



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA**

RODRIGO MEDEIROS COSTA

**UM MECANISMO PARA REALÇAR A
CONECTIVIDADE DE ROTEAMENTO
GEOGRÁFICO NA TRANSMISSÃO MULTIMÍDIA
EM VANTS**

BELÉM-PA

Junho / 2014

RODRIGO MEDEIROS COSTA

**UM MECANISMO PARA REALÇAR A CONECTIVIDADE
DE ROTEAMENTO GEOGRÁFICO NA TRANSMISSÃO
MULTIMÍDIA EM VANTS**

Dissertação submetida à banca julgadora na
Universidade Federal do Pará como parte dos
requisitos para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Elétrica

Orientador: Dr. Eduardo Coelho Cerqueira

BELÉM-PA

Junho / 2014

RODRIGO MEDEIROS COSTA

**UM MECANISMO PARA REALÇAR A
CONNECTIVIDADE DE ROTEAMENTO
GEOGRÁFICO NA TRANSMISSÃO MULTIMÍDIA
EM VANTS**

Dissertação submetida à banca julgadora na
Universidade Federal do Pará como parte dos
requisitos para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Elétrica

Aprovada em: __/__/_____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Eduardo Coelho Cerqueira
Universidade Federal do Pará
Orientador

Prof. Dr. Aldri Luiz dos Santos
Universidade Federal do Paraná

Prof. Dr. Agostinho Luiz da Silva Castro
Universidade Federal do Pará

Agradeço em primeiro lugar a Deus que iluminou o meu caminho durante esta caminhada.

Agradecimentos

Em primeiro lugar a Deus por cada dia de vida e pela oportunidade de vivenciar a obtenção de novos conhecimentos e experiências durante o período da pós-graduação.

Aos meus amados pais, Rita de Cássia Medeiros Costa e José Augusto Chaves Costa, que sempre me orientam sobre os caminhos certos a serem seguidos, além do apoio durante as dificuldades. Agradeço também aos meus familiares, que em alguns momentos de dificuldades, deram total apoio.

Ao meu orientador Prof. Dr. Eduardo Cerqueira, que pelo voto de confiança depositado desde os tempos de Iniciação Científica, deu-me a oportunidade de realizar este trabalho. Agradeço pela oportunidade, pela disponibilização dos recursos necessários, pelo apoio e pela ajuda fornecida para conclusão de mais essa etapa da minha vida. Agradeço também oportunidade da experiência acadêmica em Curitiba.

Ao Prof. Dr. Aldri Santos e ao seu grupo NR-2 (Núcleo de Redes Sem Fio e Redes Avançadas) pelo acolhimento e excelente experiência acadêmica durante a minha estadia na Universidade Federal do Paraná em Curitiba. Seus ensinamentos estarão presentes durante a minha nova jornada profissional e pessoal. Agradeço também pelo suporte durante as etapas de desenvolvimento desse trabalho.

Aos amigos queridos, que sempre torceram e acreditaram na realização deste sonho.

Ao GERCOM (Grupo de Estudos em Redes de Computadores e Comunicação Multimídia), pela colaboração significativa com o meu amadurecimento acadêmico e onde tive a oportunidade do desenvolvimento deste e de outros trabalhos.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo suporte financeiro.

E por fim, mas não menos importante agradeço também ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica PPGEE/UFPA, pela oportunidade do Mestrado.

Resumo

Resumo da Dissertação apresentada à UFPA como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Um Mecanismo para Realçar a Conectividade de Roteamento Geográfico na Transmissão Multimídia em VANTs

Orientador: Dr. Eduardo Coelho Cerqueira

Palavras-chave: Roteamento geográfico; Conectividade; Redes VANTs; Multimídia.

As redes de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) têm potencializado o uso de aplicações multimídia devido ao seu elevado grau de mobilidade e versatilidade. Esse crescimento ocorre pela facilidade de acesso e utilização dos VANTs quadricópteros em diversas aplicações civis. As aplicações civis têm como característica principal o uso de dados multimídia, como vídeos, por oferecerem uma perspectiva visual mais detalhada do ambiente. A transmissão desse tipo de dado nas redes VANTs por meio de protocolos geográficos melhora a taxa de entrega de dados. Entretanto, ela ainda não é suficiente para prover qualidade de experiência (QoE). Isso ocorre devido ao elevado grau de mobilidade dos quadricópteros que ocasiona quebras de enlace durante a transmissão multimídia. Por consequência, ela prejudica a conectividade e induz a altas perdas de pacotes e atrasos. Então, este trabalho propõe um mecanismo, chamado RCRV, com base em técnicas de predição de mobilidade em termos de posicionamento e da estimativa do tempo de enlace para realçar a tomada de decisão de roteamento em protocolos geográficos. Além disso, ele utiliza critérios que consideram os comportamentos de mobilidade dos VANTs. Assim, o RCRV possibilita o prolongamento da conectividade nas redes VANTs. O RCRV é um mecanismo que complementa as estratégias de roteamento dos protocolos geográficos. Desse modo, adicionou-se o RCRV ao protocolo GPSR a fim de avaliar os ganhos e benefícios do mecanismo em um protocolo de roteamento geográfico. Simulações foram realizadas com diferentes velocidades e números de VANTs. Os resultados mostraram que o RCRV aumenta a conectividade da transmissão, melhorando a entrega do conteúdo multimídia e a qualidade do vídeo observado pelo usuário.

Abstract

Abstract of Dissertation presented to UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

A Mechanism to Enhance Connectivity of Geographic Routing in the Multimedia Streaming in UAV Networks

Advisor: Dr. Eduardo Coelho Cerqueira

Keywords: Geographic Routing; Connectivity; UAV Networks; Multimedia.

Networks of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have enhanced the use of multimedia applications due to their high degree of mobility and versatility. This increase occurs due the accessibility and use of UAVs quadricopters in several civilian applications. Civilian applications have as main characteristic the use of multimedia data such as videos, because they offer a more detailed visual perspective of the environment. The transmission of such data in UAV networks by geographic protocols improves the rate of data delivery. However, it is not sufficient to provide quality of experience (QoE). This is because the high degree of mobility of the quadricopters, which leads to link breaks during multimedia transmission. Consequently, it impairs connectivity and induces high packet losses and delays. Therefore, this paper proposes a mechanism called RCRV, based on techniques for predicting mobility in terms of positioning and link estimation time to enhance the decision making process in geographic routing protocols. Furthermore, it employs criteria that consider the behavior of mobility of UAVs. Thus, RCRV enables the extension of connectivity in UAV networks. The RCRV is a mechanism that complements the strategies of geographic routing protocols. In this way, added the RCRV to the GPSR protocol to evaluate the gains and benefits of him in a geographic routing protocol. Simulations were performed with different speeds and numbers of UAVs. The results showed that the RCRV increases the connectivity in the multimedia transmission, improving the delivery of multimedia content and video quality observed by the user.

Lista de Figuras

Figura 1	Configurações dos VANTs [10]	5
Figura 2	Arquiteturas de comunicação das redes VANTs [15]	7
Figura 3	Interação entre a rede VANT e a estação HAP [5]	8
Figura 4	Categoria dos Micro/Mini VANTs [21, 22]	9
Figura 5	Modelo de VANT Tático [25]	9
Figura 6	Modelo de VANT Estratégico [27]	10
Figura 7	Modelo de VTOL [29]	10
Figura 8	Trajetória do VANT utilizando o SRCM [35]	12
Figura 9	Trajetórias de alguns VANTs utilizando o PR [35]	13
Figura 10	Trajetória do VANT utilizando o ST-3D [35]	13
Figura 11	Trajetórias dos VANTs por meio do Gauss-Markov 3D [39]	14
Figura 12	Sequência LODMAC com pares de transceptores [5]	23

Figura 13	RCRV e sua interação com um protocolo de roteamento	28
Figura 14	Interrupção da conectividade entre dois nós	29
Figura 15	Casos de uso da função atan2(x,y) [61]	32
Figura 16	Direção dos nós em relação ao destino	33
Figura 17	Distância dos nós em relação ao destino	34
Figura 18	Encaminhamento pelo modo <i>greedy</i>	34
Figura 19	Encaminhamento pelo modo perímetro	35
Figura 20	Formação de um caminho entre um nó fonte F e o destino D	36
Figura 21	Área do Campus Básico da Universidade Federal do Pará [63]	39
Figura 22	PDR e E2E para 8, 12, 16 e 20 VANTs - UAV1	40
Figura 23	SSIM para 8, 12, 16 e 20 VANTs - UAV1	41
Figura 24	PDR e E2E para 24, 28 e 32 VANTs - UAV1	42
Figura 25	SSIM para 24, 28 e 32 VANTs - UAV1	43
Figura 26	PDR e E2E para 8, 12, 16 e 20 VANTs - UAV2	44
Figura 27	SSIM para 8, 12, 16 e 20 VANTs - UAV2	44
Figura 28	PDR e E2E para 24, 28 e 32 VANTs - UAV2	45
Figura 29	SSIM para 24, 28 e 32 VANTs - UAV2	46

Figura 30	PDR, E2E e SSIM para 36, 44 e 56 VANTs - UAV1	56
Figura 31	PDR, E2E e SSIM para 36, 44 e 56 VANTs - UAV2	57

Lista de Tabelas

Tabela 1	Comparativo entre as MANETs, as VANETs e as redes VANTs	18
Tabela 2	Principais características das soluções nas camadas MAC e de Rede	..	26
Tabela 3	Parâmetros da simulação	39

Lista de Abreviaturas

TIC	Tecnologias da Informação e Comunicação
UAVs	Unmanned Aerial Vehicles
MAC	Media Access Control
VANTs	Veículos Aéreos Não Tripulados
CCT	central de controle terrestre
HAP	High Altitude Platforms
MANET	Mobile ad-hoc networking
VTOLs	Vertical Take-off and Landing
MALE	Medium Altitude Long Endurance
HALE	High Altitude Long Endurance
MM	Modelo de Mobilidade
LW	Lévy Walk
LF	Lévy Flight
RW	Random Walk
RD	Random Direction
RWP	Random Waypoint
SRCM	Semi-Random Circular Movement
PR	Pheromone Repel
ST	Smooth Turn
GM-3D	Gauss-Markov 3D
GM-2D	Gauss-Markov 2D
NS-3	Network Simulator 3
MMC	Mobility Markov Chain
GPS	Global Positioning System
CH	Cluster-Head
VANETs	Veicular Ad Hoc Networks

RFC	Request for Comments
PDR	Packet Delivery Ration
E2E	End-to-End Delay
PSNR	Peak Signal-to-Noise Ratio
MSE	Mean Square Error
SSIM	Structural Similarity Index
VQM	Video Quality Measurement Tool
AMUV	Adaptive Medium Access Control Protocol for Unmanned Aerial Vehicle
RTS	Request-To-Send
CTS	Clear-To-Send
LODMAC	Location Oriented Directional MAC Protocol
HOL	Head-Of-Line
MPRGR	Mobility Prediction Reactive-Greedy-Reactive
AODV	Ad-hoc On Demand Distance Vector Routing
RREQ	Route Request
RREP	Route Reply
GGF	Greedy Geographic Forwarding
RRER	Route Error
MPGR	Mobility Prediction based Geographic Routing
GPSR	Greedy Perimeter Stateless Routing
RNH	Reliable Next Hop
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance-Broadcast
IFT	Instantaneous Flight Time

Conteúdo

1	Introdução	p. 1
1.1	Motivação e desafios	p. 1
1.2	Objetivos	p. 2
1.3	Organização do texto	p. 3
2	Referencial Teórico	p. 4
2.1	Redes VANTs	p. 4
2.2	Classificação dos VANTs	p. 8
2.3	Modelos de Mobilidade para VANTs	p. 10
2.3.1	Modelos 2D	p. 11
2.3.2	Modelos 3D	p. 12
2.4	Métodos de Predição de Mobilidade	p. 15
2.4.1	Predição de Mobilidade pelo Histórico de Movimentos	p. 15
2.4.2	Predição de Mobilidade pela Topologia Física	p. 16
2.4.3	Predição de Mobilidade pela Topologia Lógica	p. 17
2.5	Desafios da Transmissão em Redes VANTs	p. 17
2.6	Métricas de avaliação de desempenho para protocolos de roteamento em redes VANTs	p. 18
2.6.1	Métricas de QoS	p. 18
2.6.2	Métricas de QoE	p. 19

2.6.2.1	<i>Structural Similarity Index</i> - (SSIM)	p. 19
2.7	Conclusões do capítulo	p. 20
3	Trabalhos Relacionados	p. 21
3.1	Soluções na camada MAC	p. 21
3.1.1	Adaptive Medium Access Control Protocol for Unmanned Aerial Vehicle (AMUAV)	p. 21
3.1.2	Location Oriented Directional MAC Protocol (LODMAC)	p. 22
3.2	Soluções na Camada de Rede	p. 23
3.2.1	Mobility Prediction Reactive-Greedy-Reactive (MPRGR)	p. 23
3.2.2	Mobility Prediction based Geographic Routing (MPGR)	p. 24
3.2.3	Topology Aware Routing Based on ADS-B System (A-R)	p. 25
3.3	Conclusões do capítulo	p. 26
4	Mecanismo para Realçar a Conectividade em VANTs	p. 27
4.1	Arquitetura	p. 28
4.1.1	Predição de Mobilidade	p. 28
4.1.2	Índice de Conectividade	p. 30
4.1.3	Tempo de Expiração do Enlace	p. 30
4.1.4	Direção de Interceptação	p. 31
4.1.5	Distância de Interceptação	p. 33
4.2	Estudo de Caso	p. 34
4.3	Conclusões do capítulo	p. 36
5	Avaliação de desempenho	p. 38
5.1	Descrição da avaliação	p. 38
5.2	Resultados de QoS e QoE para UAV_1	p. 40
5.3	Resultados de QoS e QoE para UAV_2	p. 42
5.4	Conclusões do capítulo	p. 46
6	Conclusões	p. 47
	Referências	p. 49

Anexo A – Resultados de QoS e QoE para densidades de 36, 44 e 56
VANTs.....

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1 Motivação e desafios

Os avanços das tecnologias de informação e comunicação (TIC), além da miniaturização de componentes eletrônicos, ocorrida nas últimas décadas, e da melhoria dos sistemas de controle, impulsionaram o desenvolvimento de diversas aplicações que utilizam os chamados Veículos Aéreos Não Tripulados VANTs - em inglês *Unmanned Aerial Vehicles* (UAVs). Os VANTs são veículos aéreos inabitados, reutilizáveis e que podem voar de forma autônoma, semiautônoma ou guiados por um piloto em uma estação de controle terrestre. Além disso, eles podem ter asas fixas ou giratórias. Por fim, eles são equipados com diferentes dispositivos, por exemplo, câmeras multimídia com resolução de até 1920x1080 pixels, câmeras térmicas, sensores ou armamentos, sendo que o tipo e a quantidade de dispositivos dependem da missão designada aos VANTs.

Os cenários de aplicações para os VANTs são divididos em aplicações militares e civis. As aplicações militares envolvem o reconhecimento, vigilância, acompanhamento de inimigos e tropas. Por outro lado, as aplicações civis incluem tarefas como melhores práticas agrícolas, vigilância policial, controle de poluição, monitoramento ambiental, inspeção de linhas elétricas, vigilância por vídeo, filmagem de obra cinematográfica, transporte de cargas leves, inspeção de desastres naturais, busca e resgate ou detecção de minas [1].

Em comparação aos veículos tripulados, os VANTs têm a possibilidade de ser utilizados em situações de alto risco, sem comprometer a vida humana. Além disso, eles podem ser usados em áreas inacessíveis, tais como: florestas densas, planícies de inundação, zonas montanhosas e desérticas, zonas com ocorrência de terremotos, bem como em zonas com ocorrências de cenas de acidentes [2]. Por fim, eles têm a habilidade de capturar imagens e vídeos em tempo real que são enviados a uma estação de controle.

