia se encontra estável, não há mudanças de posição e de rotas da comunicação, ocasionando um paradigma favorável para

Tabela 6 – Tabela com os parâmetros fixos da simulação.

| PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO | |
|--|-------------------|
| Nº Cenários | 16 |
| COMUNICAÇÃO | |
| Protocolo de Transporte | UDP |
| Padrão da Camada de Enlace | 802.11p |
| Taxa de Transmissão | 100Kbps |
| Potência do Sinal | 40dBm |
| MOVIMENTAÇÃO | |
| Velocidade Máxima do Drone | 8,34m/s - 30 km/h |
| Aceleração Máxima | 1m/s ² |
| Distância Máxima entre Drones | 200m |
| Tempo estacionado no PC | 5 segundos |
| Separação desejada do último drone ao PC | 10 metros |

a transmissão da informação coletada. O grande desafio está em manter a comunicação enquanto os drones estão se comunicando, principalmente devido a própria lógica dos algoritmos ADVCD e PRBS. E com o intuito de validar o desempenho da comunicação durante esse movimento, a simulação levou em conta uma comunicação com taxa de transmissão constante de 100kbps. Ou seja, desde do momento que os drones saírem do P_{c1} até retornarem P_{c11} , a transmissão não será interrompida. Os demais parâmetros da simulação podem ser visualizados na tabela 6.

5.3 Comunicação de Controle

A comunicação possui dois momentos na arquitetura FANET proposta. A primeira é derivada da própria coleta das informações e ocorre quando o módulo de movimentação comunica o fim da formação da topologia por todos os drones, principalmente o líder. O segundo caso, a comunicação de controle, ocorre justamente para controlar, gerir e operar a orquestração dos módulos. Essa é uma das responsabilidades do módulo de cooperação e é o foco dessa subseção.

A comunicação de controle pode ser dividida em duas frentes que serão explicadas em seguida:

1. a comunicação entre os módulos e
2. a comunicação entre os drones.

5.3.1 Comunicação entre os módulos

A arquitetura aqui proposta leva em consideração que cada módulo deve operar de forma iterativa e independente. O módulo de comunicação atua em intervalos de um segundo, o de movimentação e o de cooperação operam sem intervalos, em que cada iteração é síncrona a outra. A independência dos módulos exige que os pacotes de controle sejam transmitidos de forma instantânea e assíncrona aos demais módulos. A assincronia deve ocorrer para que nenhuma iteração aguarde a *thread* do outro módulo, pois a informação não pode ficar represada e, uma vez definida, deve ser transmitida de imediato aos demais módulos.

Considerando que a comunicação entre os módulos possui dois requisitos funcionais importantes, **independência** e **velocidade** e que cada módulo foi concebido cada qual com sua estrutura de memória e processamento, utilizando apenas informações comuns entre eles, os dados de controle, se faz necessário uma estrutura para encaminhar os dados de controle sem que os módulos interajam diretamente. Tal circunstância e requisitos podem ser endereçados com o conceito de armazenamento de dados em memória, Cachê.

Cada módulo irá, então, registrar e consultar os dados armazenados em cachê de um local centralizado e confiável. Para que isso seja possível, uma estrutura de dados foi definida e pode ser vista na tabela 7. Nessas entradas temos a definição do líder, o Estado da nuvem, os pontos de coleta, a localização do vizinho e o vetor direcional do drone em questão, variáveis que serão consultadas e/ou alteradas constantemente pelos módulos. Dessa forma, podemos garantir a independência e a eficiência na troca das informações entre os módulos.

Comunicação entre os drones

Sabemos que a comunicação dos dados coletados pela rede é de responsabilidade do módulo de comunicação, mas a transmissão dos pacotes de controle entre drones é encargo do módulo de cooperação. Isso ocorre para, primeiro, gerar independência entre ambas as comunicações e possibilitar, também, o uso de padrões de comunicações diferentes. Enquanto que o módulo de comunicação utiliza padrões de streaming de dados para transmitir a coleta, o módulo de cooperação precisa avisar o fim da coleta e enviar a localização do drone aos seus vizinhos. Essas informações podem ser consideradas leves e

Tabela 7 – Tabela das entradas existentes da memória em cache.

| ENTRADA | TIPO | DESCRIÇÃO |
|--------------------------------|----------|--|
| lider | booleano | Variável que define se o drone em questão é o líder ou não. |
| nuvem_status | inteiro | 1: instanciando módulos 2: definindo líder 3: movimentação iniciada 4: topologia finalizada 5: coleta iniciada 6: coleta finalizada 7: fim da missão |
| vetor_velocidade | tuple | Vetor que identifica a direção, sentido e velocidade do drone. |
| pontos_coleta (p_c) | lista | Lista com o ponto de coleta em busca e lista com todos os pontos de coleta. |
| p_c:indice_ponto | inteiro | Índice do ponto de coleta que a rede está se movimentando para, sendo que o índice está na ordem da lista de pontos de coleta. |
| p_c:lista_pontos | lista | Lista com os pontos de coleta. |
| p_c:lista_pontos[indice_ponto] | tuple | Tuple com as coordenadas x, y e z do ponto de coleta. |
| loc_vizinho | lista | Lista com a localização de cada vizinho ativo. |
| loc_vizinho[indice_vizinho] | tuple | Tuple com a localização do vizinho que está sendo analisado pelo módulo. Sendo que o indice_vizinho pode ir de 1 ao tamanho da lista de localizações de vizinhos. |

não precisam de um padrão como o de *streaming* de dados. Além disso, dado a entrada de novas informação no drone, o cachê desse precisa ser atualizado. Tal cenário pode ser endereçado com o uso do padrão *Google Remote Procedure Call* (gRPC), pois poderemos executar uma chamada de um procedimento remoto, ou seja, uma função em outro endereço lógico da rede. Dessa forma, cada drone poderá executar uma função em seus drones vizinhos para receber os dados de controle e ainda atualizados na memória.

O gRPC, cujo foco está na comunicação de computações distribuídas funcionará como mecanismo de *last mile* da rede. Ou seja, ele proverá a etapa final da comunicação de controle entre os drones. Cada drone terá instalado um gRPC *server* e um gRPC *client*,

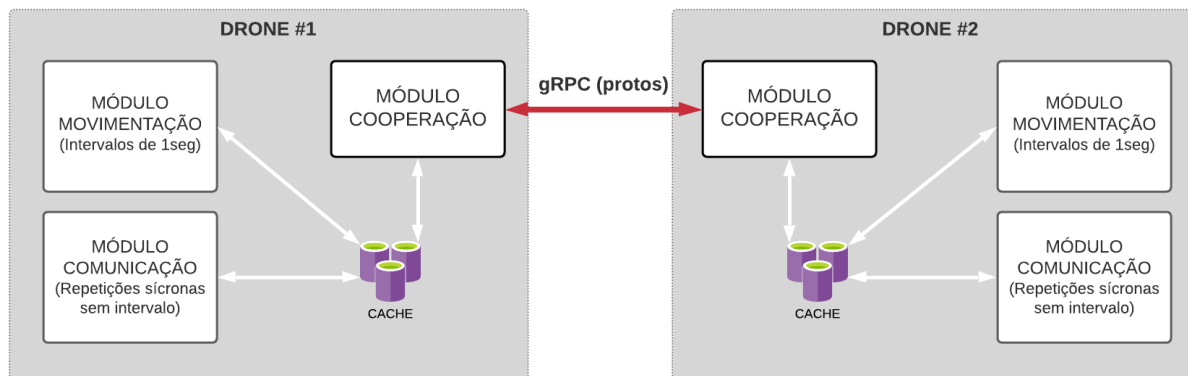


Figura 13 – Modelagem da comunicação entre módulos e entre drones.

que, por sua vez, estarão configurados com os devidos *proto buffers*, padrão open source do Google para serialização de dados estruturados ([GRPC...](#)). Será por meio dos *proto buffers* que os dados de controle serão transmitidos e para isso foram definidos os seguintes padrões de *protos* para os drones.

Padrão para comunicar o Estado da nuvem:

```

1 {message nuvem_status {
2   int32 status_id = 1;
3 }}

```

Padrão para comunicar a localização para os vizinhos:

```

1 {message localizacao_vizinho {
2   string ip_vizinho = "172.20.10.11";
3   ListValue coordenadas = [x,y,z];
4 }}

```

Foram idealizados dois *proto buffers* para dividir a responsabilidade em alterar tais dados na memória do drone. Ou seja, cada *proto* está associado a uma função específica do módulo de cooperação que altera os dados especificados no próprio *json* acima.

A configuração final da comunicação de controle, intra e inter drones, pode ser, portanto, visto na figura 13.

6 Análise dos Resultados Obtidos

A seção de resultados tem como objetivo expor e discutir os dados extraídos da simulação, cujos parâmetros e cenários estão descritos em 5. A discussão será dividida nas seguintes etapas: (1) análise sobre o desempenho do PRBS; (2) análise sobre o desempenho do OLSR para embasamento teórico; (3) considerações sobre a cooperação do movimento com a comunicação; (4) análise comparativa entre os dois protocolos; (5) discussão sobre a tecnologia híbrida em redes FANET; (6) discussão sobre trabalho Todos os gráficos usados para evidenciar os cenários possuem sempre um gráfico da métrica em questão (azul ou laranja escuro), seja a taxa de perda de pacotes, a média de atraso, a média de jitter ou a média de saltos, e um gráfico sobposto que indica a distância do primeiro ao último drone ao longo do tempo, ou seja, o comprimento da rede em si (laranja claro).

6.1 Protocolo de Roteamento Baseado em saltos (PRBS)

Os resultados do protocolo PRBS podem ser visualizados nas figuras 15, 16, 17, 18, 19, 20 e 21. A partir desses gráficos podemos concluir alguns pontos importantes para o desempenho da rede como um todo, focando sempre no objetivo de termos uma rede com alta disponibilidade.

O desempenho do protocolo como um todo é muito positivo por apresentar uma taxa média de perda de pacotes muito baixa e que varia pouco com o aumento do número de drones, conforme pode ser visto no gráfico 14.

Entretanto, há outros pontos importantes que precisam ser ressaltados. É possível perceber a degradação do desempenho no início e no final da missão, saindo de P_{c1} e



Figura 14 – Consolidado das médias de taxa de perda de pacote para os cenários usando o protocolo PRBS.

indo para P_{c11} , respectivamente. Nesses momentos, a rede possui uma alta densidade de drones no mesmo espaço, ou seja, há mais vizinhos para cada drone e estão a distâncias muito próximas. Outro ponto recai sobre a saturação da rede, dado que o número de saltos está majoritariamente no valor máximo possível. Por último, temos, também, a correlação do atraso com o comprimento da nuvem.

6.1.1 Distância e a quantidade de vizinhos

O protocolo PRBS possui um desempenho altíssimo, médias de 100% quando levamos em conta a taxa de entrega de pacotes durante a movimentação entre os pontos de coleta. Entretanto, para casos com mais de 20 drones, é possível perceber dois momentos com um desempenho abaixo da média: o início e a fim da missão. Esses comportamentos ficam evidentes nas figuras 16c, 17c, 18c, 19c, 20c e 21c, nos extremos do gráficos.

O fato desse baixo desempenho no início e no fim não ocorrerem no cenário de 10 drones, o que pode ser visto na figura 15c, nos leva a induzir que a densidade da rede influencia a situação. E a concentração de drones, de fato, impacta o algoritmo PRBS pois há um número alto de vizinhos para cada drone e, conseqüentemente, um maior número de iterações para o cálculo de qual a melhor rota. O algoritmo fica ainda mais sobrecarregado com a pequena variação das distâncias de cada vizinho. Ou seja, se há uma grande concentração, a diferença de distância do vizinho A e do vizinho B pode ser muito pequena e a variação delas se torna mais significativa, alterando constantemente o cálculo das rotas e influenciando a disponibilidade da rede.

Outro fator que influencia além da densidade é o alcance máximo entre os drones. Ao aumentar o alcance de cada drone, a descoberta das rotas de roteamento no início e no fim não é impactada com a densidade da rede. Isso ocorre pois há uma maior possibilidade dos drones da borda da rede se comunicarem diretamente ou de procurarem caminhos em drones que estão mais distantes daqueles concentrados, ou seja, aqueles que estão saindo ou chegando no sorvedouro. Esse comportamento foi testado mudando a potência do sinal, de 40 dBm para 50 dBm, o que leva a um alcance máximo de 600 metros no novo cenário. Os resultados, que podem ser visto na figura 22, evidenciam essa melhora no desempenho no início e no final da missão. O aumento da potência fez com que a taxa de perda seja insignificante, oscilando entre 0 a 0.5%.

6.1.2 Saturação da rede - roteamento no limite

Apesar do ótimo desempenho em relação a taxa média de perda e a sua variação, o protocolo PRBS possui um comportamento muito saturado nos cenários de potência normal (40dBm - alcance varia de 200 a 300 m). Nos gráficos 15b, 16b, 17b, 18b, 19b, 20b e 21b fica evidente que a rede atinge o número máximo de saltos e se mantém assim, em média, 85% do tempo. Ou seja, o protocolo está operando no limite do roteamento, pois um maior afastamento dos drones exigirá nós extras para realizar o roteamento do pacote.

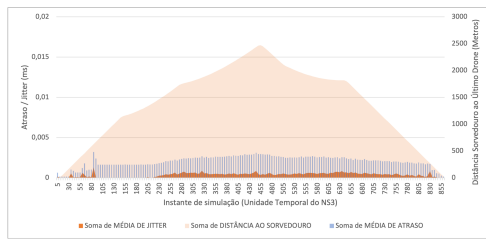
Com o objetivo de validar o comportamento do roteamento em uma rede menos saturada, a potência do sinal foi aumentada para termos um maior alcance e, consequentemente, não precisarmos atingir o limite da rede. Na figura 22, podemos averiguar que o comportamento do roteamento foi alterado e agora a rede opera no limite em 52% do tempo, além dos outros patamares ficarem mais visíveis também.

6.1.3 Correlação com o Atraso

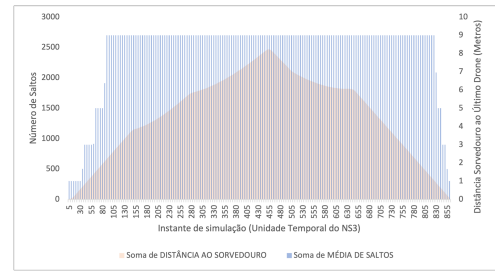
Uma correlação muito intuitiva, mas que fica mais evidente nas figuras 15a, 16a, 17a, 18a, 19a, 20a e 21a, é o atraso com o comprimento da nuvem. A correlação é de 80% e ocorre pois o número de drones replicando os pacotes até o destino aumenta conforme o tamanho da rede se expande.

6.2 *Protocolo Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)*

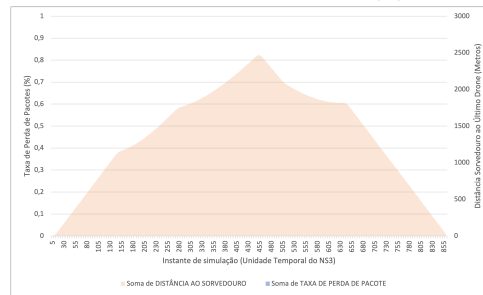
Os resultados do protocolo OLSR podem ser visualizados nas figuras 24, 25, 26, 27, 28, 29 e 30. A partir desses gráficos podemos concluir alguns pontos importantes para o desempenho da rede como um todo, focando sempre no objetivo de termos uma rede com alta disponibilidade para que seja viável a troca de informações durante o movimento, seja de movimentação ou dados coletados. Com isso, é possível perceber a degradação do desempenho com o aumento do número de drones, ou seja, o comprimento da rede; a dificuldade de encontrar rotas quando os drones estão em um momento de afastamento dos vizinhos; e a correlação do atraso com o comprimento da nuvem.



(a) Média de atraso e jitter ao longo da missão.

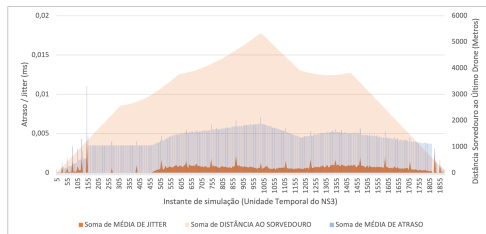


(b) Média de saltos ao longo da missão.

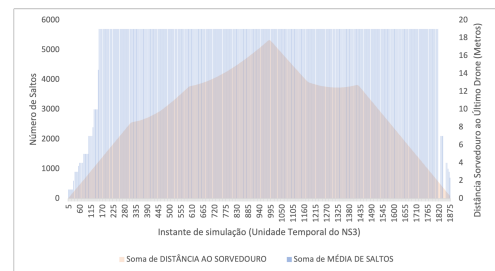


(c) Taxa de perda média ao longo da missão.

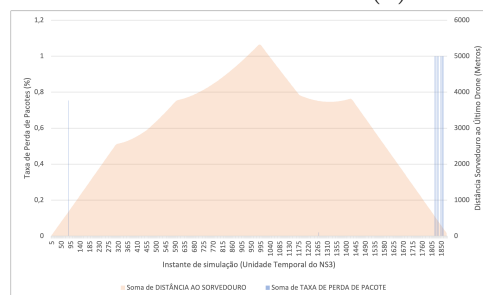
Figura 15 – Resultados para o cenário de 10 drones com os PCs ordenados e PRBS como protocolo.



(a) Média de atraso e jitter ao longo da missão.

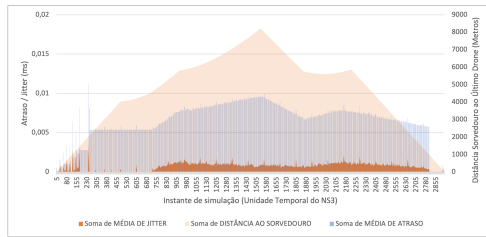


(b) Média de saltos ao longo da missão.

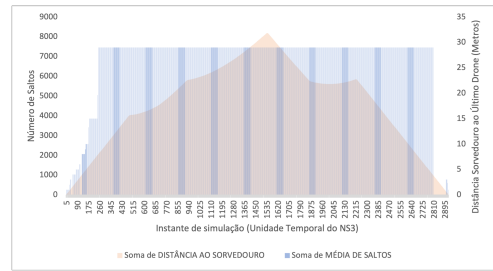


(c) Taxa de perda média ao longo da missão.

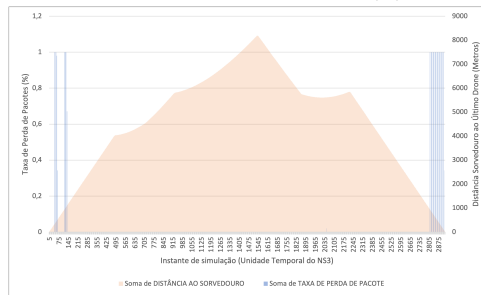
Figura 16 – Resultados para o cenário de 20 drones com os PCs ordenados e PRBS como protocolo.



(a) Média de atraso e jitter ao longo da missão.

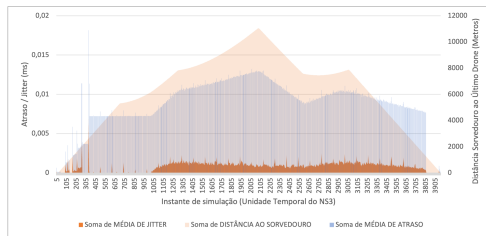


(b) Média de saltos ao longo da missão.

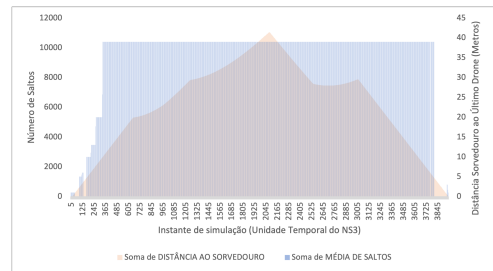


(c) Taxa de perda média ao longo da missão.

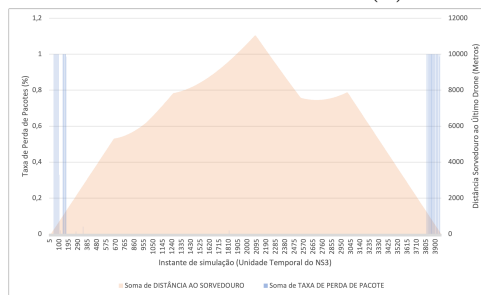
Figura 17 – Resultados para o cenário de 30 drones com os PCs ordenados e PRBS como protocolo.



(a) Média de atraso e jitter ao longo da missão.