Há uma grande variedade de modelos disponíveis, que vão desde kits de baixo custo para automontagem até soluções profissionais. Entre esses modelos, estão o HALE (*High Altitude Long Endurance*), o MALE (*Medium Altitude Long Endurance*), o Micro/Mini e o VTOL (*Vertical Take-Off and Landing*). Este último é o que apresenta o maior crescimento de utilização em cenários civis. Isso porque ele tem melhor custo-benefício, além de ser fácil de transportar e de implantar. Por fim, os VTOLs, como os quadricópteros, têm a habilidade de pousar sobre um ponto de interesse.

Com o tempo, as aplicações passaram a requisitar o uso de sistemas ágeis e de baixo custo, além da cooperação entre os elementos, a fim de melhorar a eficiência da missão. Por consequência, esses requisitos influenciaram no desenvolvimento de uma forma especial de MANET (*Mobile ad-hoc networking*), denominada de redes VANTs. As redes VANTs são compostas por dispositivos de pequeno porte, como os quadricópteros, e o seu emprego tem potencializado o uso de aplicações multimídia. Isso porque um VANT pode operar em regiões hostis ou de difícil acesso, em diferentes altitudes ou velocidades. Por fim, os VANTs possuem elevado grau de liberdade de mobilidade e versatilidade, isto é, podem ser empregados em diferentes ambientes.

Contudo, o grau de mobilidade dos quadricópteros ocasiona diversas quebras de enlace de comunicação, prejudicando o encaminhamento dos dados e levando a muitas perdas ou atraso de pacotes transmitidos [3]. Além disso, a variação da altura dos dispositivos no ambiente pode influenciar no desempenho da rede. Portanto, um dos desafios das redes VANTs é a mitigação da influência do impacto da mobilidade durante a transmissão de dados multimídia, de modo a auxiliar no gerenciamento da conectividade entre os VANTs e, assim, evitar falhas de comunicação. A manutenção da conectividade ajuda a reduzir os atrasos e as perdas de pacotes durante a transmissão, proporcionando certo nível de robustez, bem como a disseminação de vídeo com qualidade.

O gerenciamento da conectividade em redes VANTs tem sido tratado nas camadas MAC (*Media Access Control*) e de Rede. Na camada MAC, protocolos adaptativos têm buscado garantir a transmissão por meio do uso de antenas [4, 5]. Entretanto, essa solução possui elevado custo e complexidade de *hardware*, devido à necessidade de prover os arranjos de antenas. Na camada de Rede, os protocolos de roteamento focam em encaminhar os dados através de rotas robustas a quebras de conexão por mobilidade, estabelecidas por critérios baseados em informações de posicionamento [6, 7, 8]. Contudo, esses protocolos de roteamento, em geral, desconsideram o comportamento de mobilidade de um VANT em ambientes 3D e assumem mobilidade em ambientes 2D. Finalmente, eles utilizam qualificadores de conectividade 2D para a seleção de rotas mais robustas e confiáveis.

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é propor um mecanismo que auxilia os protocolos de roteamento geográficos no gerenciamento da conectividade em redes VANTs.

Esse auxílio permite mitigar os efeitos da mobilidade presentes em redes formadas por quadricópteros. Desse modo, o mecanismo propõe-se a melhorar a conectividade entre os dispositivos da rede. Por consequência, pode-se ter uma transmissão multimídia mais eficiente, com poucas perdas de pacotes, atrasos e melhores níveis de qualidade do vídeo entregue ao usuário. Em relação aos objetivos específicos, eles compreendem os seguintes tópicos:

- Realizar o levantamento do estado-da-arte sobre as soluções que gerenciam a conectividade em redes VANTs, a fim de fundamentar a pesquisa desenvolvida.
- Desenvolver um mecanismo capaz de realçar a conectividade em redes VANTs e, assim, melhorar a eficiência do protocolo de roteamento geográfico.
- Implementar o mecanismo proposto e adicioná-lo a um protocolo de roteamento geográfico.
- Analisar os benefícios e os ganhos proporcionados pelo mecanismo ao protocolo de roteamento através da avaliação de desempenho utilizando um simulador de eventos discretos.

1.3 Organização do texto

O restante do documento está dividido em 5 capítulos, seguindo o ordenamento descrito abaixo:

- Capítulo 2: Apresenta um estudo sobre os aspectos importantes relacionados aos VANTs e às redes VANTs, como as aplicações, a estrutura, a arquitetura de comunicação e as diferentes categorias de VANTs. Além disso, ele descreve as técnicas de predição de mobilidade. Por fim, apresenta os desafios na transmissão em redes VANTs.
- Capítulo 3: Apresenta as soluções existentes para o gerenciamento da conectividade em redes VANTs. Serão descritas as principais vantagens e desvantagens para todas as soluções apresentadas no capítulo.
- Capítulo 4: Detalha a proposta do trabalho, sua arquitetura e os módulos que a compõem. Além disso, apresenta um estudo de caso em um protocolo de roteamento geográfico.
- Capítulo 5: Apresenta o ambiente de simulação, os cenários e a avaliação do desempenho da proposta.
- Capítulo 6: Descreve as considerações finais deste trabalho, bem como as próximas atividades a serem realizadas.

CAPÍTULO 2

Referencial Teórico

Neste capítulo, será apresentada uma visão geral sobre as redes VANTs quanto às características da rede e os benefícios fornecidos pelo seu uso. Além disso, serão apresentadas as aplicações que se beneficiam do uso desse tipo de rede. Por fim, serão discutidas as arquiteturas de comunicação e as configurações de comunicação entre os elementos que compõem a rede.

No restante do capítulo serão apresentadas as classificações dos VANTs e os modelos existentes em cada categoria. Em seguida, serão detalhados os padrões de mobilidade que representam o comportamento de movimentação dos VANTs. Ademais, serão apresentados os métodos de predição de mobilidade existentes na literatura, bem como os desafios da transmissão em redes VANTs. Serão descritas, ainda as métricas QoS e QoE para avaliação do desempenho da proposta deste trabalho.

2.1 Redes VANTs

O progresso da microeletrônica, das tecnologias de sensores, sistemas de controle e comunicação, tem impulsionado o desenvolvimento dos Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) [9]. Estes veículos são quaisquer dispositivos aéreos que dispensam a presença de um piloto para serem guiados. Além disso, as asas dos VANTs podem ser fixas ou giratórias. Por fim, o VANT pode ser equipado com diferentes dispositivos, por exemplo, câmeras multimídia com resolução de até 1920x1080 pixels, câmeras térmicas, sensores ou armamentos, como ilustrado pela Figura 1.

O desenvolvimento dos VANTs foi motivado para suprir algumas necessidades militares. Um dos primeiros relatos de VANTs ocorreu durante a Primeira Guerra Mundial, quando a Marinha Norte Americana contratou Elmer Ambrose Sperry, o inventor do giroscópio, para desenvolver uma frota de "torpedos aéreos", biplanos não tripulados que

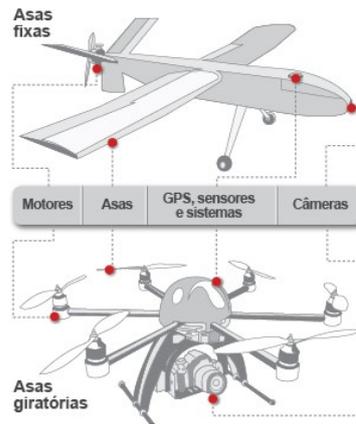


Figura 1: Configurações dos VANTs [10]

eram lançados por uma catapulta [11]. Assim, tornou-se possível a realização de ataques remotos sobre as posições inimigas. No entanto, o uso dos VANTs vem ganhando espaço em aplicações civis, nas quais os casos de uso incluem, mas não se restringem, as comunicações de emergência e o sensoriamento ambiental, em áreas de pós-desastre. Ademais, o uso do VANT pode ser útil em situações que requerem um reconhecimento automático e confiável de áreas potencialmente contaminadas. Com isso, reduz-se, de forma eficaz, os riscos de envio de socorristas com dispositivos de medição local [12]. Por fim, eles também podem desempenhar outras funções, como [13]:

- **Vigilância e Exploração:** Usando câmeras com diferentes espectros, bem como sistemas de radar, que permitem a exploração e vigilância de grandes áreas e de todos os tipos de objetos ou seres vivos.
- **Transporte:** Dependendo do seu tamanho e forma, o VANT pode transportar diferentes quantidades e/ou tipos de cargas.
- **Busca e Salvamento:** VANTs com câmeras conectadas e outras ferramentas de medição, muitas vezes são utilizados em missões de busca e salvamento, devido à capacidade de cobrir áreas de difícil acesso.
- **Pesquisa científica:** Os VANTs estão envolvidos em uma grande variedade de projetos de pesquisa que abrangem desde inteligência artificial até visão computacional.
- **Ataques armados:** Cada vez mais, os VANTs são usados pelos militares, para ataques armados em áreas críticas.

Em relação à comunicação, um VANT é capaz de se comunicar com uma estação de controle, como uma central de controle terrestre (CCT), uma estação HAP (*High Altitude Platforms*) [14] ou um navio de guerra. Essa comunicação pode ser por meio de uma infraestrutura de comunicação sem fio terrestre, utilizando as tecnologias IEEE 802.11 a/b/g/n, 802.16 ou 802.15.4, ou pela comunicação via satélite. Além disso, a comunicação permite o envio dos dados coletados do ambiente, como dados escalares ou

fluxos de vídeos, bem como algumas informações sobre o estado do VANT, como a posição, a velocidade, a direção, a quantidade de combustível ou a carga da bateria e temperatura dos componentes.

Existem, basicamente, quatro arquiteturas de comunicações que podem ser usadas em aplicações com VANTs: *link* direto, satélite, celular e rede em malha [15]. O *link* direto (Figura 2a) é a arquitetura mais simples entre as listadas. Nela, cada um dos VANTs comunica-se diretamente com uma estação de controle, por meio de um enlace dedicado. Dessa forma, é possível ter uma entrega confiável de dados e com baixa latência. Entretanto, essa arquitetura não se adéqua a ambientes dinâmicos. Além disso, elementos, no ambiente, podem bloquear o sinal e, em maiores distâncias, a comunicação pode exigir o uso de um transmissor de alta potência, de uma antena ajustável ou de largura de banda suficiente. Por fim, a comunicação entre os VANTs ocorre de forma centralizada por meio da topologia em estrela. De tal modo, ela é ineficiente e não explora a comunicação direta entre os VANTs operando na mesma área.

A arquitetura por satélite (Figura 2b) proporciona melhores coberturas em relação ao *link* direto. Dessa forma, ela oferece maior conectividade entre os VANTs. Entretanto, essa conectividade é fornecida pelo roteamento dos dados através de um sistema centralizado. Isso porque o satélite é o responsável pela comunicação entre os VANTs da rede. Logo, essa comunicação oferece baixa entrega dos dados. Ademais, a largura de banda oferecida pelos satélites não tem acompanhado o crescimento do uso dos VANTs. Em seguida, o uso do satélite pode ocasionar altos atrasos quando há vários VANTs operando na mesma área. Finalmente, a comunicação entre o satélite e a estação de controle pode ser dificultada devido a obstruções.

A arquitetura celular (Figura 2c) refere-se a uma infraestrutura semelhante a de telefonia móvel. Essa arquitetura apresenta algumas vantagens que podem proporcionar uma confiável entrega de dados, além de bons níveis de conectividade. A primeira vantagem está relacionada à extensão da cobertura em áreas de grandes dimensões, por meio do uso de múltiplas estações base. Afora isso, as várias estações base fornecem uma redundância de *link*. Dessa forma, um *link* ruim não dificulta a entrega dos dados. Em seguida, há a melhor distribuição da largura de banda e ela pode ser reutilizada ou reajustada ante a necessidade da demanda. Por fim, diferentes VANTs podem utilizar a infraestrutura, porém, a arquitetura celular tem um alto custo de implantação, porque os dispositivos que a compõem, como a torre, o site e o equipamento de rádio são muito custosos.

A rede em malha ou redes *mesh* (Figura 2d) é a última das arquiteturas de comunicação. Ela é uma arquitetura descentralizada que consiste de vários VANTs com a mesma funcionalidade e responsabilidade no que diz respeito à topologia da rede. Com isso, cada VANT pode atuar como um nó retransmissor, a fim de encaminhar os dados até o destino. Desse modo, a abordagem descentralizada oferece uma rede mais flexível e dinâmica. Além disso, ela permite a configuração de redes de baixo custo, confiáveis e redundantes, mesmo em regiões de difícil acesso. Logo, essa arquitetura é promissora para aplicações com VANTs, em que a infraestrutura não é disponível e há a necessidade dos vários VANTs operarem de forma cooperativa.

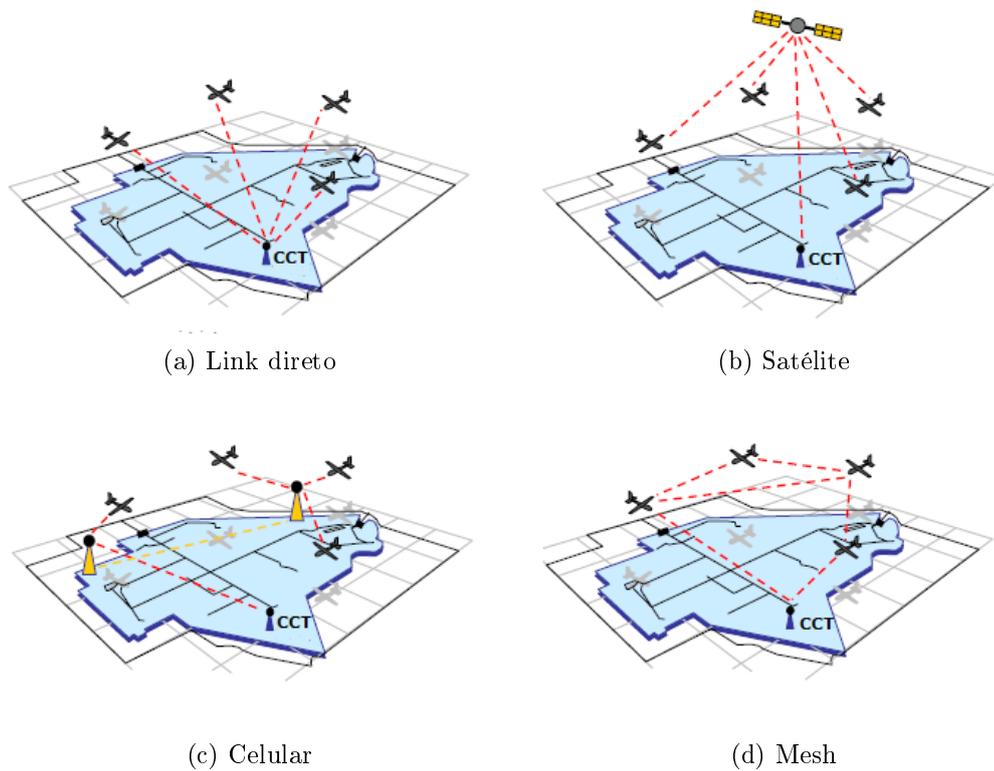


Figura 2: Arquiteturas de comunicação das redes VANTs [15]

A MANET (*Mobile ad-hoc networking*) é uma rede sem fio dinâmica que combina a topologia em malha da rede *mesh* com nós altamente móveis e independentes. Nela, cada nó pode se comunicar diretamente com algum outro nó que esteja dentro do alcance de transmissão. Além disso, a comunicação além desse alcance é feita por meio de nós intermediários, que retransmitem os pacotes salto a salto até um destino. Por fim, os nós, geralmente, são pequenos e possuem limitações de processamento e capacidade de energia.