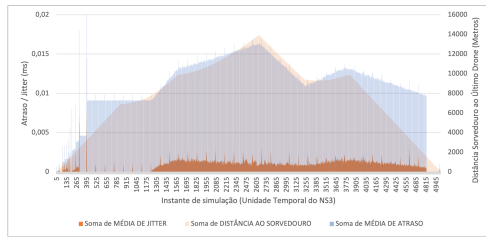


(b) Média de saltos ao longo da missão.

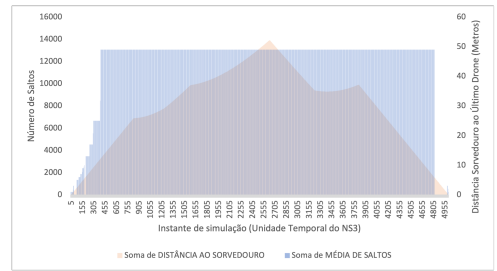


(c) Taxa de perda média ao longo da missão.

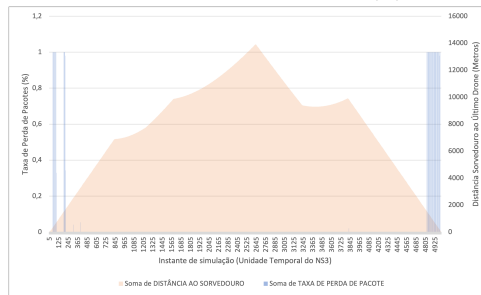
Figura 18 – Resultados para o cenário de 40 drones com os PCs ordenados e PRBS como protocolo.



(a) Média de atraso e jitter ao longo da missão.

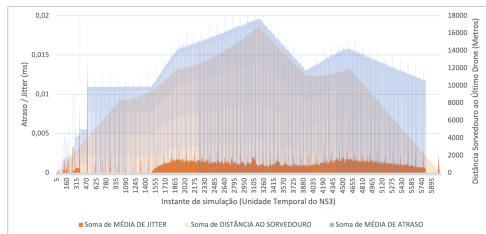


(b) Média de saltos ao longo da missão.

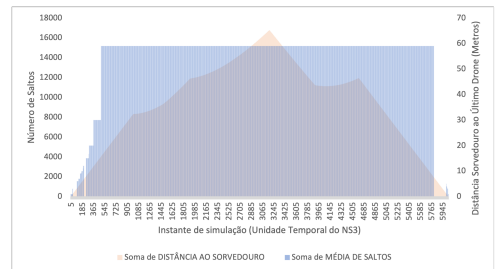


(c) Taxa de perda média ao longo da missão.

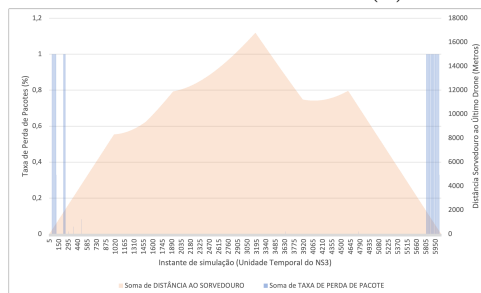
Figura 19 – Resultados para o cenário de 50 drones com os PCs ordenados e PRBS como protocolo.



(a) Média de atraso e jitter ao longo da missão.

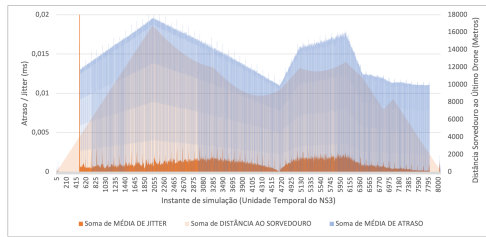


(b) Média de saltos ao longo da missão.

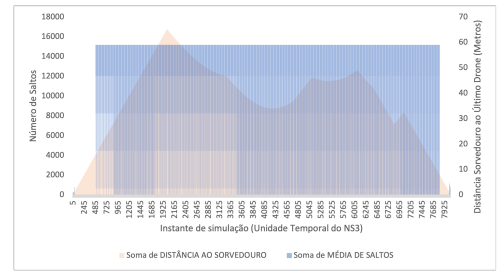


(c) Taxa de perda média ao longo da missão.

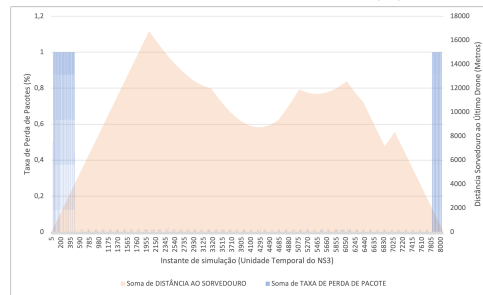
Figura 20 – Resultados para o cenário de 60 drones com os PCs ordenados e PRBS como protocolo.



(a) Média de atraso e jitter ao longo da missão.

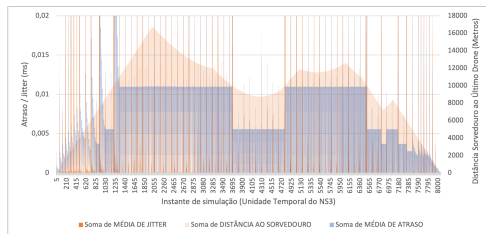


(b) Média de saltos ao longo da missão.

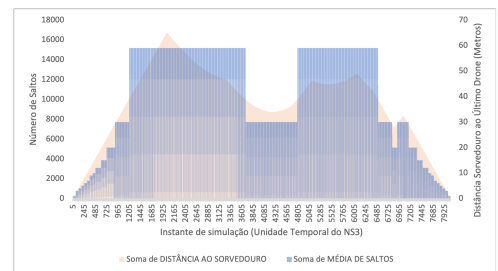


(c) Taxa de perda média ao longo da missão.

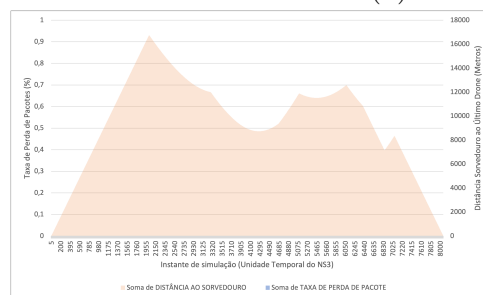
Figura 21 – Resultados para o cenário de 60 drones com os PCs desordenados e PRBS como protocolo.



(a) Média de atraso e jitter ao longo da missão.



(b) Média de saltos ao longo da missão.



(c) Taxa de perda média ao longo da missão.

Figura 22 – Resultados para o cenário de 60 drones com os PCs ordenados e PRBS como protocolo mas com a potência de sinal em 70dBm.

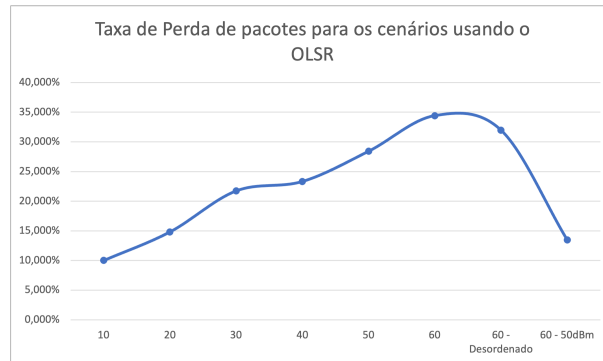


Figura 23 – Consolidado das médias de taxa de perda de pacote para os cenários usando o protocolo OLSR.

6.2.1 Comprimento da Nuvem

O comprimento da nuvem, ou seja, o número de drones presentes e conectados a rede, influencia muito o desempenho do protocolo OLSR. A taxa média de perda, por exemplo, varia de 10% para 10 drones até 35% com 60 drones, sendo crescente do 10 ao 60. É possível ver a diferença nas figuras 24c, 25c, 26c, 27c, 28c e 29c.

Busca por rotas

O comportamento crescente da taxa de perda, que fica ainda mais evidente visualizando o gráfico 23, ocorre devido a dificuldade do OLSR em encontrar as rotas conforme os drones vão se locomovendo. Quanto maior o comprimento da nuvem, menor a capacidade de capilaridade do protocolo na busca por rotas. Isso se deve em grande parte pela lógica dos pacotes de controle usados no processo de MPR, apresentado na seção 2. Esse processo se baseia em *broadcast* dos pacotes de controle para toda a rede usando a multiplicação desses por cada vizinho que o recebe. Com isso, quanto maior a rede maior o desafio de encontrar a rota, pois quanto maior for o número de vizinhos, maior o número de retornos que o host/drone que solicitou a rota deve processar.

Correlação com o Atraso

Uma correlação muito intuitiva, mas que fica mais evidente nas figuras 24a, 25a, 26a, 27a, 28a, 29a e 30a, é o atraso com o comprimento da nuvem. A correlação é de 89%

e ocorre pois o número de drones replicando os pacotes até o destino aumenta conforme o tamanho da rede se expande.

6.2.2 Afastamento dos Drones

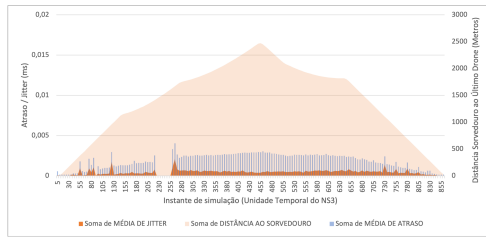
Nos cenários propostos, o comportamento mais comum e específico para o protocolo OLSR ocorre quando os drones estão em processo de afastamento. Nos gráficos 24, 25, 26, 27, 28, 29 e 30 podemos visualizar que o OLSR possui uma dificuldade de encontrar rotas da rede em um momento que os drones estão se afastando um do outro, sinônimo de estar aumentando o tamanho da rede e diminuindo a densidade da rede. Entretanto, o fenômeno oposto, o de aproximação, não gera um resultado análogo. Pelo contrário, a disponibilidade da rede nesse segundo momento é muito alta, com menor perdas de pacotes.

Uma possível hipótese dessa discrepância poderia estar associada a própria natureza do movimento. A ida do Sorvedouro até o PC mais longe (afastamento dos drones) tem um movimento duplo: (1) o próprio distanciamento linear dos drones e (2) o deslocamento da nuvem na direção dos pontos de coleta. E o retorno ao Sorvedouro tem um movimento apenas de aproximação dado que o deslocamento dos drones se torna linear.

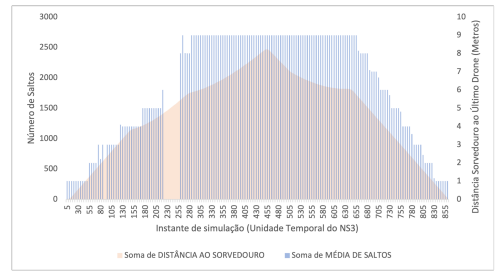
Entretanto, no cenário em que temos os pontos de coleta desordenados temos um movimento de aproximação junto com o deslocamento da nuvem como um todo e o desempenho nesse momento não é afetado, como pode ser visto nos gráficos da figura 30. Isso leva a consideração final que o protocolo OLSR possui uma dificuldade específica de encontrar as rotas de comunicação quando o comprimento da rede está aumentando. Algo que possui alta correlação com a lógica do MPR e o *broadcast* dos pacotes de controle para toda a rede, pois o aumento do comprimento recai sobre o que foi explanado na subseção 6.2.1.

6.3 Cooperação do Movimento com a Comunicação

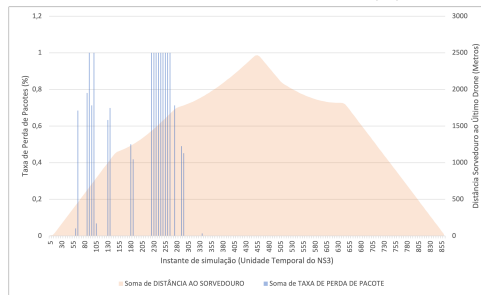
Na seção que se segue, iremos discutir como o algoritmo de movimentação influenciou os desempenhos dos protocolos OLSR e PRBS, discutindo a viabilidade da cooperação entre o movimento e a comunicação. Além de traçarmos um comparativo do desempenho de ambos os protocolos de comunicação.



(a) Média de atraso e jitter ao longo da missão.

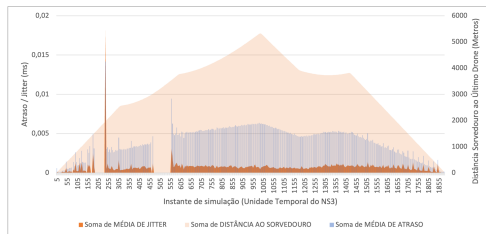


(b) Média de saltos ao longo da missão.

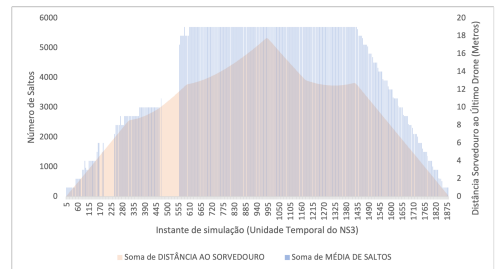


(c) Taxa de perda média ao longo da missão.

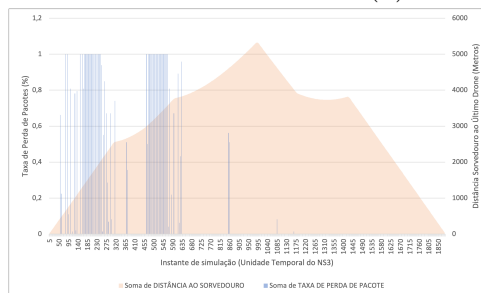
Figura 24 – Resultados para o cenário de 10 drones com os PCs ordenados e OLSR como protocolo.



(a) Média de atraso e jitter ao longo da missão.

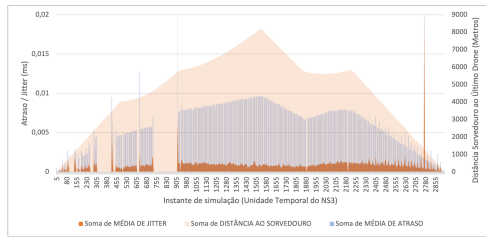


(b) Média de saltos ao longo da missão.

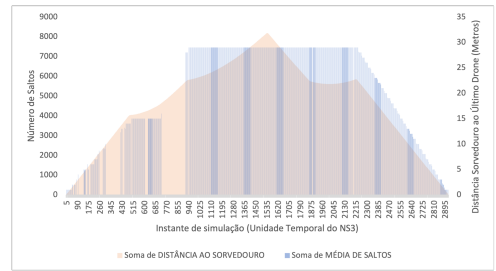


(c) Taxa de perda média ao longo da missão.

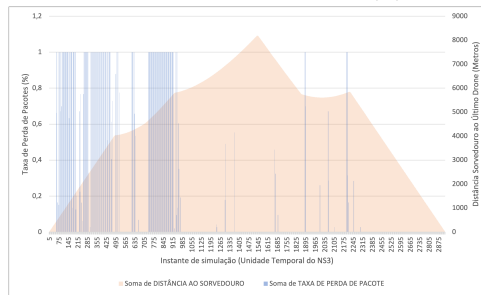
Figura 25 – Resultados para o cenário de 20 drones com os PCs ordenados e OLSR como protocolo.



(a) Média de atraso e jitter ao longo da missão.

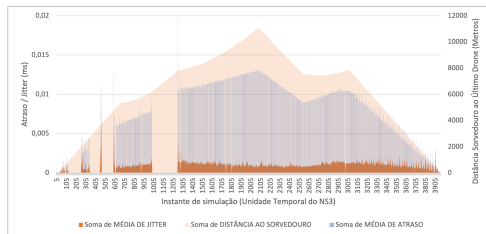


(b) Média de saltos ao longo da missão.

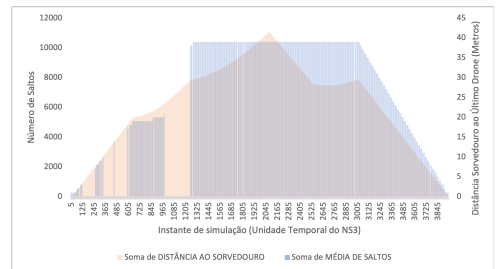


(c) Taxa de perda média ao longo da missão.

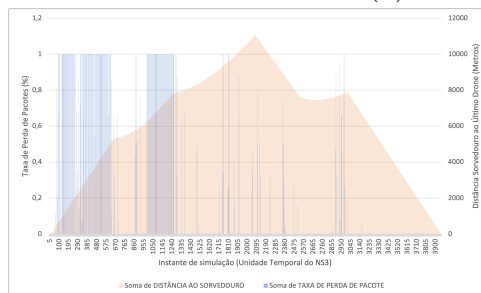
Figura 26 – Resultados para o cenário de 30 drones com os PCs ordenados e OLSR como protocolo.



(a) Média de atraso e jitter ao longo da missão.

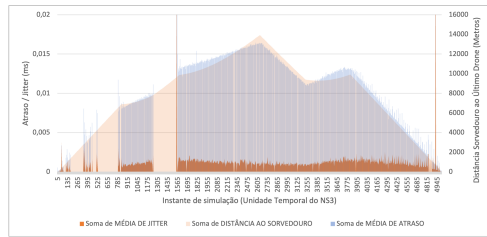


(b) Média de saltos ao longo da missão.

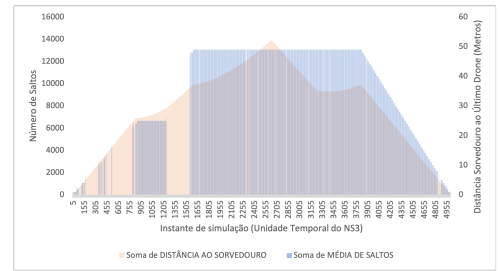


(c) Taxa de perda média ao longo da missão.

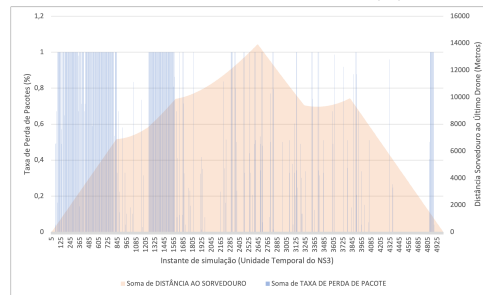
Figura 27 – Resultados para o cenário de 40 drones com os PCs ordenados e OLSR como protocolo.



(a) Média de atraso e jitter ao longo da missão.

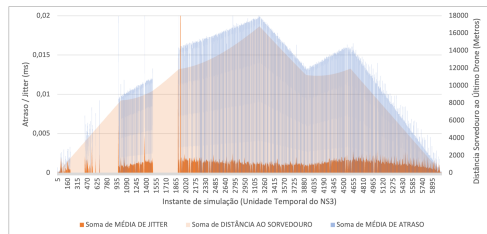


(b) Média de saltos ao longo da missão.

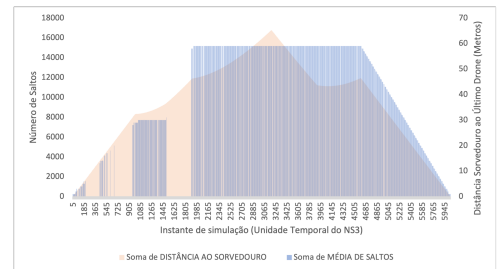


(c) Taxa de perda média ao longo da missão.

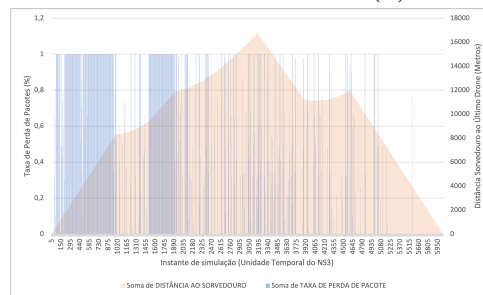
Figura 28 – Resultados para o cenário de 50 drones com os PCs ordenados e OLSR como protocolo.



(a) Média de atraso e jitter ao longo da missão.

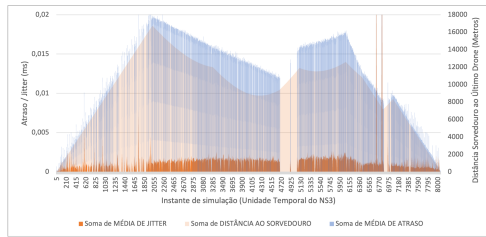


(b) Média de saltos ao longo da missão.