Com o tempo, as aplicações passaram a requisitar o uso de sistemas ágeis e de baixo custo, além da cooperação entre os elementos, a fim de melhorar a eficiência da missão. Por consequência, esses requisitos influenciaram no desenvolvimento de uma forma especial de MANET, denominada de redes VANTs. Essas redes são compostas por dispositivos de pequeno porte que apresentam limitações quanto à capacidade de carga (*payload*), autonomia, tamanho e capacidade de comunicação. Desse modo, as redes VANTs podem proporcionar algumas vantagens, como [16]:

- **Custo:** Um VANT de grande porte possui um custo de aquisição e manutenção mais elevado em relação a um VANT de pequeno porte [17].
- **Escalabilidade:** Um conjunto de VANTs pode facilmente estender a área de operação da missão devido à facilidade na adição de novos dispositivos.
- **Capacidade de sobrevivência:** Se o VANT falhar em uma missão composta por apenas um dispositivo, ela é interrompida. Entretanto, nas redes VANTs, a

ocorrência deste evento não interrompe a missão, pois os demais VANTs podem ser utilizados.

- **Agilidade:** Algumas missões, tais como reconhecimento, vigilância, busca e salvamento, podem ser realizadas mais rapidamente, à medida que se aumenta o número de VANTs [18].

Nas redes VANTs, os dispositivos se movem ao redor do ambiente e utilizam os demais VANTs para encaminhar os dados coletados, ou algumas informações sobre o estado atual de cada dispositivo, a uma estação de controle, como o CCT. O uso do CCT permite as interações humanas com os VANTs, no ar. Essas interações estão relacionadas ao tratamento dos dados recebidos ou ao monitoramento e ao controle dos VANTs. Além disso, o CCT pode ser fixo, como uma central de operações emergenciais, ou móvel, por meio de um veículo adequado.

Uma alternativa ao CCT é utilizar as estações HAPs como estações aéreas ou como *gateways*. As HAPs são veículos aéreos (tripulados ou não tripulados) ou um dirigível posicionado na estratosfera. Elas mantêm-se, relativamente, estacionárias em relação ao solo e voam em uma trajetória circular. Além disso, utilizam-se as HAPS em regiões carentes de infraestrutura terrestres, especialmente sobre montanhas, desertos ou oceanos. Com isso, é possível ter uma vasta área de cobertura [19]. Mais especificamente, essa área pode ter até 150 km de extensão, em altitudes superiores a 15.000 m. Por fim, a implantação das HAPs ocorre de forma rápida e com baixo custo. A Figura 3 ilustra um típico cenário com a presença de uma estação HAP.

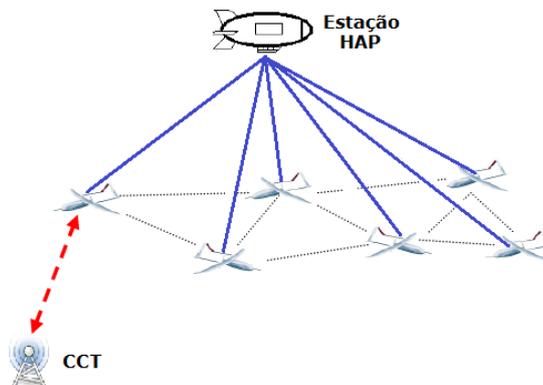


Figura 3: Interação entre a rede VANT e a estação HAP [5]

2.2 Classificação dos VANTs

Um VANT pode ser classificado por uma ampla quantidade de características de desempenho ou estrutural. Aspectos como carga, alcance, peso, velocidade e autonomia são especificações utilizadas para diferenciar os tipos de VANTs. Desse modo, pode-se classificar os VANTs em Micro/Mini, Táticos, Estratégicos e VTOLs (*Vertical Take-off and Landing*). A seguir, cada uma das categorias será descrita e exemplificada.

Os Micro/Mini VANTs estão relacionados às categorias dos dispositivos de pequeno porte, que pesam de 100 g até 30 kg e voam em altitudes entre 150 e 300 m. Os micros VANTs (Figura 4a) são dispositivos utilizados em ambientes urbanos, especialmente dentro de edifícios, devido à facilidade de voo em corredores ou em locais de difícil acesso [20]. Por outro lado, os mini VANTs (Figura 4b) têm ganhado popularidade devido a alguns benefícios, como o melhor custo-benefício, à facilidade de transporte, além da agilidade e facilidade de implantação no ambiente. Ademais, os VANTs dessa categoria são utilizados em cenários militares, por exemplo, em grupos móveis de batalha, ou em aplicações com fins civis, como as de monitoramento urbano.

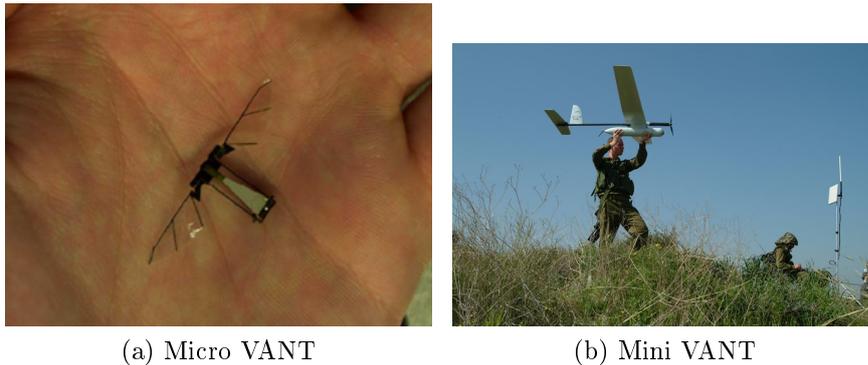


Figura 4: Categoria dos Micro/Mini VANTs [21, 22]

Os VANTs Táticos são dispositivos que podem pesar até 1.500 kg, além de voarem em altitudes entre 5.000-15.000 m. Eles são utilizados, principalmente, como apoio em aplicações militares. Além disso, a comunicação entre o VANT e a estação de controle ocorre por meio de satélites. Por fim, essa categoria tem seis subcategorias [23], como os VANTs MALE (*Medium Altitude Long Endurance*), que são caracterizados por dispositivos com autonomia de voo de 12 a 15 horas e velocidade de até 250 km/h. A Figura 5 mostra um modelo de VANT MALE, chamado MQ-1 Predator [24], sendo que esse modelo foi utilizado em algumas intervenções militares.



Figura 5: Modelo de VANT Tático [25]

Os VANTs Estratégicos, também chamados de VANTs HALE (*High Altitude Long Endurance*), são dispositivos pesados e que apresentam dimensões maiores do que as categorias anteriores. Eles têm uma autonomia de até 30 h e podem alcançar a altitude

máxima de 20.000 km. Por consequência, a comunicação entre o VANT e a estação de controle ocorre por meio de satélites. Assim, essas características garantem o seu uso em aplicações de reconhecimento, vigilância, comunicações, mapeamento terrestre e monitoramento atmosférico. Por fim, eles são constantemente monitorados e operados a partir de bases fixas no solo. A Figura 6 mostra um modelo de VANT HALE, chamado de Global Hawk [26], utilizado pelas forças armadas dos Estados Unidos e pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*).



Figura 6: Modelo de VANT Estratégico [27]

A última categoria compreende os VANTs que são capazes de realizar a decolagem e o pouso de forma vertical. Eles são chamados de VANTs VETOL e também podem ser encontrados nas categorias Mini e Táticos. Essa categoria é responsável pelo crescimento do uso dos Mini VANTs em aplicações civis e comerciais, como vigilância e reconhecimento, ou por centros de pesquisas. Isso ocorre devido à habilidade dos VTOLs em sobrevoar ambientes fechados ou urbanos com baixa altitude. Por fim, o uso de asas giratórias torna esses VANTs menos suscetíveis a turbulências do ar em relação aos VANTs com asas fixas. A Figura 7 ilustra um quadricóptero [28] que é um modelo de VTOL, geralmente utilizado para fins não militares.



Figura 7: Modelo de VTOL [29]

2.3 Modelos de Mobilidade para VANTs

Um modelo de mobilidade (MM) é projetado para descrever o comportamento de movimentação dos nós nas MANETs [30]. Para isso, ele determina as alterações das localizações, velocidades e acelerações dos nós ao longo do tempo. Desse modo, o uso de

um MM elimina a necessidade de avaliar o desempenho da rede por meio de experimentações ou *testbeds*. Isso porque o uso de experimentação é restritivo e custoso. Ademais, ele dificulta a generalização dos resultados da avaliação de desempenho [31]. Portanto, torna-se necessário o uso da simulação em conjunto com MMs realistas para os padrões de movimentação dos nós, a fim de avaliar o desempenho da rede.

Existem dois tipos de modelos de mobilidade para o uso em simuladores de rede: modelos baseados em *traces* e sintéticos. Os modelos baseados em *traces*, como o Lévy Walk (LW) [32] ou o Lévy Flight (LF) [33], representam a mobilidade por meio da observação do sistema no ambiente real. Desse modo, eles fornecem informações de mobilidade mais precisas e realísticas. Entretanto, torna-se difícil a modelagem se os *traces* ainda não foram criados. Portanto, é necessário o uso dos modelos sintéticos, a fim de representar os comportamentos reais dos nós móveis sem o uso dos *traces*.

Em relação aos modelos sintéticos, alguns deles, como o Random Walk (RW), Random Direction (RD) ou Random Waypoint (RWP), foram concebidos para estabelecer um padrão de movimentos realistas dos nós nas MANETs [34]. Neles, a movimentação de um nó ocorre por meio da escolha aleatória de uma direção e velocidade dentro da área de simulação. Ademais, a velocidade e a direção atual do nó são independentes da sua velocidade e da direção anterior. Contudo, tais modelos apenas se adequam na representação da mobilidade de nós terrestres. Isso porque esses nós podem facilmente desacelerar, fazer curvas fechadas ou modificar suas direções de forma ágil. Por outro lado, os nós móveis aéreos, como os VANTs, tendem a manter as mesmas velocidades ao longo de trajetórias contínuas, com poucas variações nas direções.

O desenvolvimento de modelos de mobilidade adequados para os VANTs é, sem dúvida, a base para os projetos de estratégias de redes realistas entre os veículos aéreos. Esses modelos devem ter a capacidade de capturar os atributos de mobilidade exclusivos dos veículos aéreos, como alta mobilidade, restrição mecânica e aerodinâmica, além de considerar os requisitos de segurança, como manter uma distância de segurança entre os dispositivos [35]. Desse modo, foram desenvolvidos alguns modelos de mobilidade, os quais consideram o padrão de mobilidade dos veículos aéreos tanto no plano x,y (Modelos 2D) ou quanto no plano x,y,z (Modelos 3D).

2.3.1 Modelos 2D

Essa categoria é formada por modelos que consideram os veículos aéreos em um plano 2D durante a simulação. Entre os modelos propostos, estão o Semi-Random Circular Movement (SRCM) [36] e o Pheromone Repel model (PR) [37]. O SRCM é um modelo de mobilidade que restringe os VANTs para circularem em torno de um centro fixo com raio variável. Ele é um modelo desenvolvido para cenários em que a localização de um alvo potencial é conhecida. Dessa forma, os VANTs são enviados para coletar informações em áreas próximas ao alvo. Uma aplicação típica para esse modelo é a de busca e salvamento, em que a última localização conhecida da vítima perdida pode servir naturalmente como o centro do círculo.

No SRCM, cada VANT move-se de forma independente sobre um disco 2D com um centro fixo e um raio R . Inicialmente, o VANT parte de um ponto sobre o disco com uma localização polar (r, θ) , onde $0 \leq \theta < 2\pi$, e $r \in \frac{i}{M}R, i \in \{1, 2, \dots, M\}$. Em seguida, ao longo do círculo definido por r , o VANT, então, seleciona uma velocidade v uniformemente distribuída entre $[v_{min}, v_{max}]$ e o destino, com um ângulo de trajetória ϕ uniformemente distribuído entre $[\phi_{min}, \phi_{max}]$. Ao chegar ao destino, o VANT, aleatoriamente, seleciona outra velocidade v e o destino com um ângulo ϕ ao longo do mesmo círculo para o qual ele irá se deslocar. O processo continua até que o VANT complete uma rodada, sendo ilustrado pela Figura 8.

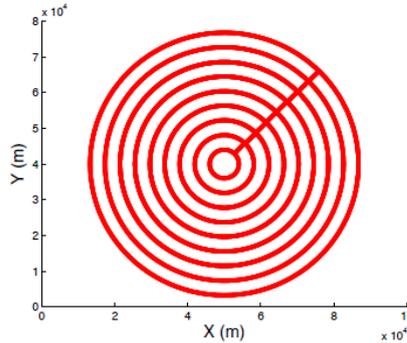


Figura 8: Trajetória do VANT utilizando o SRCM [35]

O PR é um modelo proposto para aplicações de reconhecimento. Nesse modelo, a probabilidade de selecionar os modos de mobilidade é guiada por mapas de feromônios. Em particular, a área em que os VANTs estão dispostos é dividida em pequenas grades. Dessa forma, cada VANT acompanha um mapa de feromônio do campo, marcando o tempo k_i quando o ele visitar a grade i dentro de um intervalo de tempo \bar{k} . Além disso, os VANTs, dentro da área de transmissão, podem trocar seus mapas de feromônio através da transmissão em *broadcast*. Por fim, os mapas trocados produzem uma medição chamada de *pheromone smell* que é responsável por capturar a visão local de cada grade.

O *pheromone smell* de uma grade i em um tempo k é expressado como $p_{si}[k] = I(k_i - (k - \bar{k}))$. Nessa equação, a função $I(x)$ é igual a x quando $x > 0$ e 0 quando $x \leq 0$. Assim, cada VANT determina seu modo de mobilidade de acordo com o *pheromone smell* agregado. Além disso, o *pheromone smell* guia os VANTs para evitarem as regiões recentemente visitadas. A Figura 9 mostra as trajetórias simuladas de alguns VANTs, através do modelo PR.

2.3.2 Modelos 3D

Os modelos dessa categoria são caracterizados pelo uso da altura, representada pela coordenada z , na definição dos comportamentos de mobilidade do veículo aéreo. Entre os referidos modelos, estão o Smooth Turn (ST) 3D [38] e o Gauss-Markov 3D [39]. O ST foi desenvolvido para capturar as tendências de movimentos livres em VANTs, no sentido de tornar as trajetórias suaves, por exemplo, as trajetórias retas ou as curvas

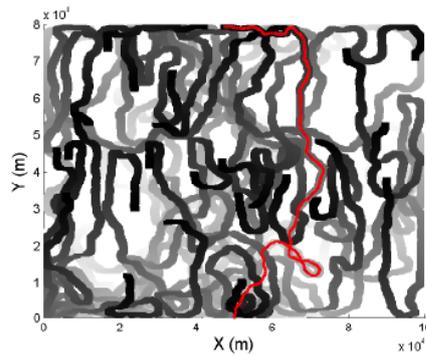


Figura 9: Trajetórias de alguns VANTs utilizando o PR [35]

típicas com grandes raios. Para isso, ele utiliza uma modelagem das acelerações centrípeta e tangencial, bem como segue as leis físicas presentes nos objetos aéreos.

O ST 3D possui dois modelos. O primeiro modelo é denominado de ST 3D z -dependente (Figura 10a). Esse modelo descreve a correlação da movimentação do VANT sobre o plano x,y e a dimensão z , por meio da introdução do plano de manobra, que é determinado pela aceleração tangencial e normal do VANT. A ideia é que o VANT circule ao redor de um centro fixo sobre o plano de manobra. O VANT possui uma velocidade constante com uma duração aleatória antes de ele selecionar um novo centro e velocidade. Finalmente, esse modelo pode ser usado para representar manobras em shows aéreos ou em aplicações militares.