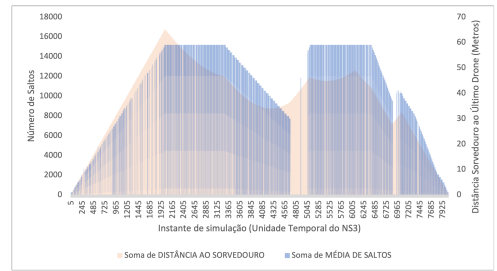


(c) Taxa de perda média ao longo da missão.

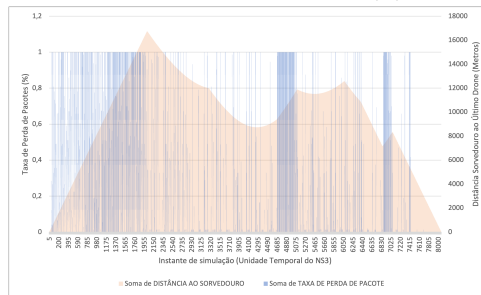
Figura 29 – Resultados para o cenário de 60 drones com os PCs ordenados e OLSR como protocolo.



(a) Média de atraso e jitter ao longo da missão.

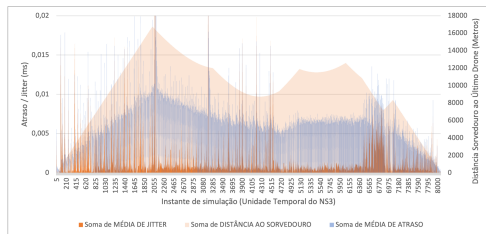


(b) Média de saltos ao longo da missão.

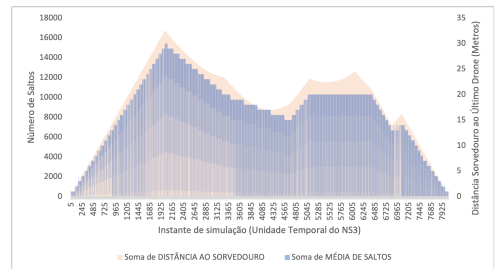


(c) Taxa de perda média ao longo da missão.

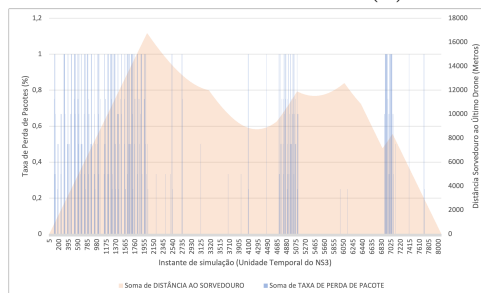
Figura 30 – Resultados para o cenário de 60 drones com os PCs desordenados e OLSR como protocolo.



(a) Média de atraso e jitter ao longo da missão.



(b) Média de saltos ao longo da missão.



(c) Taxa de perda média ao longo da missão.

Figura 31 – Resultados para o cenário de 60 drones com os PCs ordenados e PRBS como protocolo mas com a potência de sinal em 70dBm.

6.3.1 Discussão sobre o OLSR

O projeto anterior (ZUCCHI; SILVEIRA, 2018), assim como a literatura, ressaltou um grande desafio de como orquestrar a comunicação de uma rede Ad hoc tão dinâmica como uma nuvem de drones/FANET. O resultado dessa pesquisa mostrou que dentre os protocolos de redes MANET já existentes, o OLSR seria o que teria melhor desempenho. Entretanto, é evidente nos resultados no trabalho atual e no de 2018 (ZUCCHI; SILVEIRA, 2018) que o OLSR não desempenha bem sob uma densidade de rede muito baixa. Em densidades baixas, a disponibilidade da rede cai pela metade (ZUCCHI; SILVEIRA, 2018), o que é reforçado pelos resultados desse trabalho, nos quais o afastamento dos drones gera muita perda de pacote.

Esse comportamento do protocolo OLSR se deve em grande parte pelo mecanismo do MPR, que precisa aguardar a resposta dos n vizinhos da origem e seus repectivos para saber a rota até o destino. Ou seja, o comprimento da rede influencia diretamente o desempenho do OLSR, como pode ser visto na figura 23. Entretanto, apesar dessa ressalva, o OLSR apresentou um desempenho muito melhor com o algoritmo de movimentação proposto (ADVCD) do que aqueles utilizados no outro trabalho(ZUCCHI; SILVEIRA, 2018), como o Gauss-Markov ou o movimento randômico. Ao considerarmos a disponibilidade, o OLSR sem o ADVCD e a uma distância que pode variar até, no máximo, 1.5 km gera uma taxa de perda de pelo menos 50%. Enquanto que na presença do ADVCD, foi possível atingir um patamar de 25% para o cenário de 40 drones (número máximo utilizado em (ZUCCHI; SILVEIRA, 2018)). Além disso, o comportamento do OLSR ficou muito mais previsível, criando a possibilidade de alguma adaptação em sua lógica para otimizar os resultados ou prevenir/ajustar as falhas ao encontrar as rotas.

6.3.2 Discussão sobre o PRBS

O PRBS, por outro lado, não é afetado de forma tão significativa pelo comprimento, como pode ser visto na figura 14. Essa divergência entre ambos os protocolos ocorre pelas diferentes naturezas: centralizada no OLSR e descentralizada no PRBS.

No OLSR, o drone de origem aguarda o resultado da multiplicação dos pacotes de controle por seus vizinhos para saber a rota, mas o PRBS requer apenas o resultado dos

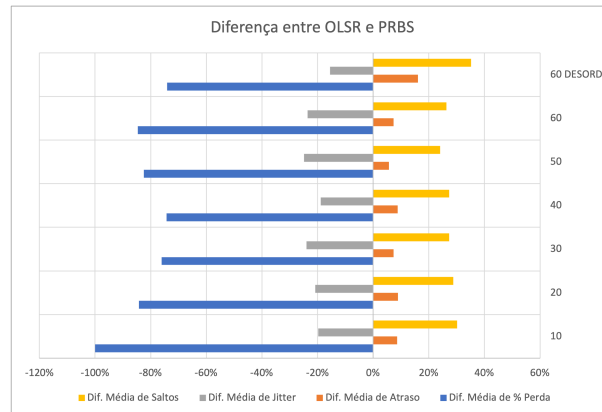


Figura 32 – Diferença percentual entre as métricas de todos os cenários (OLSR x PRBS)

vizinhos diretos. Ou seja, o resultado, no OLSR, deve percorrer toda a rota para poder identifica-la. O grande diferencial do PRBS é ter seu resultado final baseado do pressuposto que o padrão do movimento é igual para toda a rede e o mesmo comportamento dos vizinhos diretos são refletidos para os demais. Com isso, é possível calcular o *pace*/passo de saltos necessários para a rota.

A previsibilidade do algoritmo ADVCD por parte do PRBS e a troca das coordenadas entre os vizinhos de um respectivo drone fornecem, pois, um cenário cooperativo entre a movimentação e a comunicação. O PRBS representa, portanto, uma contribuição significativa, comprovando que a comunicação de uma rede FANET pode ser otimizada se for construída em cooperação com o movimento.

6.3.3 Análise comparativa entre os protocolos

Na figura 32, é possível visualizar as diferenças percentuais entre todos os cenários, OLSR de um lado e PRBS de outro: (1) O OLSR possui um média de atraso menor que o protocolo desenvolvido, mas isso tem uma alta relação com a média de saltos ser maior no segundo. Se há mais drones replicando a informação, o atraso, conseqüentemente, será acrescido do processamento de cada drone a mais na rede; (2) Mas o PRBS possui, em média, um desempenho 21% melhor na variação do próprio atraso e 82% melhor que o OLSR em questão de disponibilidade da rede.

6.4 *A possibilidade da Tecnologia Híbrida*

Dado que a cooperação entre movimento e comunicação se mostrou ser algo essencial para o bom desempenho de uma rede FANET, temos agora um novo desafio: o alcance dessa. A limitação de, no máximo, 300 metros entre drones no padrão IEEE 802.11 é algo que está sendo revisto pela literatura, conforme citado na seção 3, para dar mais amplitude para a aplicabilidade da rede FANET. Dentre essas revisões, o padrão IEEE 802.15.4 surge como um bom candidato para substituir o padrão anterior, principalmente se for amplificado pelo dispositivo XBee-PRO. Entretanto, o 802.11 ainda é melhor candidato para situações em que é necessário uma alta taxa de transmissão de dados, enquanto que o IEEE 802.15.4 é um padrão com baixa taxa de transmissão e baixo consumo de energia.

Ao considerar essa discussão, conjuntamente com a separação de dois momentos nos cenários desse trabalho: movimento dos drones e transmissão do dado coletado, cria-se a possibilidade de criarmos uma rede FANET com uma tecnologia híbrida. O processo de movimento precisa apenas transmitir a localização dos drones para seus vizinhos, diretos (PRBS) ou não (OLSR), o que não necessita de uma grande taxa de transmissão, mas seria muito proveitoso ter um maior alcance e, como complemento, um baixo consumo de energia. Nessa situação, o padrão 802.15.4 + XBee-PRO se adaptaria muito bem, mas não para a situação em que topologia está montada e há o requisito de uma taxa de transmissão maior para o envio do dado coletado. O 802.11 seria a melhor escolha nessa segunda situação citada.

O modelo apresentado acima nos leva, portanto, a considerar a construção de uma arquitetura híbrida, com o uso de duas tecnologias: 802.11 e 802.15.4 + XBee-Pro. E com o intuito de validar essa hipótese, simulamos o cenário de 60 drones com os pontos desordenados mas forçando uma adaptação ao 802.11, aumentando sua potência de transmissão. Esse novo teste validará apenas o comportamento dos protocolos, OLSR e PRBS, em uma rede com maior alcance, mas não será discutida a questão de taxa de transmissão ou menor consumo de energia, dado que a tecnologia em si não foi substituída.

6.4.1 Comportamento do OLSR

O novo teste, com a potência de transmissão maior no 802.11, reforça alguns pontos sobre o OLSR já citados anteriormente ou do seu próprio conceito:

1. **Dificuldade de encontrar a rota em um momento de afastamento dos drones:** Na figura 31 fica evidente três pontos de afastamento, (1) o início do movimento, (2) após o segundo 4685 e (3) no último afastamento dos drones, perto do segundo 6845.

Nesses três pontos, o OLSR tem uma porcentagem altíssima de perda de pacotes, mas a área de perda se tornou mais concentrada do que na figura 30. Imagina-se que essa concentração ocorre devido a diminuição de saltos que o mesmo drone precisa fazer para encontrar a rota para o destino. Entretanto, se faz necessário outros tipos de testes para validar essa tese com mais robustez.