O segundo modelo é denominado de ST 3D z -independente (Figura 10b). Tal modelo assume que o movimento do VANT ao longo da dimensão z é independente do plano x,y . O movimento ao longo da dimensão z pode ser modelado separadamente para refletir os dados de voo reais. Por fim, o ST 3D z -independente pode representar manobras em aplicações civis. Como apresenta a figura, a trajetória do VANT não demonstra dependência do movimento no eixo z em relação ao movimento nos eixos x e y .

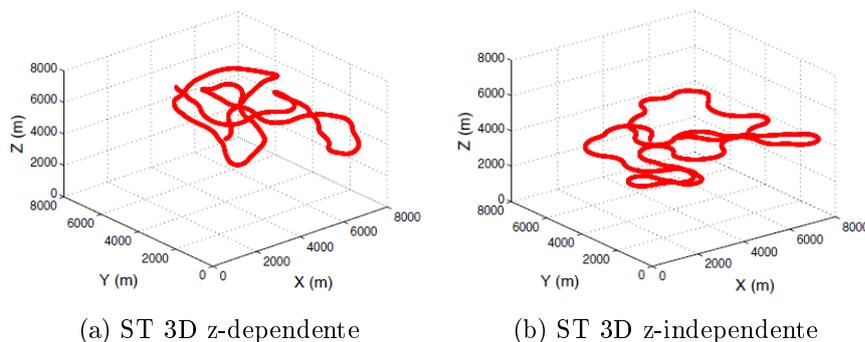


Figura 10: Trajetória do VANT utilizando o ST-3D [35]

O Gauss-Markov 3D (GM-3D) é uma extensão do modelo de mobilidade Gauss-Markov 2D (GM-2D) [40]. No GM-2D, cada nó possui uma velocidade e uma direção inicial, bem como uma média da velocidade e da direção. Em seguida, novas velocidades e

direções são calculadas periodicamente para cada nó. Então, eles seguem a nova trajetória até o próximo período de tempo. Por fim, esse ciclo se repete durante todo o tempo de simulação. A Equação 2.1 é a responsável pelo cálculo das novas direções e velocidades dos nós.

$$\begin{aligned} S_n &= \alpha S_{n-1} + (1 - \alpha)\bar{S} + \sqrt{(1 - \alpha^2)}S_{x_{n-1}} \\ \theta_n &= \alpha\theta_{n-1} + (1 - \alpha)\bar{\theta} + \sqrt{(1 - \alpha^2)}\theta_{x_{n-1}} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Onde, α é o parâmetro que ajusta a variabilidade da movimentação dos nós. Além disso, \bar{s} e $\bar{\theta}$ são os parâmetros que definem as velocidades e as direções médias, respectivamente. Por fim, $S_{x_{n-1}}$ e $\theta_{x_{n-1}}$ são as variáveis aleatórias de uma distribuição gaussiana (normal), que inserem alguma aleatoriedade para as novas velocidades e direções.

Em relação ao GM-3D, ele é um modelo presente no simulador de eventos discretos Network Simulator 3 (NS-3) e tenta representar a movimentação real dos VANTs. Para isso, ele considera os eixos de rotação característicos dos veículos aéreos, como o *roll*, o *pitch* e o *yaw* [41], onde tais eixos podem ser mapeados para as coordenadas x,y e z, respectivamente. A Figura 11 ilustra uma possível trajetória dos VANTs em um ambiente 3D por meio do GM-3D.

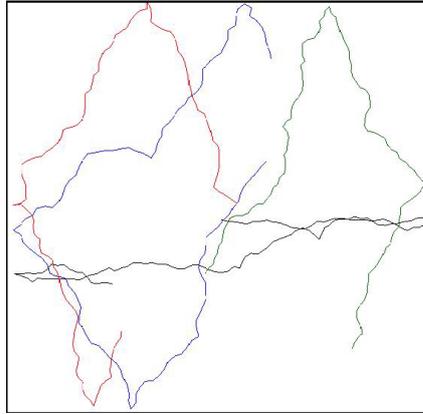


Figura 11: Trajetórias dos VANTs por meio do Gauss-Markov 3D [39]

O GM-3D utiliza as variáveis velocidade e direção obtidas por meio da Equação 2.1. Contudo, ele adiciona uma terceira variável para descrever o eixo vertical *pitch* P . Essa variável é utilizada para monitorar a movimentação vertical de um nó móvel em relação à movimentação horizontal. Então, utiliza-se a Equação 2.2 para a obtenção das variáveis velocidade (S), direção (θ) e *pitch* (P).

$$\begin{aligned} S_n &= \alpha S_{n-1} + (1 - \alpha)\bar{S} + \sqrt{(1 - \alpha^2)}S_{x_{n-1}} \\ \theta_n &= \alpha\theta_{n-1} + (1 - \alpha)\bar{\theta} + \sqrt{(1 - \alpha^2)}\theta_{y_{n-1}} \\ P_n &= \alpha P_{n-1} + (1 - \alpha)\bar{P} + \sqrt{(1 - \alpha^2)}P_{z_{n-1}} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Após o cálculo das variáveis, o algoritmo determina um novo vetor velocidade \bar{v} . Em seguida, ele é enviado ao módulo do NS-3 responsável pela mobilidade dos nós. Por fim, o módulo realiza o cálculo da nova localização do nó no ambiente 3D. Para isso, o modelo utiliza a Equação 2.2 a fim de modelar a velocidade $S_n(t)$, a direção $\theta_n(t)$ e o *pitch* $P_n(t)$ dos veículos aéreos durante a simulação. Assumindo que as variáveis direção e *pitch* são dadas em radianos. Então, obtêm-se o vetor velocidade \bar{v} por meio da Equação 2.3.

$$\begin{aligned} v_x &= S_n \cos(\theta_n) \cos(P_n) \\ v_y &= S_n \sin(\theta_n) \cos(P_n) \\ v_z &= S_n \sin(P_n) \end{aligned} \quad (2.3)$$

No Gauss-Markov 3D, as trajetórias dos veículos aéreos descrevem movimentos em zig zag, com ruídos determinados pelas direções médias ($\bar{\theta}$). Além disso, a aleatoriedade da movimentação é determinada pelo parâmetro α , onde valores próximos de 1 reduzem a correlação da mobilidade através do tempo. Desse modo, valores elevados produzem trajetórias retas com poucas variações. Por outro lado, valores próximos a 0 produzem trajetórias com muitas variações.

É importante ressaltar que o objetivo desse modelo é representar, com precisão, a movimentação 3D dos nós de forma menos complexo. Desse modo, não é necessário modelar alguns parâmetros referentes aos controles de voo presentes nos veículos aéreos, como o leme, os *flaps*, os *ailerons*, o ângulo de inclinação, etc. Assim, o uso do algoritmo de Gauss-Markov é suficiente para a modelagem dos movimentos dos veículos aéreos.

2.4 Métodos de Predição de Mobilidade

As técnicas de predição de mobilidade têm atraído a atenção da comunidade acadêmica devido às vantagens que elas oferecem às redes ad hoc, e que podem ser percebidas em nível de rede e aplicação. Em nível de rede, o uso da predição de mobilidade pode auxiliar nas tarefas de controle de congestionamento, reservas de recursos da rede ou no fornecimento de QoS. Em nível de aplicação, seu uso pode ser combinado com o perfil do usuário, a fim de reforçar alguns serviços baseados em localização, como orientação de rota, informações de trânsito, serviços de turismo, publicidade *on line* [42]. Assim, várias categorias de predição de mobilidade foram propostas, como a predição pelo histórico de movimento, pela topologia física e pela topologia lógica.

2.4.1 Predição de Mobilidade pelo Histórico de Movimentos

A predição de mobilidade pelo histórico de movimentos tem o objetivo de prever a localização futura do nó móvel, por meio de padrões de mobilidade anteriores. Nessa categoria, é comum o uso de diferentes modelos de mobilidade a fim de modelar o comportamento de mobilidade do nó. Considera-se, também o fato de que os movimentos do nó

móvel são aleatórios e regulares. Desse modo, o uso dessa categoria de predição pode garantir melhores níveis de qualidade de serviço devido às tomadas de decisões antecipadas, como a pré-programação de rotas ou alocação de recursos.

O uso de modelos de Markov é um dos meios para prever a próxima localização do nó móvel, baseado no seu comportamento de mobilidade em relação a algum período de tempo e à localização anterior que este nó visitou. Em geral, os métodos que utilizam essa abordagem, como o *Mobility Markov Chain* (MMC) [43], particionam a área pela qual os nós se movimentam em regiões ou células. Cada região particionada corresponde a um estado lógico da cadeia de Markov, tornando possível determinar a probabilidade do nó se juntar ou deixar uma determinada região.

2.4.2 Predição de Mobilidade pela Topologia Física

Em uma situação real, a movimentação de um nó móvel não é completamente aleatória. Geralmente, ele possui uma mobilidade previsível dentro do ambiente, sem muitas variações nas trajetórias e nas velocidades. Dessa forma, é possível prever o estado futuro da topologia da rede. Por consequência, essa predição permite que a reconstrução da rota ocorra de forma eficaz. Isso porque essa reconstrução ocorre antes de uma possível interrupção e sem gerar sobrecarga de pacotes de controle na rede. Por fim, os métodos presentes nessa categoria, como a estimativa do tempo de expiração do enlace, utilizam um *Global Positioning System* (GPS), a fim de obterem as informações exatas sobre a localização e a mobilidade dos nós.

A comunicação sem fio entre dois nós a e b ocorre se, e somente se, a e b estão dentro de um alcance de transmissão r de cada um, com a distância entre eles menor que r . Com isso, o mecanismo de estimativa do tempo de expiração do enlace [44] propõe a indicação do período em que dois nós permanecem conectados dentro dos seus alcances de transmissão. Desse modo, seu uso permite que os protocolos de roteamento reconfigurem as rotas antes de uma possível quebra da conexão. Seja (x_i, y_i) e (x_j, y_j) as posições dos nós i e j , respectivamente. Sejam também v_i e v_j as velocidades, θ_i e θ_j as direções dos nós i e j , respectivamente. Por fim, seja TX o alcance de transmissão. Assim, o montante de tempo T em que dois nós i e j permanecerão conectados é dado pela Equação 2.4.

$$T = \frac{-(ab + cd) + \sqrt{(a^2 + c^2)r^2 - (ad - bc)^2}}{a^2 + c^2} \quad (2.4)$$

Onde:

$$a = v_i \cos \theta_i - v_j \cos \theta_j;$$

$$b = x_i - x_j;$$

$$c = v_i \sin \theta_i - v_j \sin \theta_j;$$

$$d = y_i - y_j.$$

O mecanismo proposto foi aplicado em alguns dos mais populares protocolos de roteamento para redes *ad hoc* [45]. Os resultados das simulações mostraram que esses protocolos obtiveram melhores desempenhos com o uso do mecanismo de predição em comparação aos mesmos sem o uso da predição. Desse modo, mais pacotes de dados foram entregues ao destino, além do uso mais eficiente dos pacotes de controle utilizados na formação das rotas.

2.4.3 Predição de Mobilidade pela Topologia Lógica

Em redes *ad hoc* baseadas em *clusters* os nós móveis se agrupam em *clusters* que são periodicamente formados de forma dinâmica. Além disso, um nó, em cada *cluster*, é eleito como o líder do grupo, sendo chamado de *Cluster-Head* (CH). O CH é responsável pela comunicação dentro do *cluster* e entre os demais *clusters* da rede, bem como na sincronização e na alocação de recursos. Contudo, a mobilidade faz com que os nós transitem entre vários *clusters*, o que influencia no desempenho da rede.

A predição de mobilidade pode auxiliar na formação de clusters mais robustos a mobilidade. O uso de métodos de predição, como a predição baseada na teoria da informação [46], em conjunto com os algoritmos de clusterização melhora a estabilidade dos *clusters* ante as mudanças na topologia. Esses métodos têm a característica de não utilizarem um sistema de localização, como o GPS, para a obtenção das informações de mobilidade dos nós. Para isso, eles utilizam algumas técnicas baseadas no uso da intensidade do sinal, como o uso da atenuação do sinal em comparação com a distância percorrida para estimar as distâncias entre os nós.

O Clustering in Mobile Ad-Hoc Networks through Neighbourhood Stability-Based Mobility Prediction [47] é um exemplo de solução que utiliza a predição de mobilidade para a formação de *clusters* mais robustos a mobilidade. A ideia principal é estimar a mobilidade futura de um nó móvel para a seleção do CH, que apresenta menor mobilidade em comparação aos demais nós móveis na rede. Dessa forma, é possível ter um *backbone* virtual mais estável diante da mobilidade dos nós.

2.5 Desafios da Transmissão em Redes VANTs

A confiabilidade da comunicação é um pré-requisito para o fornecimento de serviços eficazes através de plataformas aéreas. Geralmente, serviços que utilizam dados multimídia, como os de monitoramento ou os de missões críticas, apresentam alta exigência da infraestrutura de comunicação, a fim de terem atendidos os requisitos de alta vazão e baixo atraso. Esses requisitos ocorrem pela necessidade de garantir a entrega do vídeo do ambiente em que os VANTs estão atuando, com um aceitável nível de qualidade. Entretanto, a alta dinâmica das trajetórias dos VANTs dificulta a garantia dos mesmos, o que influencia, conseqüentemente, na qualidade do vídeo sobre a percepção do usuário.

As constantes mudanças na movimentação de cada VANT geram condições desafiadoras para a manutenção da conectividade. Em particular, a movimentação pode influenciar em partições esporádicas da rede. Essas partições podem ser fontes de perturbações, como o aumento do atraso ou da congestão nas filas de transmissão dos VANTs, que pode sofrer com sérias perdas de desempenho, especialmente para dados criticamente importantes. Portanto, alta mobilidade dos VANTs requer um rápido e confiável estabelecimento de rotas sob demanda, a fim de manter o fluxo de informações essenciais.

A transmissão sem fio é outro fator que tem influência na conectividade. Nas redes VANTs, os enlaces sem fio não são muito confiáveis e variam de bons, quando os VANTs estão próximos, a ruins, devido ao afastamento dos mesmos. Além disso, as taxas de erros de pacotes podem ser altas, mesmo no caso em que a conectividade é boa. Por fim, os VANTs podem estar espalhados sobre a área da missão, de modo que a conectividade fim-a-fim torna-se inexistente para a entrega dos dados. A Tabela 2 sumariza algumas características das redes VANTs, bem como as compara com as MANETs e com as redes veiculares (*Veicular Ad Hoc Networks* - VANETs) [48].

Tabela 1: Comparativo entre as MANETs, as VANETs e as redes VANTs

	MANETs	VANETs	Redes VANTs
Mobilidade	Baixa	Alta	Muito alta
Densidade da rede	Baixa	Alta	Muito baixa
Mudança na topologia	Lenta	Rápida	Rápida
Poder computacional	Limitado	Alto	Alto

2.6 Métricas de avaliação de desempenho para protocolos de roteamento em redes VANTs

2.6.1 Métricas de QoS

Segundo a *Request for Comments* (RFC) 2386 [49], QoS é caracterizada como um conjunto de requisitos de serviços a ser atendido pela rede, ao transportar um fluxo de pacotes de uma fonte até seu destino. Nesse cenário, QoS significa atender às expectativas do usuário quanto ao tempo de resposta e à qualidade, ou seja, fornece fidelidade na informação seja áudio e/ou imagem, minimizando a presença de ruídos e eliminando os congelamentos.

A QoS é dependente da aplicação, pois é a aplicação quem vai definir o que ela deseja da rede para que ocorra o seu correto funcionamento e, conseqüentemente, para que as necessidades do usuário sejam atendidas. Para isso, são utilizados alguns parâmetros indicadores de desempenho da rede como atraso, largura de banda disponível, variação do atraso (*jitter*), taxa de entrega ou perda de pacotes. A seguir, serão descritas as métricas de QoS utilizadas por este trabalho.