Em todo caso, o aumento do alcance criou, sem dúvidas, um melhor desempenho dado que a taxa de perda de pacotes caiu de 34% (60 drones ordenados) e 31% (60 drones desordenados) para 13% com o aumento da potência do sinal. Como pode ser visto na figura 23.

2. **Comportamento pró-ativo na busca das rotas:** Com o aumento do alcance fica visível, também, o comportamento pró-ativo do OLSR. Na figura 31b, o número de saltos muda conforme temos aproximação ou afastamento do drone, evidenciando as mudanças de rota pelo OLSR. Mesmo existindo a possibilidade de se manter uma rota, o OLSR procura constantemente a melhor, algo que ocorre, por exemplo, entre os segundo 2000 e 4000. Nesse momento, o protocolo diminui o número de saltos ao encontrar rotas mais rápidas para o destino.

6.4.2 Comportamento do PRBS

O PRBS, que já possuía um bom desempenho para o alcance padrão do 802.11, apresentou resultados muito positivos e outras discussões latentes com o novo alcance:

1. **Saturação da rede:** Conforme citado em 6.1.2, a rede nos cenários testados com a potência padrão apresentava sempre uma saturação, obrigando o número de saltos serem iguais ao número de drones disponíveis.

Ao aumentar o alcance, a rede passou a ficar 52% em seu nível saturado, mas ficou evidente a dificuldade do protocolo em gerir as rotas a partir de 50% da capacidade da rede.

Dado que a fórmula de cálculo do *Pace* descrita na equação 6 considera que a divisão entre o número de drones e o fator calculado é um número inteiro, a evolução de saltos é mais rápida com o aumento da distância entre os drones. É por isso que há, por exemplo, uma mudança direta de 30 para 60 saltos (saturação), enquanto que, no início, há uma evolução gradativa mais clara de 1 a 30 saltos, como pode ser visto no gráfico 22b.

Apesar dessa situação não ser propícia e obrigar a rede a atingir o estado de saturação, o protocolo continuou apresentando um bom desempenho. Entretanto, é possível, no futuro, realizarmos um estudo que teste a viabilidade de dar maior granularidade para o *Pace* após atingir 50% da capacidade da rede.

2. **Rotas x Jitter:** A mudança contínua de rotas, que pode ser vista 22b, contribui para não termos nenhuma perda de pacote, como pode ser vista em 22c. Entretanto, conforme aumentamos ou diminuimos o número de saltos, temos uma variação de atraso pertinente que deve ser levado em conta para o desenho da aplicação escolhida.
3. **Questão sobre o início e o final da missão:** Conforme dito na seção 6.1.1, o PRBS com uma potência de sinal em 40dBm evidenciou sua dificuldade em encontrar a melhor rota no início e o final da missão como um todo. Esse comportamento pode ser visto nas imagens 16c, 17c, 18c, 19c e 20c e ele ocorre devido a alta concentração dos drones, gerando mudanças constantes de rotas. Entretanto, com o aumento da potência, a comunicação se expande, facilitando o encontro das rotas.

6.4.3 Conclusões sobre a tecnologia híbrida:

O conceito da tecnologia híbrida pôde, portanto, ser validado com os experimentos com a potência de sinal a 50dBm. Nas figuras 31c e 22c fica evidente a melhora em relação aos experimentos anteriores de 40dBm, figuras 30 e 21 respectivamente. O OLSR teve uma melhora de 60% na taxa de entrega, saindo de 32% de perda para 13% e o PRBS atingiu, aproximadamente 0% de perda perante os 8% anteriores.

Além da otimização da taxa de perda, a tecnologia híbrida poderia, também, consumir menos energia. Se um dos padrões for, por exemplo, o IEEE 802.15.4, que possui uma baixa taxa de transmissão de dados e, conseqüentemente, um baixo consumo de energia. Esse poderia ser usado para transmitir a localização dos vizinhos enquanto o IEEE 802.11 transmitiria os dados coletados.

6.5 Análise de trabalhos correlatos

A cooperação entre movimento e comunicação é o principal tema dessa dissertação e pode ser encontrada em outros trabalhos de forma indireta. O trabalho de Jianfei (PENG *et al.*, 2020), por exemplo, propõem um protocolo de roteamento baseado na trajetória, na localização e no movimento dos drones: o FNTAR (A Future Network Topology-aware Routing protocol). O calculo da localização futura de cada um dos drones corroborará com as decisões de roteamento, pois será mais suscetível encontrar os vizinhos de cada drone. No FNTAR, esse calculo futuro ocorre somente se a topologia não é conhecida em um determinado momento, o que permite classificarmos o protocolo proposto por Jianfei como **reativo**. Com base nas futuras localizações dos UAVs, o algoritmo pode calcular o potencial atraso futuro dos hipotéticos links entre todos os demais drones. O nó com o menor atraso potencial futuro é o nó mais próximo do destino.

Com isso, poderíamos concluir que há uma cooperação entre movimento e comunicação, mas o FNTAR usufrui da localização apenas quando desconhece a topologia, enquanto que a interlocução apresentada entre o PRBS e o ADVCD é mais direta e constante, um não funciona sem o resultado do outro, evidenciando um comportamento proativo da cooperação.

Entretanto, o comportamento reativo do FNTAR gera contribuições relevantes mas com ressalvas. Em relação a outros algoritmos de geolocalização, como o DTNgeo (PENG *et al.*, 2020), há um melhor desempenho em relação ao atraso e à taxa de entrega de pacotes de fato. Mas o incremento de tempo que cada drone agrega no envio do pacote varia de 1 a 3 segundos, enquanto que os resultados do PRBS, para uma quantidade análoga de drones, é de, no máximo, 6 milisegundos. Além disso, FNTAR apresenta uma boa taxa de entrega de pacotes que varia entre 60 a 100%, criando um rede com pouca confiabilidade se comparada com o desempenho do PRBS que, para uma quantidade análoga de drones, possui uma média da taxa de entrega próxima a 100%.

O trabalho de Abdelhamied ([ATEYA et al., 2019](#)) apresenta, também, uma cooperação indireta da mobilidade com a comunicação ao criar um protocolo de roteamento, o MO-OLSR, a partir da especificação do OLSR e acrescentando variáveis da movimentação em sua implementação. Enquanto que o OLSR valida em sua lógica de MPR (Multipoint Relay) se os links entre os drones vizinhos estão ativos e se há sobrecarga de pacotes neles, o MO-OLSR considera outros fatores, como o atraso total ponta a ponta, carga de tráfego no link, carga de tráfego no nó (ocupação do buffer) e a mobilidade dos drones. A validação da movimentação, entretanto, também ocorre de forma reativa, ou seja, a mudança da topologia não é comunicada diretamente do algoritmo de movimentação para o MO-OLSR. O protocolo proposto pelo autor valida a movimentação por meio, apenas, da estabilidade do link de comunicação. A contribuição do artigo ([ATEYA et al., 2019](#)) não é tão extensa quanto os resultados da cooperação entre PRBS e ADVCD, mas o MO-OLSR apresenta uma evolução do OLSR, apresentando resultados melhores que esse último, para propor, assim como o PRBS, uma solução para o roteamento de uma rede com alta mobilidade como as FANETs.

Na mesma direção que Abdelhamied, Lian Hong ([HONG et al., 2020](#)) propõem um protocolo proativo com uma adaptação do *Hello Message* entre os drones para conseguir validar as mudanças da topologia. Cada mudança de localização do drone é informada a seus vizinhos e, com isso, esses são capazes de calcular a duração do link para o drone em questão e, conseqüentemente, adaptar a rota de comunicação. Os resultados de Lian são positivos em comparação ao OLSR e ao AODV, mas não há como compararmos com os demais trabalhos devido a diferença de cenários de simulação. Mas a cooperação entre movimento e comunicação é comparável entre Lian e Abdelhamied, sendo que o primeiro aprofunda mais a cooperação ao transmitir constantemente a localização dos drones a seus vizinhos.

As contribuições de Jianfei ([PENG et al., 2020](#)), Abdelhamied ([ATEYA et al., 2019](#)) e Lian ([HONG et al., 2020](#)) reforçam a ideia de que a cooperação entre o movimento e a comunicação é essencial para o devido funcionamento de uma rede com topologia dinâmica como as FANETs. Os três trabalhos podem ser considerados, inclusive, uma evolução gradual da ideia. Os drones no trabalho de Jianfei não compartilham a localização entre si mas possuem a inteligência de calcular a topologia futura para recalcular o roteamento. Abdelhamied introduz a ideia de validar a topologia por meio da estabilidade dos links entre os drones, o que contribui para uma análise mais instantânea que o anterior. E Lian propõe

uma abordagem mais direta ao enviar a localização de cada drone aos seus vizinhos. O nível de cooperação é crescente entre os autores, mas apenas na proposta desse trabalho que é possível ter um entrelaçamento completo entre comunicação e movimento. Os algoritmos PRBS e ADVCD foram concebidos a partir do requisito de dependência mútua entre eles, culminando em uma colaboração direta e instantânea das duas frentes. A concepção dependente dos algoritmos é o que garante a cooperação entre eles e, conseqüentemente, os ótimos resultados apresentados nessa seção.

7 Conclusão

Drones possuem diversas aplicações para empresas e governos. Eles podem ser usados para operações de busca e resgate, detecção e prevenção de desastres ambientais como incêndios, monitoramento de tráfego urbano ou de fronteiras entre países, entre outros. E, em diversos casos de uso, um drone apenas não é o suficiente e uma rede de drones se torna relevante: uma rede FANET. A escolha dessa rede Ad hoc que, em decorrência da movimentação dos drones, geram constantes mudanças na topologia, surgem desafios como a complexidade algorítmica e a necessidade de um alto processamento para definir as rotas de transporte das informações na rede. Em redes Ad hoc não há, também, uma estrutura centralizada de controle e a comunicação é realizada em múltiplos saltos, características que complicam a gestão e controle da rede como um todo. Essa dissertação se propôs, portanto, a resolver as dificuldades encontradas na comunicação de uma rede com um movimento tão relevante e possibilitar a construção de uma FANET com alta disponibilidade.