- **Packet Delivery Ratio (PDR)** - É a razão entre os pacotes da camada de aplicação corretamente recebidos no receptor pelo número total de pacotes enviados pelo emissor. É importante ressaltar que, não necessariamente, todos os pacotes enviados na camada de aplicação serão enviados na camada MAC. Isso pode acontecer se não houver uma rota para o pacote.
- **Average End-to-End Delay (E2E)** É a razão entre a diferença do tempo em que um pacote foi transmitido e sua chegada ao destino, pelo número de pacotes recebidos.

2.6.2 Métricas de QoE

As tradicionais técnicas que visam maximizar o nível de qualidade de aplicações multimídia estão focadas apenas no desempenho da rede ou em métricas de QoS. Porém, os parâmetros de QoS falham na captura de aspectos subjetivos associados com a percepção humana, no controle de rede e nas operações de otimização [50]. Portanto, QoE ajuda a avaliar as aplicações multimídia sob o ponto de vista da percepção do usuário.

As métricas de QoE podem ser classificadas como objetivas ou subjetivas, onde elas têm como retorno um valor quantitativo, que é mapeado para uma faixa de valores qualitativos. Em relação às métricas objetivas, elas possuem como característica a realização da estimativa da qualidade do vídeo recebido pelo usuário, através de modelos matemáticos, tendo seus valores mapeados para valores subjetivos. Já as subjetivas são caracterizadas como métricas que necessitam que o conteúdo multimídia seja analisado por um grupo de pessoas, e os resultados dessa análise são tratados estatisticamente para antecipar as percepções dos usuários.

Várias métricas objetivas, como o *Peak Signal-to-Noise Ratio* (PSNR) [51], o *Mean Square Error* (MSE), o *Structural Similarity Index* (SSIM) [52] e o *Video Quality Measurement Tool* (VQM) [53] foram desenvolvidas com o objetivo de estimar/prever o nível da qualidade de serviços multimídia, de acordo com a percepção do usuário. Entretanto, esse trabalho utilizou apenas a métrica SSIM, por melhorar o desempenho das tradicionais métricas de QoE, como o PSNR e o MSE. Além disso, tanto o PSNR quanto o MSE não se relacionam de forma satisfatória com as percepções subjetivas dos seres humanos. Por fim, as medições dessa métrica foram geradas através da ferramenta de medição da qualidade do vídeo MSU [54].

2.6.2.1 *Structural Similarity Index* - (SSIM)

O SSIM é um método para medir a similaridade entre duas imagens. O índice SSIM pode ser visto como uma medida de qualidade de uma das imagens que estão sendo comparadas, desde que a outra imagem seja a original. Os valores extraídos do *frame* recebido pelo usuário e do *frame* original são armazenados em vetores separados, sendo um vetor para a luminosidade, um para a estrutura e outro para a cor. Após o que, obtêm-

se a média de cada vetor e o indicativo da qualidade do vídeo é gerado pela combinação das três médias. O valor de SSIM é obtido através da Equação 2.5 [52]:

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \quad (2.5)$$

Onde:

μ_x é média de x;

μ_y é a média de y;

σ_x é o desvio padrão de x;

σ_y é o desvio padrão de y;

σ_{xy} é a covariância de y ;

L = O valor máximo que pode ser atribuído a cada pixel;

$k_1 = 0,01$ e $k_2 = 0,03$ por padrão;

$c1 = (k_1L)^2$ e $c2 = (k_2L)^2$ são duas constantes.

O valor de SSIM é representado como um valor decimal entre 0 e 1 e quanto mais próximo de 0, pior é a qualidade do vídeo. Por outro lado, quanto mais próximo de 1, melhor a é qualidade do vídeo. Portanto, no caso em que o valor é igual a 1, o vídeo recebido pelo usuário é equivalente em 100% do vídeo original [55].

2.7 Conclusões do capítulo

Este capítulo tem como objetivo apresentar uma revisão sobre os VANTs e as redes compostas por eles. Além disso, foram apresentadas as vantagens de utilização e as aplicações para as redes VANTs. Em seguida, suas estruturas, componentes e arquitetura de comunicação também recebem atenção. Por fim, deu-se atenção aos padrões de mobilidade para os VANTs, bem como aos desafios enfrentados durante a transmissão em redes VANTs.

As métricas para avaliações de desempenho da rede e da qualidade do vídeo também foram introduzidas. Suas características e relevâncias foram descritas para fornecer o claro entendimento do processo de avaliação de desempenho da proposta deste trabalho. Assim, este capítulo tem fundamental importância, pois o detalhamento de todas as tecnologias e características aqui presentes no trabalho é relevante para tornar claro o entendimento sobre o funcionamento da proposta.

CAPÍTULO 3

Trabalhos Relacionados

Este capítulo tem como objetivo apresentar alguns trabalhos relacionados ao gerenciamento da conectividade em redes VANTs. Ele descreve as principais características e o funcionamento de cada trabalho. Além disso, ele discute sobre as vantagens e deficiências dos trabalhos em relação à manutenção da conectividade.

Divide-se em duas seções. Na Seção 3.1 descrevem-se as soluções que tratam da garantia de conectividade na camada MAC, destacando-se o AMUAV e o LODMAC. Já na Seção 3.2 descrevem-se alguns protocolos de roteamento para redes VANTs, enfatizando o MPRGR, o MPGR e o A-R.

3.1 Soluções na camada MAC

A elevada mobilidade é uma das mais distintivas características das redes VANTs. Por consequência, ela ocasiona novos problemas para a camada MAC. Isso porque a grande variação da distância e a alta mobilidade dos VANTs conduzem a muitas flutuações na qualidade do enlace. Com isso, altas latências de pacotes podem ocorrer e afetar a qualidade dos dados em aplicações de tempo real [16].

3.1.1 Adaptive Medium Access Control Protocol for Unmanned Aerial Vehicle (AMUAV)

O AMUV [4] é um protocolo MAC adaptativo que utiliza antenas omnidirecionais e direcionais para a comunicação. As antenas direcionais são responsáveis pela transmissão dos dados entre os demais VANTs. Por outro lado, as antenas omnidirecionais têm a função de difundir as mensagens de controle RTS (*Request-To-Send*) e CTS (*Clear-To-*

Send) da camada MAC. Além disso, ele utiliza as informações de localização e mobilidade dos VANTs, as quais são armazenadas em uma tabela de alvos contendo o identificador, a longitude, a latitude, a altitude e a direção dos VANTs.

O AMUV assume que cada VANT utiliza quatro antenas. Duas delas são direcionais, sendo que uma está localizada na parte superior do VANT e a outra na parte inferior. Por fim, as demais antenas são omnidirecionais. Dessa forma, se um VANT não tem pacotes a enviar, ele escutará os demais VANTs por meio de uma das antenas omnidirecionais. De outro modo, na presença de pacotes a serem enviados, o VANT realizará a transmissão por meio das antenas direcionais. Ademais, os VANTs têm a capacidade de rotacionar as antenas direcionais ante a mudança de altitude.

O funcionamento do AMUV inicia frente ao recebimento de um pacote da camada superior. Após receber esse pacote, o VANT requisita a posição do destino a fim de direcionar o lóbulo principal na direção correta. Para isso, o VANT envia o pacote de controle do tipo RTS por meio da antena omnidirecional. Tal pacote deve incluir a posição do VANT e a duração da transmissão. Por outro lado, o destino deve responder com um pacote CTS contendo a sua localização e o tempo de transmissão. Além disso, cada VANT que receber o pacote CTS ou RTS deve armazenar as informações contidas nele e atualizar suas tabelas para uso futuro. Finalmente, os pacotes de dados serão enviados por meio da antena direcional.

O uso das antenas direcionais melhora o desempenho da rede. Isso porque elas têm a capacidade de estender o alcance de transmissão, bem como o de aumentar a vazão da rede. As antenas omnidirecionais têm o papel de atuar no processo de descoberta de vizinhos devido à irradiação do sinal em todas as direções. Entretanto, o uso de arranjos de antenas eleva o custo de implantação de uma rede formada por VANTs. Esse custo está relacionado ao uso de hardwares adicionais para possibilitar a comunicação entre os VANTs. A proposta assume que o VANT tem a capacidade de girar e inclinar as antenas direcionais em uma desejada direção para a transmissão. Logo, essa característica não é uma suposição realística.

3.1.2 Location Oriented Directional MAC Protocol (LODMAC)

O LODMAC [5] é um protocolo MAC baseado em localização e que atua em redes VANTs em conjunto com uma estação HAP. Ele adota o uso de três antenas direcionais com distintas utilidades e três transceptores (T_1, T_2, T_3). O primeiro transceptor (T_1) é usado para o processo de descoberta de vizinhos. Ele também é responsável pela comunicação do VANT com a estação HAP. O segundo transceptor (T_2) é utilizado para as questões de controle de comunicação por meio das trocas de mensagens RTS/CTS. Por fim, o último transceptor (T_3) é utilizado para a transmissão dos dados. Todas as antenas são gerenciadas e sincronizadas por meio do protocolo MAC proposto.

O uso de antenas direcionais torna o processo de descoberta de vizinhos por um VANT uma tarefa desafiadora. Para isso, o LODMAC utiliza uma estratégia baseada em

escalonamento do tempo, como mostra a Figura 12. Nessa figura, a estação HAP transmite sua localização para todos os VANTs na topologia, a cada início de período de atualização do GPS (1 seg.). Além disso, o intervalo de transmissão tem a duração de t_l ms. Assim, durante t_l cada VANT tem conhecimento sobre a localização dos demais VANTs na rede. Portanto, durante o restante de tempo t_c ms, os VANTs de forma direcional transmitem suas informações de localização ao HAP. Então, a cada 1 segundo, o protocolo LODMAC garante a determinação e a disseminação das localizações dos vizinhos.

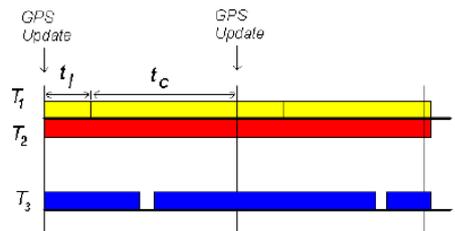


Figura 12: Sequência LODMAC com pares de transceptores [5]

O LODMAC é uma solução que trata dos problemas de terminal oculto, surdez e bloqueio HOL (*Head-Of-Line*). O uso de uma estação HAP também reduz a latência na entrega de pacotes, a perda pela propagação e aumenta a taxa de entrega de pacotes. O LODMAC aumenta a utilização da rede e fornece a localização exata de todos os vizinhos de um VANT. Entretanto, assim como a solução proposta anterior, o uso de arranjos de antenas eleva o custo de implantação da rede. Além disso, a proposta é totalmente dependente do uso da estação HAP e não avalia uma situação em que a HAP não está ao alcance dos demais VANTs.

3.2 Soluções na Camada de Rede

O roteamento é uma das questões mais desafiadoras nas redes VANTs, porque as soluções de roteamento existentes para MANETs não satisfazem todos os requisitos das redes VANTs. Por outro lado, algumas soluções de roteamento existentes para as redes VANTs adotam a predição de mobilidade para garantir a transmissão dos dados através de rotas mais estáveis à mobilidade. Por fim, outras soluções para redes VANTs tentam garantir a conectividade através do tempo estimado para um VANT alcançar o destino.

3.2.1 Mobility Prediction Reactive-Greedy-Reactive (MPRGR)

O MPRGR [6] é um protocolo de roteamento que combina as características de um protocolo reativo, como o protocolo AODV (Ad-hoc On Demand Distance Vector Routing) [56], com um encaminhamento geográfico. No MPRGR, na ausência de rota válida para encaminhar os pacotes, o nó fonte inicia o processo de descoberta de rota em direção ao nó destino, semelhante ao protocolo AODV. Para isso, o nó fonte inunda a rede com pacotes de requisição de rota RREQ (*Route Request*). O processo finaliza-se quando

o nó fonte receber um pacote de resposta de rota RREP (*Route Reply*) enviado pelo nó destino. Assim, a rota é estabelecida e o nó fonte inicia a transmissão dos pacotes.

No processo de manutenção da rota, o *link* será considerado interrompido se um nó intermediário não receber três pacotes consecutivos de *hello* do seu nó próximo salto. Desse modo, o dado será encaminhado por meio do mecanismo GGF (*Greedy Geographic Forwarding*). No modo GGF, o protocolo enviará os pacotes de dados ao nó vizinho mais próximo ao nó destino. Um pacote de erro de rota RRER (*Route Error*) será enviado ao nó precursor e encaminhado até o nó fonte, que poderá iniciar um novo processo de descoberta de rotas para, estabelecer uma nova rota ao nó destino.

A interrupção da rota faz com que o nó intermediário não tenha o conhecimento imediato sobre o estado atual da rota. Dessa forma, ele tem que aguardar os três pacotes de *hello* antes de tomar alguma decisão. Durante esse período, o nó intermediário assume que a rota ainda é válida e mantém a transmissão dos pacotes de dados pela rota inativa. Logo, os pacotes de dados que chegarem ao ponto de interrupção da rota serão perdidos.

Para resolver esse problema, o MPGRG utiliza um mecanismo de predição de mobilidade, que estima a futura localização do nó próximo salto. Com isso, é possível computar a distância entre o nó atual e o seu nó próximo salto, antes do encaminhamento dos pacotes de dados. Assim, o nó atual pode, imediatamente, invalidar a rota antes de o nó próximo salto sair do seu alcance de transmissão. Além disso, o protocolo usa o modo GGF para proteger os pacotes de dados que seriam descartados em uma situação padrão.

O MPRGR melhora a taxa de entrega de pacotes, bem como proporciona baixa sobrecarga de pacotes e atraso fim-a-fim. Entretanto, a proposta é avaliada sobre um modelo de mobilidade que não representa o comportamento real dos VANTs. Além disso, a descoberta de rotas de forma reativa, em conjunto com a verificação da menor distância ao destino pelo GGF, é uma abordagem ineficiente em um cenário com alta mobilidade e suscetível a diversas quebras da conexão, como no caso das redes VANTs. Por fim, o trabalho não especifica qual tipo de VANT melhor se adéqua ao protocolo proposto.

3.2.2 Mobility Prediction based Geographic Routing (MPGR)

O MPGR [7] é um protocolo geográfico para redes VANTs que atuam em cenários de batalhas, e tem o seu funcionamento baseado no protocolo GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing) [57]. O MPGR utiliza um método de predição de mobilidade, baseado na função de distribuição gaussiana, para reduzir os impactos da mobilidade dos VANTs. Finalmente, ele propõe uma alteração do modo perímetro do GPSR para reduzir as influências das zonas vazias ocasionadas pela ocorrência do mínimo local.

O encaminhamento dos dados pelos nós, através do GPSR, depende da posição dos seus vizinhos e do destino. Para isso, os nós, periodicamente, enviam pacotes informando seu posicionamento. Entretanto, durante o encaminhamento dos dados, um nó intermediário pode se mover para fora do alcance de transmissão do nó que compõe a rota. Assim, os pacotes podem ser perdidos devido à interrupção da conectividade. Dessa

maneira, o MPRG utiliza a predição de posicionamento para estimar a distribuição das posições dos VANTs em um tempo t_n , de acordo com suas características de mobilidade e as posições em t_{n-1} .

O posicionamento estimado permite analisar a persistência da conexão. Desse modo, pode-se realizar a seleção do nó próximo salto de forma mais precisa. Para isso, o MPRG propõe um critério de seleção que utiliza o posicionamento estimado e a velocidade do nó atual e seu vizinho. Ele utiliza, também, a distância e o tempo de persistência da conexão entre pares de nós. Esse critério é denominado de RNH (*Reliable Next Hop*). O nó seleciona seu nó próximo salto o que possuir o menor valor de RNH entre os demais nós presentes na tabela de vizinhos.

O MPRG proporciona melhor entrega de pacotes e baixo atraso fim-a-fim durante a transmissão dos dados. Entretanto, o critério de seleção proposto utiliza a distância entre os VANTs. O uso da distância não é uma abordagem adequada uma vez que ela se torna imprecisa ante a alta mobilidade dos VANTs. Ademais, a proposta não utiliza a estimativa do tempo de expiração do enlace como forma de verificar a persistência da conexão entre os VANTs.

3.2.3 Topology Aware Routing Based on ADS-B System (A-R)

O A-R [8] é um protocolo de roteamento geográfico que utiliza as informações de localização e mobilidade dos veículos aéreos, através de um dispositivo ADS-B (*Automatic Dependent Surveillance-Broadcast*) [58]. As informações fornecidas pelo ADS-B são utilizadas para estabelecer a tabela de vizinhos e para a seleção do nó próximo salto. Seu uso implica na redução da sobrecarga de pacotes pela eliminação da troca de pacotes de posicionamento pelos nós na rede. Por fim, o A-R utiliza o GPSR como protocolo base.

O processo de seleção do nó próximo salto ocorre de maneira semelhante ao GPSR. Entretanto, o A-R considera a alta mobilidade dos veículos aéreos durante esse processo. Para isso, ele utiliza um critério de seleção denominado de IFT (*Instantaneous Flight Time*), que utiliza as informações de localização e mobilidade fornecidas pelas mensagens do ADS-B. Dessa forma, um nó fonte calcula o IFT dos seus vizinhos para verificar qual deles é o mais rápido a chegar ao destino.

O uso do IFT pelo A-R está relacionado à escolha do nó vizinho que maximiza o encaminhamento dos pacotes em direção ao destino. O A-R propõe-se a melhorar o desempenho da rede por considerar a velocidade dos veículos aéreos. Assim, o A-R considera o estado da mobilidade de todos os vizinhos, escolhendo, a qualquer momento, o nó próximo salto com o menor tempo em direção ao destino.

O protocolo de roteamento A-R reduz a sobrecarga de pacotes, mesmo quando a rede apresenta alta densidade. Além disso, o uso do IFT como critério de seleção do nó próximo salto melhora a entrega de pacotes. Entretanto, o IFT apenas verifica a persistência da conexão pela velocidade e distância entre o nó e seu vizinho, e não considera a direção do nó e a estimativa do tempo de expiração do enlace.

3.3 Conclusões do capítulo

Este capítulo teve como ênfase detalhar o funcionamento dos trabalhos relacionados que atuam nas camadas MAC e de rede, e que tratam do gerenciamento da conectividade em redes VANTs. Segundo o Capítulo 2, a mobilidade é o desafio mais relevante nas redes VANTs. Dessa forma, foram desenvolvidas soluções nas camadas MAC e de Rede para a mitigação da influência da mobilidade. Na camada MAC, as soluções se baseiam no uso de arranjos de antenas integradas ao VANT, a fim de dar suporte à conectividade entre os VANTs da rede. Entretanto, como está descrito neste capítulo, essas soluções apresentam deficiências quanto à adição de custo na implantação da rede.

As soluções propostas na camada de Rede utilizam critérios de formação de rotas baseados no posicionamento dos VANTs. Entretanto, elas não foram propostas para redes formadas por VANTs VETOL, como os quadricópteros. Segundo a Seção 2.2, os VANTs dessa categoria se adaptam mais a aplicações civis devido a acessibilidade e facilidade de uso. Logo, observa-se a importância deles nas Redes VANTs. Em seguida, essas soluções falham por não considerarem a mobilidade dos VANTs em ambientes 3D. Esse aspecto é relevante, uma vez que a conectividade em redes 3D é mais desafiadora que nas 2D. Por fim, as soluções propostas não consideram a transmissão de dados multimídia na rede. Desse modo, elas descartam a importância desse tipo de dado para as aplicações civis, principalmente as de monitoramento urbano ou ambiental. A Tabela 2 sintetiza outras características das propostas descritas.

Tabela 2: Principais características das soluções nas camadas MAC e de Rede

Protocolos	Tipo de VANT	Baseado em localização	Mobilidade 3D	Escalabilidade	Robustez
AMUV [4]	Mini	✓	✓	Limitada	Fraca
LODMAC [5]	MALE	✓	✓	Limitada	Fraca
MPRGR [6]	Mini/MALE	✓		Limitada	Boa
MPGR [7]	MALE	✓		Boa	Fraca
A-R [8]	MALE	✓	✓	Boa	Fraca

As descrições anteriores indicam a necessidade de uma solução que não agregue custos na implantação, bem como gerencie e melhore a conectividade entre os dispositivos da rede. Para isso, ela deve ser direcionada a redes compostas por quadricópteros. Com isso, adequa-se a solução ao contexto das aplicações civis. Além disso, é importante que a solução considere os comportamentos de mobilidade dos quadricópteros em ambientes 3D. Desse modo, podem-se utilizar critérios de seleção de rotas mais realísticos para o encaminhamento dos dados. Por consequência, encaminham-se os dados por rotas mais robustas e confiáveis. Por fim, a solução deve considerar a importância dos dados multimídia para as aplicações às quais a rede dá suporte.

CAPÍTULO 4

Mecanismo para Realçar a Conectividade em VANTs

Conforme foi descrito no Capítulo 2, o uso das redes compostas por VANTs de pequeno porte, como os quadricópteros, proporciona vantagens às aplicações em cenários militares ou civis. Essas vantagens estão relacionadas ao custo de implantação, à abrangência de cobertura no ambiente, à escalabilidade e à robustez da rede, além da agilidade. Tais características são importantes para aplicações multimídia em cenários civis, como o monitoramento ambiental ou urbano.

No Capítulo 3, apresentaram-se algumas soluções que atuam nas camadas MAC e de rede para o gerenciamento da conectividade em redes VANTs. Entretanto, foi descrito que elas possuem deficiências quanto ao custo de implantação ou por não considerarem o comportamento de mobilidade dos VANTs em ambientes 3D. Assim, elas não oferecem uma mitigação das influências da mobilidade de forma eficiente durante a transmissão de dados multimídia. Com base nessas informações, esta seção descreve o mecanismo RCRV para realçar a conectividade entre VANTs na transmissão multimídia, em protocolos de roteamento geográficos para redes VANTs.

O RCRV é um mecanismo que considera informações sobre a mobilidade, como a localização, a velocidade e o tempo, para calcular, tanto a predição de posicionamento, quanto o índice de conectividade. Além disso, o uso de um serviço de localização, como o GPS, fornece ao RCRV informações sobre o posicionamento do VANT que realiza o processo de seleção de rota. Por fim, vale ressaltar que a maioria dos protocolos de roteamento geográficos armazena as informações de mobilidade dos nós nas tabelas de vizinhos. Portanto, o RCRV é um mecanismo independente de protocolo de roteamento. As próximas seções descreverão a arquitetura do RCRV e seus módulos, bem como sua integração com os protocolos de roteamento geográficos.

4.1 Arquitetura

A Figura 13 mostra a arquitetura do RCRV e a sua interação com um determinado protocolo de roteamento geográfico. O RCRV é composto por dois módulos: Predição de Posicionamento e Classificador de Rota. O módulo de predição de posicionamento possui duas funcionalidades. A primeira está relacionada ao monitoramento da variação da distância entre um nó atual e o nó selecionado para enviar os seus pacotes. Por fim, ele fornece ao módulo classificador de rota o posicionamento mais atual dos nós presentes em uma tabela de vizinhos de um nó.

O módulo classificador de rota é responsável por calcular um índice de conectividade (IC) com base nos critérios de tempo de expiração do enlace, direção e distância de interceptação para cada nó vizinho. O valor de IC pode ser aplicado pelas estratégias de encaminhamento presentes nos protocolos de roteamento, a fim de decidir qual o melhor nó, ou seja, o próximo salto a encaminhar pacotes em direção ao destino.

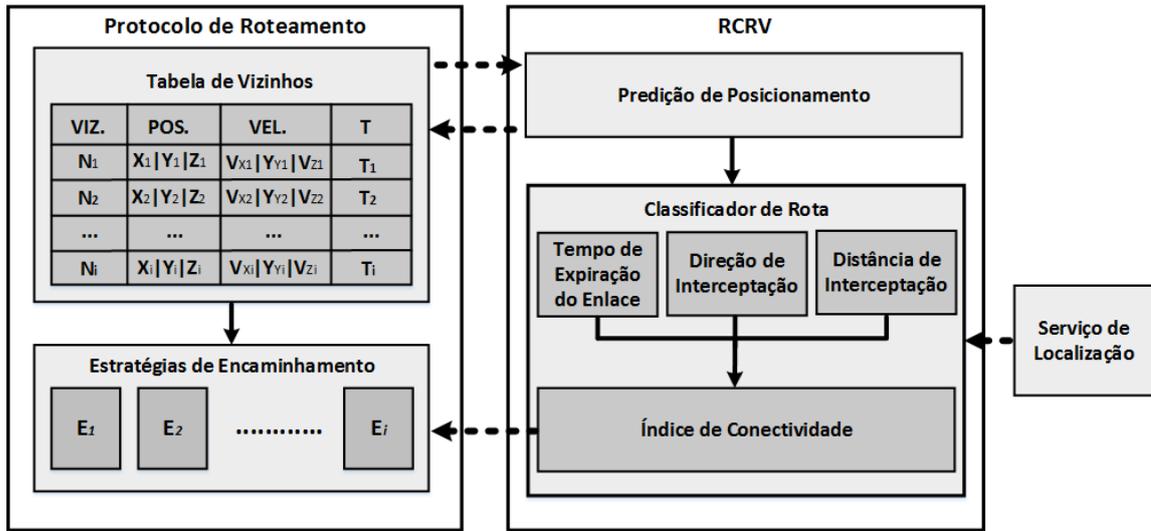


Figura 13: RCRV e sua interação com um protocolo de roteamento

4.1.1 Predição de Mobilidade

O módulo de predição de posicionamento utiliza um esquema simples de predição baseado na física da movimentação de um objeto para estimar a atual localização de um nó n_j . Essa estimativa ocorre por meio de informações de coordenadas no plano 3D (x'_j, y'_j, z'_j) , da velocidade (v_j) e do tempo (t) de n_j . Portanto, o posicionamento estimado $(x_{pred}, y_{pred}, z_{pred})$ de n_j é calculado de acordo com a Equação 4.1.

$$\begin{aligned}
 x_{pred} &= x'_j + \Delta t(v_j \sin \theta_j \times \cos \phi_j) \\
 y_{pred} &= y'_j + \Delta t(v_j \sin \theta_j \times \sin \phi_j) \\
 z_{pred} &= z'_j + \Delta t(v_j \cos \theta_j)
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Onde, Δt é a diferença entre o tempo atual t_c e o tempo do último pacote de posição para cada nó vizinho n_j , ou seja, $\Delta t = t_c - t_l$. Por outro lado, θ_j e ϕ_j representam as direções de deslocamento de n_j . Em redes VANTs, existe a possibilidade de um nó n_j sair da área de transmissão de outro nó n_i . Neste caso, o nó n_i utiliza o posicionamento estimado de n_j para monitorar a distância entre eles durante a transmissão multimídia. Dessa forma, o RCRV possibilita que o protocolo realize uma nova seleção de um nó próximo salto antes da quebra de enlace. Para isso, o módulo de Predição de Posicionamento utiliza o Algoritmo 1 a fim de monitorar a distância entre pares de nós, por meio do posicionamento estimado pela Equação 4.1.

Algoritmo 1 Monitoramento de interrupção da conectividade

Entrada: Posicionamento estimado $(x_{pred}, y_{pred}, z_{pred})$, posicionamento do nó corrente $(x_{cor}, y_{cor}, z_{cor})$ e raio R

Saída: Valor booleano

Calcular distância = $\sqrt{(x_{pred} - x_{cor})^2 + (y_{pred} - y_{cor})^2 + (z_{pred} - z_{cor})^2}$;

if distância > R **then**

 | **retorna** Verdadeiro;

else

 | **retorna** Falso;

end

A Figura 14 ilustra a ocorrência de uma quebra de enlace entre os nós N_i e N_j . Como pode ser observado, no tempo T , a comunicação entre os nós ocorre de forma normal. Isso porque o nó N_j permanece dentro da área de transmissão do nó N_i que é limitada pelo raio (R). Entretanto, em $T + 1$, essa comunicação é interrompida, pois a mobilidade de N_j faz com que ele saia da área de transmissão de N_i . Por consequência, os pacotes encaminhados ao nó N_j serão descartados até o momento em que o nó N_j realizar uma nova seleção de nó próximo salto.

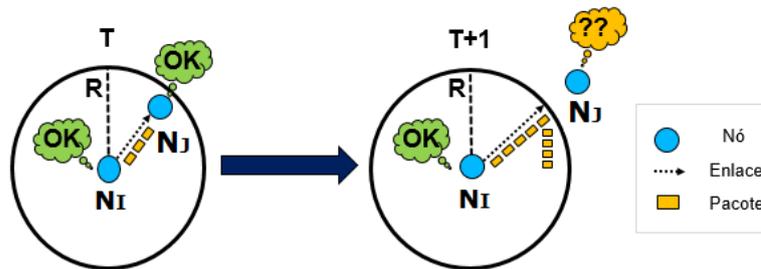


Figura 14: Interrupção da conectividade entre dois nós

Em roteamento geográfico, a decisão de encaminhamento em cada nó é baseada nas localizações dos nós vizinhos e na localização do destino. Logo, essas informações precisam ser armazenadas localmente em tabelas presentes em cada nó. Para isso, os nós inundam a rede com pacotes (*beacons*) contendo suas informações de mobilidade, como a localização e a velocidade. Então, ao receberem os pacotes, os nós extraem as informações de mobilidade e as armazenam em suas tabelas de vizinhos. No entanto, a periodicidade

no envio dos *beacons* junto com a mobilidade dos nós torna as informações armazenadas nas tabelas menos próximas as reais. Por consequência, há a possibilidade da tomada de decisão equivocada na escolha do nó para o encaminhamento dos pacotes. Portanto, o posicionamento estimado pela Equação 4.1 permite que o módulo Classificador de Rotas tenha informações de mobilidade mais realísticas.

4.1.2 Índice de Conectividade

O Índice de Conectividade (*IC*), encontrado no módulo Classificador de Rota, dá suporte às estratégias de encaminhamento para a tomada de decisão sobre o nó próximo salto. Ele é composto por critérios que consideram os elementos presentes na mobilidade dos VANTs, como a direção, a velocidade, a distância e o tempo contato entre dois VANTs. Dessa forma, o *IC* auxilia na seleção de um nó próximo salto com menor influência da mobilidade na transmissão multimídia. Para isso, cada nó computa o *IC* dos seus vizinhos (n_j) com base na Equação 4.2, por meio dos critérios de tempo de expiração do enlace, da direção e da distância de interceptação.

$$IC = \min_{n_j \in n_i} IC_{n_i, n_j} = \alpha \times TExL_{n_i, n_j} + \beta \times DirI_{n_j, D}(c_{n_j}, v_{n_j}, D) + \gamma \times DisI_{n_i, n_j}(D) \quad (4.2)$$

O *IC* indica que o melhor nó próximo salto é aquele que tem o menor valor de *IC* entre os demais nós presentes na tabela de vizinhos. Além disso, o seu cálculo utiliza pesos (α, β, γ) em cada um dos critérios: $TExL_{n_i, n_j}$ (tempo de expiração do enlace), $DirI_{n_j, D}(c_{n_j}, v_{n_j}, D)$ (direção de interceptação) e $DisI_{n_i, n_j}(D)$ (distância de interceptação), com a soma dos pesos igual a 1. Desse modo, quanto maior for o valor definido para o peso, menor será a relevância do critério na obtenção do *IC*. Assim, é possível atribuir diferentes níveis de importância para cada um dos critérios que compõem o *IC*.