No uso de uma FANET em qualquer aplicação citada é comum a necessidade de movimentação dos drones para, justamente, haver uma maior cobertura de área. Entretanto, a movimentação de um drone deveria guiar a mudança na topologia e, conseqüentemente, nas rotas de comunicação. A implementação da cooperação do movimento com a comunicação, possibilita a criação de protocolos de roteamento que enxerguem ou prevejam o padrão ou a lógica do movimento para, então, criar as rotas. E para orquestrar essa ideia de cooperação, esse projeto propõem uma arquitetura dividida entre módulos com responsabilidades bem definidas: comunicação, coordenação e cooperação. O módulo de Comunicação orquestra as rotas de comunicação por meio do PRBS (Protocolo de Roteamento Baseado em Saltos) e determina se a transmissão de evento ocorrido em um ponto de coleta de informações pode ser transmitido ou não. O PRBS se baseia em um outro algoritmo, o ADVCD, que está contido no módulo de movimentação e tem como responsabilidade garantir a separação mínima, a direção correta de cada drone para seu respectivo local na topologia e a coesão do movimento entre todos os drones. Ambos estão conectados com o módulo de cooperação, que é responsável por gerir o estado da rede como um todo e orientar cada um dos demais módulos.

A arquitetura proposta foi validada por meio do simulador NS-3, com a definição de 16 cenários de teste, e demonstrou um ótimo desempenho da rede em relação as métricas de

taxa de perda de pacote, atraso e latência da rede. A arquitetura, usufruindo dos protocolos PRBS e ADVCD, gerou uma rede com baixíssimas taxas de perda de pacote, variando de valores entre 0% e 8,5%. Essa variação ocorre devido ao aumento do comprimento da rede, número de drones, no decorrer dos cenários. Alterando o protocolo de roteamento do PRBS para o OLSR, mas mantendo o ADVCD, temos resultados diferentes, porém ainda positivos. Ao considerarmos a disponibilidade, o OLSR sem o ADVCD gera uma taxa de perda de pelo menos 50%, enquanto que na presença do ADVCD, foi possível atingir um patamar de 25% para o cenário de 40 drones (número máximo utilizado em (ZUCCHI; SILVEIRA, 2018)). Além disso, o comportamento do OLSR ficou muito mais previsível, criando a possibilidade de alguma adaptação em sua lógica para otimizar os resultados ou prevenir/ajustar as falhas ao encontrar as rotas.

O desempenho no uso conjunto do OLSR com o ADVCD revela que definir a mobilidade com base na aplicação e, conseqüentemente, na comunicação é uma estratégia não só válida como necessária. Mas é o desempenho do PRBS com o ADVCD que reforça o conceito da cooperação, pois somente com o primeiro protocolo que há a utilização das variáveis da mobilidade para a definição das rotas. A cooperação impacta diretamente o desempenho, pois o conjunto PRBS e ADVCD é 70% a 95% melhor que o OLSR e ADVCD em relação a taxas de entrega de pacote.

Os resultados também evidenciaram duas limitações importantes, que poderão ser exploradas em trabalhos futuros: a limitação da distância, dado que o alcance máximo do IEEE 802.11 é 300 metros; e a limitação lógica do PRBS em encontrar a melhor rota nas primeiras locomoções da rede na missão, indo do sorvedouro até o primeiro ponto de coleta, e nos últimos momentos, quando a nuvem está chegando, novamente, no sorvedouro. Ambas poderiam ser endereçadas com a introdução do conceito de tecnologia híbrida. O uso de determinadas tecnologias para cada responsabilidade da comunicação pode, junto com a cooperação do movimento e comunicação, resolver a saturação da rede, dando mais liberdade a topologia da rede, principalmente em questão do comprimento, consumir menos energia em situações que não é necessário uma alta taxa de transmissão e, por fim, abre possibilidades de rever o PRBS para que a concentração de drones não impacte o desempenho no início e no fim da missão.

Referências

- 8802-11, I. S. I. *Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications*. [S.l.: s.n.], 1999. v. 1999. i–513 p. ISBN 0738156558.
- ABDELRAHMAN, R. B. M.; MUSTAFA, A. B. A.; OSMAN, A. A. A Comparison between IEEE 802.11a, b, g, n and ac Standards. *IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE)*, v. 17, n. 5, p. 26–29, 2015. Disponível em: www.iosrjournals.org.
- ABDELRAHMAN, R. B. M.; MUSTAFA, A. B. A.; OSMAN, A. A. A Comparison between IEEE 802.11a, b, g, n and ac Standards. *IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE)*, v. 17, n. 5, p. 26–29, 2015. Disponível em: www.iosrjournals.org.
- ANDRE, T.; HUMMEL, K. A.; SCHOELLIG, A. P.; YANMAZ, E.; ASADPOUR, M.; BETTSTETTER, C.; GRIPPA, P.; HELLWAGNER, H.; SAND, S.; ZHANG, S. Application-driven design of aerial communication networks. *IEEE Communications Magazine*, v. 52, n. 5, p. 129–137, 2014. ISSN 01636804.
- ARAFAT, M. Y.; MOH, S. Localization and Clustering Based on Swarm Intelligence in UAV Networks for Emergency Communications. *IEEE Internet of Things Journal*, IEEE, v. 6, n. 5, p. 8958–8976, 2019. ISSN 23274662.
- ATEYA, A. A.; MUTHANNA, A.; GUDKOVA, I.; GAIDAMAKA, Y.; ALGARNI, A. D. Latency and energy-efficient multi-hop routing protocol for unmanned aerial vehicle networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, v. 15, n. 8, p. 1550147719866392, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1550147719866392>.
- BARONTI, P.; PILLAI, P.; CHOOK, V. W.; CHESSA, S.; GOTTA, A.; HU, Y. F. Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards. *Computer Communications*, v. 30, n. 7, p. 1655–1695, 2007. ISSN 01403664.
- BEKMEZCI, I.; SAHINGOZ, O. K.; TEMEL, S. Flying ad-hoc networks (fanets): A survey. *Ad Hoc Networks*, v. 11, n. 3, p. 1254 – 1270, 2013. ISSN 1570-8705. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870512002193>.
- BINOL, H.; BULUT, E.; AKKAYA, K.; GUVENC, I. Time Optimal Multi-UAV Path Planning for Gathering its Data from Roadside Units. *IEEE Vehicular Technology Conference*, IEEE, v. 2018-Augus, p. 1–5, 2018. ISSN 15502252.
- BIOMO, J. D. M. M.; KUNZ, T.; ST-HILAIRE, M. An enhanced Gauss-Markov mobility model for simulations of unmanned aerial ad hoc networks. *2014 7th IFIP Wireless and Mobile Networking Conference, WMNC 2014*, IEEE, 2014.

- BUJARI, A.; CALAFATE, C. T.; CANO, J. C.; MANZONI, P.; PALAZZI, C. E.; RONZANI, D. Flying ad-hoc network application scenarios and mobility models. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, v. 13, n. 10, p. 1–17, 2017. ISSN 15501477.
- CASBEER, D. W.; BEARD, R. W.; MCLAIN, T. W.; LI, S. M.; MEHRA, R. K. Forest fire monitoring with multiple small UAVs. *Proceedings of the American Control Conference*, IEEE, v. 5, p. 3530–3535, 2005. ISSN 07431619.
- CAUSA, F.; FASANO, G.; GRASSI, M. Multi-UAV path planning for autonomous missions in mixed GNSS coverage scenarios. *Sensors (Switzerland)*, v. 18, n. 12, 2018. ISSN 14248220.
- CHURYUMOV, G.; TKACHOV, V.; TOKARIEV, V.; DIACHENKO, V. Method for ensuring survivability of flying ad-hoc network based on structural and functional reconfiguration. *CEUR Workshop Proceedings*, v. 2318, p. 64–76, 2018. ISSN 16130073.
- CRUZ, E. A Comprehensive Survey in Towards to Future FANETs. *IEEE Latin America Transactions*, IEEE, v. 16, n. 3, p. 876–884, 2018. ISSN 15480992.
- DAVOLI, L.; BELLI, L.; CILFONE, A.; FERRARI, G. From Micro to Macro IoT: Challenges and Solutions in the Integration of IEEE 802.15.4/802.11 and Sub-GHz Technologies. *IEEE Internet of Things Journal*, IEEE, v. 5, n. 2, p. 784–793, 2018. ISSN 23274662.
- ERDELJ, M.; NATALIZIO, E.; CHOWDHURY, K. R.; AKYILDIZ, I. F. Help from the Sky: Leveraging UAVs for Disaster Management. *IEEE Pervasive Computing*, IEEE, v. 16, n. 1, p. 24–32, 2017. ISSN 15361268.
- FACEBOOK, T. *Aquila, Facebook*. 2018. Disponível em: <https://techcrunch.com/2018/06/26/facebook-permanently-grounds-its-aquila-solar-powered-internet-plane/>.
- FADLULLAH, Z. M.; TAKAISHI, D.; NISHIYAMA, H.; KATO, N.; MIURA, R. A dynamic trajectory control algorithm for improving the communication throughput and delay in UAV-aided networks. *IEEE Network*, IEEE, v. 30, n. 1, p. 100–105, 2016. ISSN 08908044.
- FONTES, H. *Drone que voa sozinho em florestas pode ser aliado contra desmatamento* *Jornal da USP*. 2020. Disponível em: <https://jornal.usp.br/ciencias/drone-que-voa-sozinho-em-florestas-pode-ser-aliado-contradesmatamento/>.
- George, E. A.; Tiwari, G.; Yadav, R. N.; Peters, E.; Sadana, S. Uav systems for parameter identification in agriculture. In: *2013 IEEE Global Humanitarian Technology Conference: South Asia Satellite (GHTC-SAS)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 270–273.
- GOERZEN, C.; KONG, Z.; METTLER, B. *A survey of motion planning algorithms from the perspective of autonomous UAV guidance*. [S.l.: s.n.], 2010. v. 57. 65–100 p. ISSN 09210296. ISBN 1084600993831.

GRPC: Introduction to gRPC. Disponível em: <https://grpc.io/docs/what-is-grpc/introduction/>.

GU, J.; SU, T.; WANG, Q.; DU, X.; GUIZANI, M. Multiple Moving Targets Surveillance Based on a Cooperative Network for Multi-UAV. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 56, n. 4, p. 82–89, 2018. ISSN 01636804.

GUILLEN-PEREZ, A.; CANO, M. D. Flying ad hoc networks: A new domain for network communications. *Sensors (Switzerland)*, v. 18, n. 10, 2018. ISSN 14248220.

GUPTA, L.; JAIN, R.; VASZKUN, G. Survey of Important Issues in UAV Communication Networks. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, IEEE, v. 18, n. 2, p. 1123–1152, 2016. ISSN 1553877X.