Os critérios que compõem o *IC* apresentam características essenciais para assegurar uma seleção eficiente e robusta de nós próximos saltos. Mais especificamente, o $TExL_{n_i, n_j}$ garante a seleção de um nó próximo salto que possui poucas variações nas velocidades e direções. Além disso, ele permite o prolongamento da conexão entre os pares de nós participantes da transmissão multimídia. O $DirI_{n_j, D}(c_{n_j}, v_{n_j}, D)$ provê a seleção dos nós que não estejam em movimentações opostas ao destino. Por fim, o $DisI_{n_i, n_j}(D)$ permite a seleção dos nós com base em suas distâncias. Portanto, um nó n_i seleciona o nó próximo salto mais próximo ao destino, porém não muito próximo ao limite da sua área de transmissão. A seguir, é detalhado o cálculo do valor de cada um dos três critérios.

4.1.3 Tempo de Expiração do Enlace

O tempo de expiração do enlace ($TExL_{n_i, n_j}$) é um critério que estima o quanto um enlace entre dois nós (n_i, n_j) permanecerá ativo. Para isso, o RCRV calcula o $TExL_{n_i, n_j}$ por meio do modelo proposto por [59], que utiliza as informações de posicionamento no plano 3D, a velocidade e a direção dos nós. Dessa forma, o modelo estima o $TExL_{n_i, n_j}$ de acordo com a variação da velocidade, da direção e da distância entre os nós.

Para explicar o cálculo do tempo de expiração de um enlace, assumem-se dois nós n_i e n_j , os quais estão dentro do alcance de transmissão de ambos. Sejam (x_i, y_i, z_i) e (x_j, y_j, z_j) as coordenadas de n_i e $n_j \in \mathbb{R}^3$, respectivamente. Além disso, sejam θ_i , ϕ_i e θ_j , ϕ_j os ângulos que indicam o sentido em que os nós i e j se movimentam, respectivamente. Por fim, supondo que eles têm uma velocidade de v_i e v_j m/s. Então, o passo inicial é utilizar a Equação 4.3 para a obtenção das diferenças entre as coordenadas cartesianas de n_i e n_j , sendo indicadas por a , b e c , bem como as diferenças entre as coordenadas em relação as velocidades dos nós por meio de e , f e g .

$$\begin{aligned}
a &= (x_i - x_j) \\
b &= (y_i - y_j) \\
c &= (z_i - z_j) \\
e &= (v_i \sin \theta_i \cos \phi_i - v_j \sin \theta_j \cos \phi_j) \\
f &= (v_i \sin \theta_i \sin \phi_i - v_j \sin \theta_j \sin \phi_j) \\
g &= (v_i \cos \phi_i - v_j \cos \phi_j)
\end{aligned} \tag{4.3}$$

O $TEXL_{n_i, n_j}$ entre dois nós n_i e n_j , em uma rede 3D, é calculado de acordo com uma equação quadrática, a qual considera que ambos os nós possuem alcances de transmissão esféricos definidos por um determinado raio TR . Desse modo, a Equação 4.4 utiliza os valores obtidos pela Equação 4.3 para o cálculo do $TEXL_{n_i, n_j}$.

$$TEXL_{n_i, n_j} = \frac{-(2ae + 2bf + 2cg) \pm \sqrt{(2ae + 2bf + 2cg)^2 - 4(e^2 + f^2 + g^2)(a^2 + b^2 + c^2 - TR^2)}}{2(e^2 + f^2 + g^2)} \tag{4.4}$$

De acordo com a equação proposta, o $TEXL_{n_i, n_j}$ é mais influenciado por grandes variações nas diferenças da direção e da velocidade entre os nós, do que pela distância entre eles. Assim, valores altos de $TEXL_{n_i, n_j}$ indicam uma movimentação com trajetórias contrárias ou com velocidades diferentes entre os nós n_i e n_j . Esse comportamento sugere que tal enlace é mais suscetível à quebra em decorrência da mobilidade, diminuindo, assim, a robustez do sistema. Entretanto, valores baixos de $TEXL_{n_i, n_j}$ significam que o enlace entre os nós n_i e n_j é mais duradouro e robusto à quebra devido à mobilidade.

4.1.4 Direção de Interceptação

A direção de interceptação ($DirI_{n_j, D}(c_{n_j}, v_{n_j}, D)$) é um critério que indica qual dos nós presentes na tabela de vizinhos têm a melhor possibilidade de alcançar o destino. Isso é devido ao fato de que a seleção de um próximo salto que esteja em movimentação oposta ao destino aumenta o número de saltos. Com isso, ocorre a redução da robustez e o acréscimo da quantidade de pacotes perdidos. Conseqüentemente, há a diminuição da qualidade do vídeo. Assim, é preferível que o protocolo de roteamento selecione próximos saltos com trajetórias mais próximas ao destino.

O $DirI_{n_j, D}(c_{n_j}, v_{n_j}, D)$ é obtido por meio de operações trigonométricas e calculado conforme a Equação 4.5. Porém, seu cálculo utiliza apenas informações de mobilidade

no espaço 2D, para priorizar a direção, independentemente da altura. Assim, é possível verificar a direção do candidato a nó próximo salto em relação ao destino. Sejam, $c_j = (x_j, y_j)$ e $v_j = (v_{jx}, v_{jy})$ as coordenadas cartesianas e as componentes da velocidade de um nó n_j . Além disso, assume-se que todos os nós da rede têm o conhecimento sobre as coordenadas (x_d, y_d) do destino. Então, a Equação 4.5 indica o nó com direção mais próxima ao destino.

$$DirI_{n_j,D}(c_{n_j}, v_{n_j}, D) = \frac{|\theta_1 - \theta_2|}{angleTh} \quad (4.5)$$

Onde, $\theta_1 = atan2(v_{jy}, v_{jx}) \frac{180}{\pi}$ representa o ângulo em graus entre o eixo x positivo e as componentes da velocidade v_{jy} e v_{jx} de um nó n_j . Além disso, $\theta_2 = atan2(y_d - y_j, x_d - x_j) \frac{180}{\pi}$ é o ângulo em graus entre o eixo x positivo de um nó n_j e a linha imaginária que o interliga ao destino. Por fim, o limiar $angleTh$ é um limiar em graus para auxiliar na seleção de um nó dentro de um uma área predefinida.

O **atan2(x,y)** é uma função matemática presente na maioria das linguagens de programação. Ela permite calcular o arco quando o valor da tangente é conhecido. Assim, é possível saber o ângulo, em radianos, entre o eixo x positivo de um plano e as coordenadas x,y fornecidas pelos argumentos da função. Com isso, pode-se ter o conhecimento sobre a direção do nó em um dos quatro quadrantes do ciclo trigonométrico, como ilustra a Figura 15 [60].

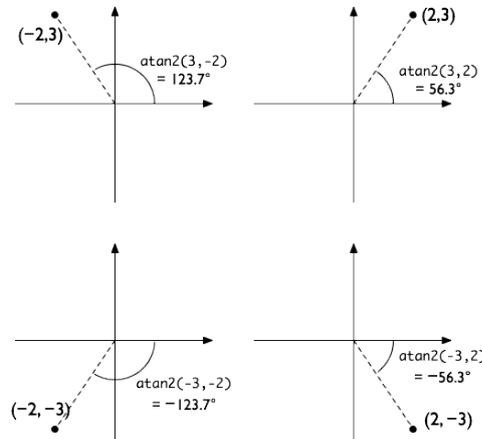


Figura 15: Casos de uso da função $atan2(x,y)$ [61]

A Figura 16 ilustra dois nós (n_1 e n_2) presentes na tabela de nós vizinhos de um nó n_i . Ambos n_1 e n_2 podem estabelecer uma rota com n_i . Porém, é preciso verificar as suas direções, a fim de evitar a seleção de um nó com direção oposta ao destino. De acordo com o exemplo da Figura 16, o nó n_1 apresenta uma mobilidade oposta ao destino. Tal comportamento de mobilidade resulta em um valor alto de $\Delta\theta$. Assim, ele não é um candidato adequado para atuar como um nó próximo salto. Por outro lado, o pequeno valor para $\Delta\theta$ indica que o nó n_2 é o melhor candidato na tabela de n_i .

A tabela de vizinhos do n_i pode conter apenas nós com direções de deslocamento opostas ao destino. Esse comportamento pode ocasionar rotas com longos saltos ou a

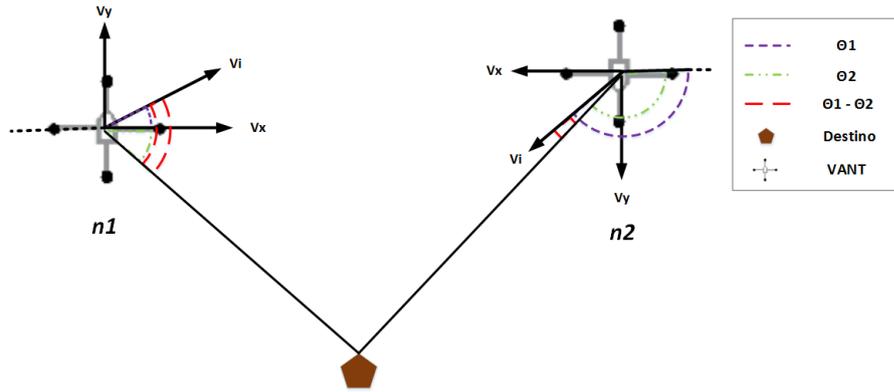


Figura 16: Direção dos nós em relação ao destino

perda de pacotes pelo isolamento desses nós em uma região sem outros nós. No entanto, o nó n_i não deve desconsiderar o uso desses vizinhos presentes em sua tabela. Assim, o limiar *angleTh* permite a seleção de um nó com melhor direção em relação aos demais presentes na tabela de vizinhos do n_i .

4.1.5 Distância de Interceptação

A distância de interceptação ($DisI_{n_i, n_j}(D)$) é um critério baseado nas distâncias tridimensionais entre pares de nós (n_i, n_j) em relação ao destino D . O uso da distância como critério de decisão de roteamento é uma abordagem adotada por vários protocolos de roteamento geográficos. Contudo, eles apenas verificam a distância entre um nó n_j presente na tabela de n_i em relação ao destino. Por outro lado, o $DisI_{n_i, n_j}(D)$ analisa as distâncias tanto de n_i quanto de n_j . Para isso, ele utiliza a Equação 4.6 a fim de realizar o cálculo da distância euclidiana entre os nós.

$$d_{i,j} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2} \quad (4.6)$$

Considerando (x_i, y_i, z_i) como as coordenadas cartesianas de um nó n_i que deseja selecionar seu nó próximo salto. Além disso, assumindo (x_j, y_j, z_j) e (x_d, y_d, z_d) como as coordenadas do candidato a nó próximo salto n_j presente na tabela de n_i e do destino D , respectivamente. Assim, a distância de interceptação é obtida pela Equação 4.7.

$$DisI_{n_i, n_j}(D) = \left| \frac{d_{n_i, D} - d_{n_j, D}}{d_{n_i, D}} \right| \quad (4.7)$$

Onde, $d_{n_i, D}$ é a distância entre o nó n_i que deseja selecionar seu nó próximo salto e o destino D . Além disso, $d_{n_j, D}$ é a distância entre o candidato a nó próximo salto n_j e D , como mostra a Figura 17. Desse modo, o critério $DisI_{n_i, n_j}(D)$ privilegia a indicação de um nó n_j que não esteja muito próximo ao limite do alcance de transmissão de n_i , porém não tão próximo a n_i .

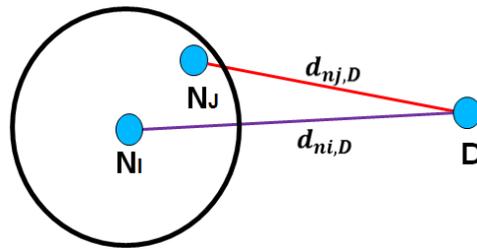


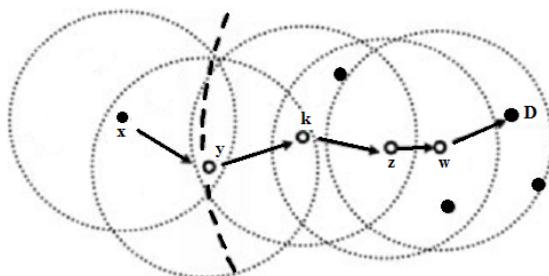
Figura 17: Distância dos nós em relação ao destino

4.2 Estudo de Caso

O mecanismo RCRV é independente de protocolo de roteamento e pode atuar em qualquer protocolo de roteamento geográfico para redes VANTs. Desse modo, ele foi integrado ao protocolo GPSR [57], visto que o GPSR tem sido usado como referência para roteamento geográfico, sendo, também, empregado em redes VANTs. Portanto, puderam-se verificar os impactos e os benefícios do RCRV ao protocolo de roteamento a partir de um cenário simples e comum.

O GPSR possui dois modos de operação para o encaminhamento de pacotes: o modo *greedy* e o modo perímetro (*perimeter mode*). No modo *greedy*, um nó que deseja enviar um pacote de dados escolhe o nó vizinho que esteja dentro do seu alcance de transmissão, bem como possua a menor distância Euclidiana ao destino. Para isso, o GPSR utiliza pacotes específicos, denominados de *hello messages*, contendo a localização dos nós presentes na rede. Então, essas informações são armazenadas em tabelas presentes nos nós sendo utilizadas na decisão de encaminhamento dos pacotes.

A Figura 18 ilustra o processo de encaminhamento pelo modo *greedy*. Nela, um nó fonte x deseja enviar um pacote de dados para um nó destino D . Então, x envia o pacote para o nó y que está presente em sua tabela de vizinhos. Isso porque y é o nó mais próximo a D entre os demais nós presentes nas tabelas de x . Por fim, esse processo de encaminhamento é repetido pelos nós y , k , z e w até o pacote de dados chegar ao nó D . Contudo, essa abordagem falha quando a distância entre o emissor e o destino é a menor das distâncias entre os demais possíveis nós candidatos presentes na tabela de vizinhos de x . Então, o GPSR utiliza o modo perímetro (*perimeter mode*), que consiste de uma estratégia de recuperação baseada na regra da mão direita.

Figura 18: Encaminhamento pelo modo *greedy*

A Figura 19 ilustra um exemplo relacionado a falha do modo *greedy*. Nela, o nó x está mais próximo ao destino D que os seus nós vizinhos w e y . Nesse caso, o protocolo GPSR declara x como o máximo local para D e a região sombreada sem nós como uma região vazia (*void*). Em seguida, o modo perímetro constrói um gráfico planazidado para que os vizinhos de x possam encaminhar o pacote de dados ao redor da região vazia pela regra da mão direita. Essa regra afirma que ao chegar ao nó x a partir de y , a próxima borda percorrida é a que segue o sentido anti-horário sobre a borda (x,y) . Então, o nó x encaminha o pacote de dados para o nó w .