HAYAT, S.; YANMAZ, E.; MUZAFFAR, R. Survey on Unmanned Aerial Vehicle Networks for Civil Applications: A Communications Viewpoint. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, v. 18, n. 4, p. 2624–2661, 2016. ISSN 1553877X.

HONG, L.; GUO, H.; LIU, J.; ZHANG, Y. Toward swarm coordination: Topology-aware inter-uav routing optimization. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 69, n. 9, p. 10177–10187, 2020.

KAWAGUTI, L. *Avião não tripulado do Exército faz 1ª missão*. 2010. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/poder/827100-aviao-nao-tripulado-do-exercito-faz-1-missao.shtml>.

KHAN, M. A.; KHALID, A.; KHANZADA, F. Dual-radio dual-band configuration for flexible communication in flying ad-hoc network (FANET). *2019 International Conference on Communication Technologies, ComTech 2019*, n. January, p. 108–113, 2019.

KHAN, M. A.; QURESHI, I. M.; KHANZADA, F. A hybrid communication scheme for efficient and low-cost deployment of future flying AD-HOC network (Fanet). *Drones*, v. 3, n. 1, p. 1–20, 2019. ISSN 2504446X.

KHAN, M. A.; SAFI, A.; QURESHI, I. M.; KHAN, I. U. Flying ad-hoc networks (fanets): A review of communication architectures, and routing protocols. In: *2017 First International Conference on Latest trends in Electrical Engineering and Computing Technologies (INTELLECT)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–9.

KHILARE, P. A. A Review on Wireless Networking Standard-Zigbee. *International Research Journal of Engineering and Technology*, v. 3, n. 6, p. 754–757, 2016. Disponível em: <https://www.irjet.net/archives/V3/i6/IRJET-V3I6139.pdf>.

KONATOWSKI, S.; PAWIOWSKI, P. Ant colony optimization algorithm for uav path planning. In: *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 177–182.

LAMONT, G. B.; SLEAR, J. N.; MELENDEZ, K. Uav swarm mission planning and routing using multi-objective evolutionary algorithms. In: *2007 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Multi-Criteria Decision-Making*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 10–20.

LI, S.; SUN, X.; XU, Y. Particle swarm optimization for route planning of unmanned aerial vehicles. In: *2006 IEEE International Conference on Information Acquisition*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 1213–1218.

LIU, K.; ZHANG, J.; ZHANG, T. The clustering algorithm of UAV networking in near-space. *ISAPE 2008 - The 8th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory Proceedings*, p. 1550–1553, 2008.

MAAKAR, S. K.; SINGH, Y.; SINGH, R. Flying Ad Hoc network: A newest research area for Ad Hoc networks. *2019 2nd International Conference on Intelligent Communication and Computational Techniques, ICCT 2019*, n. January, p. 298–302, 2019.

MAISTRENKO, V. A.; ALEXEY, L. V.; DANIL, V. A. Experimental estimate of using the ant colony optimization algorithm to solve the routing problem in FANET. *2016 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2016 -Proceedings*, IEEE, 2016.

MARRO, A. A.; GONÇALVES, L. M. G. A path planning method for multi-uav system. In: *2013 Latin American Robotics Symposium and Competition*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 129–135.

Olivieri de Souza, B. J.; ENDLER, M. *Evaluating flight coordination approaches of UAV squads for WSN data collection enhancing the internet range on WSN data collection*. [S.l.]: Journal of Internet Services and Applications, 2020. v. 11. ISSN 18690238. ISBN 1317402000125.

PENG, J.; GAO, H.; LIU, L.; WU, Y.; XU, X. Fntar: A future network topology-aware routing protocol in uav networks. In: *2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–6.

PEREIRA, D. S.; De Moraes, M. R.; NASCIMENTO, L. B.; ALSINA, P. J.; SANTOS, V. G.; FERNANDES, D. H.; SILVA, M. R. Zigbee Protocol-Based Communication Network for Multi-Unmanned Aerial Vehicle Networks. *IEEE Access*, v. 8, p. 57762–57771, 2020. ISSN 21693536.

PETRONOTÍCIAS. *Maior drone construído no Brasil está pronto para monitorar a Amazonia, fronteiras e plataformas de petróleo Portos Mercados*. 2020. Disponível em: <https://www.portosmercados.com.br/maior-drone-construido-no-brasil-esta-pronto-para-monitorar-a-amazonia-fronteiras-e-plataformas-de->

PHUNG, M. D.; HA, Q. P. Safety-enhanced uav path planning with spherical vector-based particle swarm optimization. *Applied Soft Computing*, v. 107, p. 107376, 2021. ISSN 1568-4946. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494621002994>.

PITRE, R. R.; LI, X. R.; DELBALZO, R. Uav route planning for joint search and track missions—an information-value approach. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, v. 48, n. 3, p. 2551–2565, 2012.

RILEY, G. F.; HENDERSON, T. R. The ns-3 network simulator. In: . *Modeling and Tools for Network Simulation*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. p. 15–34. ISBN 978-3-642-12331-3. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-642-12331-3_2.

ROBERGE, V.; TARBOUCHI, M.; LABONTE, G. Comparison of parallel genetic algorithm and particle swarm optimization for real-time uav path planning. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 9, n. 1, p. 132–141, 2013.

SCHERER, J.; YAHYANEJAD, S.; HAYAT, S.; YANMAZ, E.; VUKADINOVIC, V.; ANDRE, T.; BETTSTETTER, C.; RINNER, B.; KHAN, A.; HELLWAGNER, H. An autonomous multi-UAV system for search and rescue. *DroNet 2015 - Proceedings of the 2015 Workshop on Micro Aerial Vehicle Networks, Systems, and Applications for Civilian Use*, p. 33–38, 2015.

SHAO, S.; PENG, Y.; HE, C.; DU, Y. Efficient path planning for uav formation via comprehensively improved particle swarm optimization. *ISA Transactions*, v. 97, p. 415–430, 2020. ISSN 0019-0578. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019057819303532>.

SHARMA, P.; SINGH, G. Comparison of Wi-Fi IEEE 802 . 11 Standards Relating to Media Access Control Protocols. *International Journal of Computer Science and Information Security*, v. 14, n. 10, p. 856–862, 2016.

SHI, N.; LUO, X. A novel cluster-based location-aided routing protocol for UAV fleet networks. *International Journal of Digital Content Technology and its Applications*, v. 6, n. 18, p. 376–383, 2012. ISSN 19759339.

SILVA, M. R.; SOUZA, E. S.; ALSINA, P. J.; FRANCISCO, H. C.; MEDEIROS, A. A.; NOGUEIRA, M. B.; De Albuquerque, G. G. L.; DANTAS, J. B. Communication network architecture specification for multi-UAV system applied to scanning rocket impact area first results. *Proceedings - 2017 LARS 14th Latin American Robotics Symposium and 2017 5th SBR Brazilian Symposium on Robotics, LARS-SBR 2017 - Part of the Robotics Conference 2017*, v. 2017-December, p. 1–6, 2017.

SINGH, K.; VERMA, A. K. Experimental analysis of aodv, dsdv and olsr routing protocol for flying adhoc networks (fanets). In: *2015 IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–4.

SÁNCHEZ-GARCÍA, J.; REINA, D.; TORAL, S. A distributed pso-based exploration algorithm for a uav network assisting a disaster scenario. *Future Generation Computer Systems*, v. 90, p. 129–148, 2019. ISSN 0167-739X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X18303649>.

- TEACY, W. T. L.; NIE, J.; MCCLEAN, S.; PARR, G. Maintaining connectivity in uav swarm sensing. In: *2010 IEEE Globecom Workshops*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1771–1776.
- TENG, H.; AHMAD, I.; MSM, A.; CHANG, K. 3d optimal surveillance trajectory planning for multiple uavs by using particle swarm optimization with surveillance area priority. *IEEE Access*, v. 8, p. 86316–86327, 2020.
- WANG, J.; JIANG, C.; HAN, Z.; REN, Y. Taking Drones to the Next Level. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, v. 12, n. 3, p. 73–82, 2017.
- WU, J.; ZOU, L.; ZHAO, L.; AL-DUBAI, A.; MACKENZIE, L.; MIN, G. A multi-UAV clustering strategy for reducing insecure communication range. *Computer Networks*, Elsevier B.V., v. 158, p. 132–142, 2019. ISSN 13891286. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.04.028>.
- WU, X.; BAI, W.; XIE, Y.; SUN, X.; DENG, C.; CUI, H. A hybrid algorithm of particle swarm optimization, metropolis criterion and rts smoother for path planning of uavs. *Applied Soft Computing*, v. 73, p. 735–747, 2018. ISSN 1568-4946. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494618305283>.
- XIMENES, A. *Exercito brasileiro reprime crimes na fronteira amazonica com operacoes — Cotidiano — A Critica — Amazonia - Amazonas - Manaus*. 2018. Disponível em: <https://www.acritica.com/channels/cotidiano/news/exercito-brasileiro-reprime-crimes-na-fronteira-amazonica-com-operacoes>.
- YANMAZ, E.; YAHYANEJAD, S.; RINNER, B.; HELLWAGNER, H.; BETTSTETTER, C. Drone networks: Communications, coordination, and sensing. *Ad Hoc Networks*, Elsevier B.V., v. 68, p. 1–15, 2018. ISSN 15708705. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2017.09.001>.
- ZAFAR, W.; KHAN, B. M. Flying Ad-Hoc. n. june, p. 67–74, 2016.
- ZAFAR, W.; KHAN, B. M. A reliable, delay bounded and less complex communication protocol for multicluster FANETs. *Digital Communications and Networks*, Elsevier B.V., v. 3, n. 1, p. 30–38, 2017. ISSN 23528648. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dcan.2016.06.001>.
- ZANELLA, A.; ZORZI, M. Long Range Communications in Unlicensed Bands: The Risings Stars in the IoT and Smart City Scenarios. n. October, p. 60–67, 2016.
- ZHOU NAN;CHENG, N. I. S. S. yi. Multi-UAV-Aided Networks. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, IEEE, n. december, p. 36–44, 2015.

ZUCCHI, A. C.; SILVEIRA, R. M. Performance analysis of routing protocol for ad hoc UAV network. *LANC 2018 - Proceedings of the 10th Latin American Networking Conference*, n. October, p. 73–80, 2018.

A Movimento derivado do Algoritmo de Distanciamento do Vizinho e de Coesão do Destino (ADVCD)

Abaixo pode ser evidenciado como o movimento, derivado do algoritmo de distanciamento do vizinho e de coesão do destino, acontece durante a simulação realizada nesse trabalho.