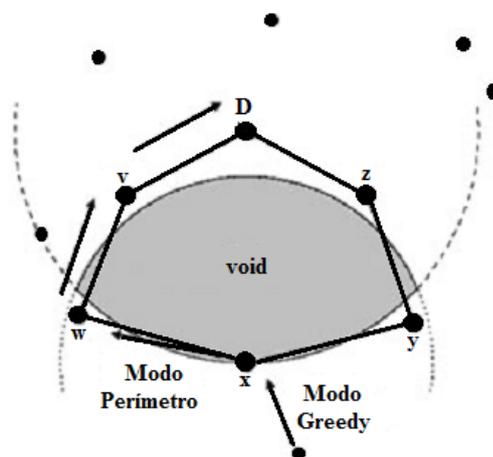


Figura 19: Encaminhamento pelo modo perímetro

As estratégias de roteamento adotadas pelo GPSR apresentam alto grau de simplicidade. Porém, elas não garantem uma formação eficiente e confiável dessas rotas. Isso ocorre porque a seleção dos nós considerando apenas a distância é uma abordagem ineficiente, visto que há a possibilidade de quebra de enlace em razão da saída de um nó do alcance de transmissão de outro nó [62]. Portanto, é necessária a adoção de um mecanismo para a seleção de rotas mais robustas e confiáveis, que mitigue os problemas da mobilidade dos nós.

Nesse contexto, o presente trabalho apresenta, como um estudo de caso, a inclusão do RCRV ao GPSR, chamado de GPSR-RCRV, de modo a garantir uma eficiente transmissão multimídia em redes VANTs. Isso ocorre porque o RCRV considera múltiplos critérios para seleção de próximo salto, provendo, assim, a melhoria na redução da influência da mobilidade em redes VANTs comparado às propostas existentes.

A Figura 20 ilustra o processo de formação de uma rota robusta, eficiente e confiável por meio do GPSR-RCRV entre um nó Fonte F e um nó de Destino D , com possíveis nós vizinhos M , N , O , P , Q e R . A tabela de vizinhos do GPSR foi alterada para conter as informações de posicionamento no plano 3D (x, y, z) , bem como os componentes das velocidades dos nós vizinho (v_x, v_y) . Assim, os nós calculam o índice de conectividade, além de estimarem o posicionamento, como descrito na Seção 4.1.

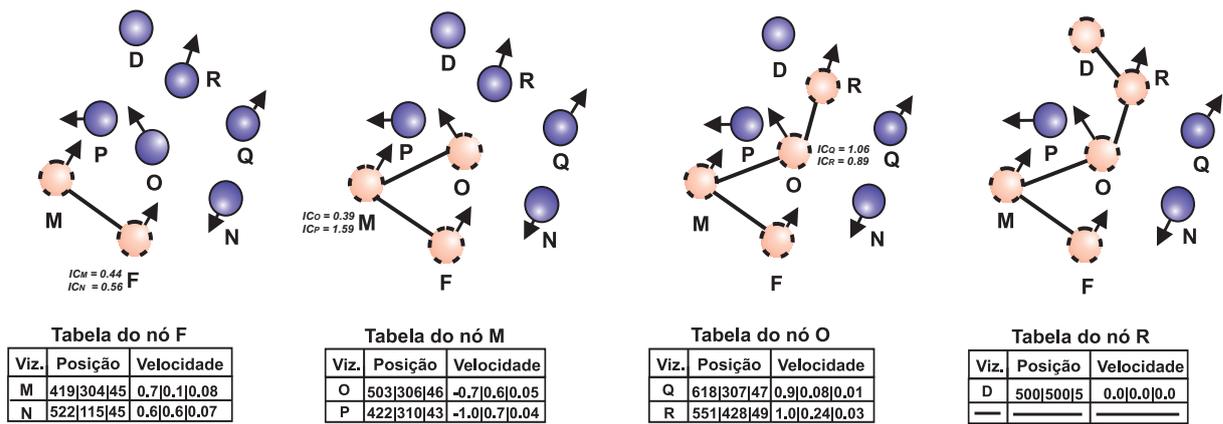


Figura 20: Formação de um caminho entre um nó fonte F e o destino D

No exemplo da Figura 20, o nó F seleciona o nó M como próximo salto, de acordo com o RCRV. O nó M tem $IC = 0.44$ devido aos três critérios de seleção vistos na Seção 4.1. Então, M segue na mesma direção que F . Logo, o enlace entre F e M permanece ativo por um maior período. Além disso, M segue em direção ao destino e, assim, há um baixo risco de perda de pacotes pelo isolamento deste nó em uma área afastada e sem vizinhos. Por fim, M tem a menor distância em relação ao nó de destino D . Em seguida, M seleciona o nó O devido ao seu baixo IC em relação ao nó P . No entanto, o GPSR selecionaria P , pois tal nó tem a menor distância ao destino. Contudo, P apresenta uma trajetória oposta ao destino. O processo de seleção continua, até que um nó possua o destino como um dos seus vizinhos.

A rota estabelecida entre os nós F e D permanece inalterada até a ocorrência de dois eventos. O primeiro evento é a quebra de enlace devido à mobilidade dos nós. Nesse caso, o esquema de predição de posicionamento auxilia no monitoramento periódico da distância entre pares de nós. Assim, é possível detectar quando um dado próximo salto pode sair da área de transmissão do seu último salto. O segundo evento é a exclusão de um nó vizinho devido à expiração do seu registro na tabela de vizinhos. Em ambos os casos, o GPSR-RCRV reestabelece a rota.

4.3 Conclusões do capítulo

Este capítulo tem o objetivo de apresentar o mecanismo chamado de RCRV, para realçar a conectividade em protocolos de roteamento geográfico nas redes VANTs, em ambiente 3D. Em relação aos trabalhos descritos no Capítulo 3, o RCRV é um mecanismo que não adiciona custos de implantação. Além disso, ele considera os comportamentos de mobilidade dos VANTs, na rede. Por fim, o RCRV leva em consideração as restrições apresentadas no Capítulo 2.

Neste capítulo foi apresentada a arquitetura do RCRV. Além disso, ele detalhou os módulos que a compõem, bem como suas funcionalidades dentro do mecanismo. Em seguida, foram descritos os critérios adotados pelo mecanismo para a seleção do nó próximo

salto. Finalmente, foi apresentado um estudo de caso do RCRV em conhecido protocolo de roteamento geográfico.

O próximo capítulo é responsável por descrever o ambiente no qual o protocolo foi avaliado. Além disso, serão descritos os cenários adotados para a avaliação do mecanismo proposto, bem como as ferramentas de avaliação utilizadas. Por fim, os resultados da avaliação de desempenho serão argumentados e ilustrados por gráficos.

CAPÍTULO 5

Avaliação de desempenho

Este capítulo é responsável por descrever o processo de avaliação de desempenho de um protocolo de roteamento geográfico com o mecanismo RCRV. Para isso, ele apresenta a metodologia utilizada para as simulações. Isto inclui o ambiente e o cenário de avaliação. Além disso, os impactos e benefícios do uso do RCRV foram representados e analisados por meio de gráficos. Assim, foram utilizadas métricas de avaliação de desempenho da rede (QoS) e da qualidade do vídeo (QoE), sendo descritas na Seção 2.6.

5.1 Descrição da avaliação

A avaliação do RCRV consistiu no uso de um simulador de eventos discretos. Assim, ele foi implementado no simulador NS-3 versão 3.17 e adicionado ao protocolo GPSR, a fim de avaliar o seu desempenho. O ambiente de avaliação considera um cenário de monitoramento urbano para uma situação emergencial ou de segurança, que pode ser representado pela Figura 21. Ademais, tal ambiente possui VANTs dispostos em uma área com a unidade de controle localizada no centro da mesma. Por fim, utilizou-se o modelo Gauss-Markov-3D (Seção 2.3) para simular a mobilidade dos VANTs no ambiente 3D.

Nas simulações variou-se a quantidade e a velocidade dos VANTs e, para cada combinação, 33 simulações foram realizadas com diferentes *seeds*. Os resultados consideram um intervalo de confiança de 95%. Então, 8, 12, 16, 20, 24, 28 e 32 VANTs foram dispostos aleatoriamente em uma área de 500x500 m. Ademais, as velocidades dos VANTs são aleatórias e variam de 1 a 4 m/s sendo alteradas a cada 1s. Por fim, assume-se que os VANTs não apresentam falhas pela falta de recurso energético, tendo energia suficiente para voar pela área durante as simulações.

Os VANTs se comunicam por meio do padrão IEEE 802.11b com uma taxa de transmissão de 11 Mb/s. Cada VANT também possui uma área de transmissão de 150 m definida por uma potência de transmissão de 32 dBm. Eles têm a capacidade de cap-



Figura 21: Área do Campus Básico da Universidade Federal do Pará [63]

turar fluxos de vídeo em tempo real, e transmiti-los por meio de extensões do framework EvalVid - A Video Quality Evaluation Tool-Set no simulador. Foram escolhidos os vídeos UAV_1 e UAV_2 [64] na transmissão, pois eles representam a cobertura de um VANT em um ambiente urbano. Porém, o vídeo UAV_2 possui maior região de movimentação do que o UAV_1 , indicando uma situação de instabilidade de voo. Por fim, repetiu-se a transmissão dos vídeos por 5 vezes ao longo do tempo de simulação. A Tabela 3 apresenta os parâmetros utilizados nas simulações.

Tabela 3: Parâmetros da simulação

Parâmetros	Valores
Tamanho da área	500x500 m
Localização do destino	(250,250,5)
Número de VANTs	8,12,16,20,24,28,32
Velocidade	1,2,3,4 m/s
Altura	U(40,50) m
(α, β, γ)	0.2,0.3,0.5
$angleTh$	30°
Tempo de simulação	120 s
Potência de transmissão	32 dBm
Alcance de transmissão	150 m
Sequência do vídeo	UAV_1, UAV_2
Codificação do vídeo	H.264
Formato	CIF (352x288)
Taxa de frames	30 fps
GOP	18
Duração do vídeo	10 s

As simulações avaliam o comportamento do GPSR e do GPSR-RCRV quanto ao desempenho da rede e da qualidade do vídeo entregue aos usuários. Assim, utilizou-se as métricas de QoS: PDR e E2E. Porém, tais métricas apenas refletem o desempenho do sistema sobre o ponto de vista da rede e, por consequência, elas não mostram a qualidade do vídeo da perspectiva do usuário. Então, utilizou-se a métrica de QoE SSIM para a avaliação da qualidade do vídeo entregue ao usuário.

5.2 Resultados de QoS e QoE para UAV₁

A Figura 22 mostra os resultados de QoS para o vídeo UAV₁ transmitido pelos protocolos GPSR e GPSR-RCRV e densidades de 8, 12, 16 e 20 VANTs. Observa-se que ao contrário do GPSR, o GPSR-RCRV apresentou resultados uniformes de PDR e E2E. Por exemplo, para todas as quantidades de VANTs e velocidades de 1 e 2 m/s, ele manteve os valores de PDR acima de 94% e E2E abaixo de 0.05 s. Por outro lado, para as demais velocidades, ele assegurou o PDR estável e próximo de 85% e o E2E abaixo de 0.10s. Isso ocorre devido ao uso do IC para a decisão de roteamento, que utiliza três critérios baseados na mobilidade do VANT e, assim, reduz as influências da mobilidade 3D, durante a transmissão multimídia. Ademais, o módulo de previsão de posicionamento garante o monitoramento de possíveis quebras de enlace ante a saída de um determinado VANT do alcance de transmissão do seu nó próximo salto. Assim, o GPSR-RCRV garante a transmissão do vídeo UAV₁ com baixos atrasos e taxas de perdas de pacotes.

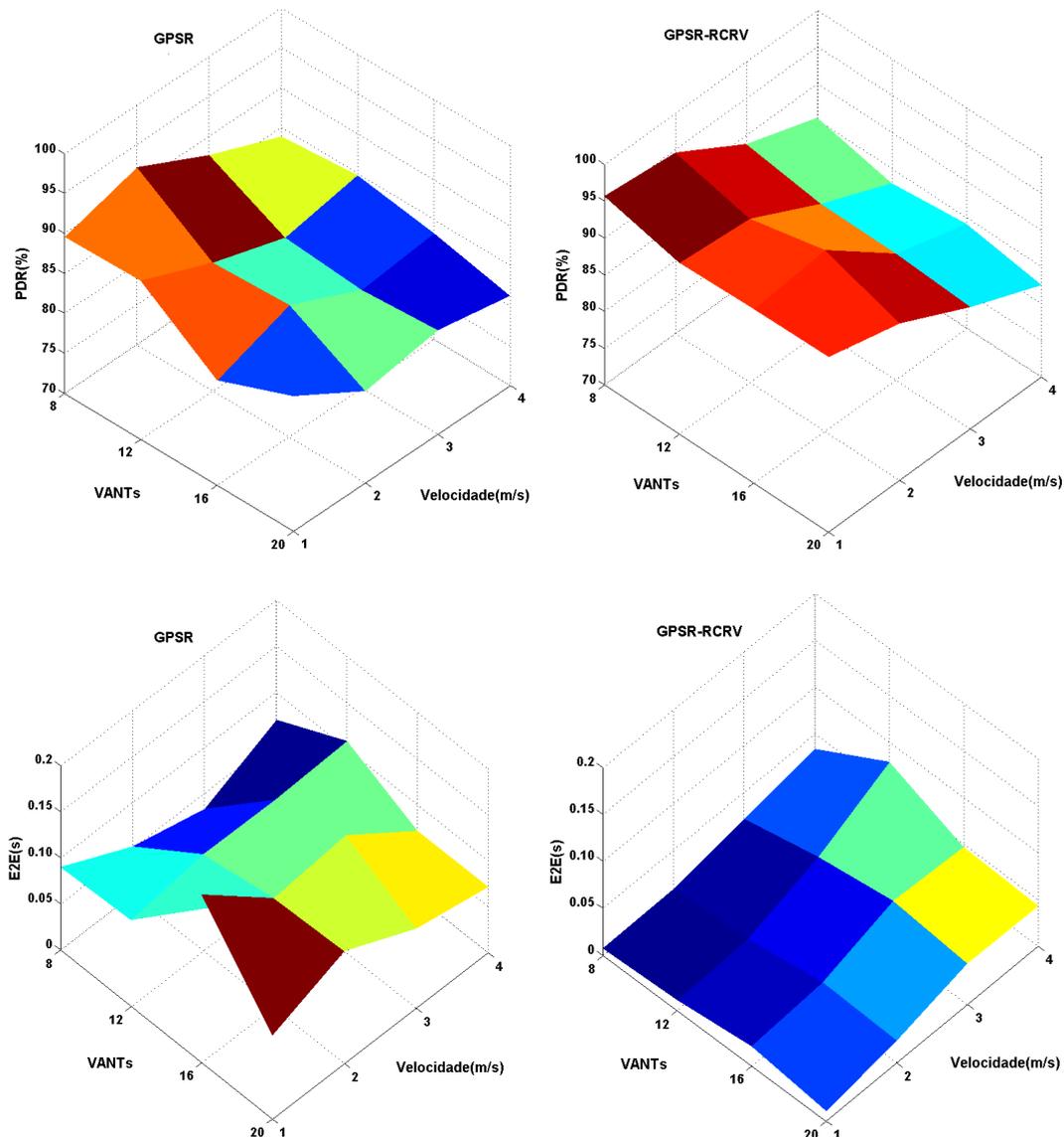


Figura 22: PDR e E2E para 8, 12, 16 e 20 VANTs - UAV₁

Em relação aos resultados de QoE, a Figura 23 mostra que o GPSR-RCRV proveu a disseminação de vídeo com qualidade assegurada do ponto de vista do usuário, em comparação ao GPSR. Para todas as quantidades de VANTs e velocidades de 1 e 2 m/s, o GPSR-RCRV manteve o SSIM acima de 0.95 e assegurou uma qualidade de vídeo 10% superior, comparado ao GPSR e, para as demais velocidades, o GPSR-RCRV garantiu o SSIM acima de 0.93 e um ganho de 5%, comparado ao GPSR. Isso porque o GPSR-RCRV estabelece rotas robustas e confiáveis à mobilidade dos VANTs. Portanto, o GPSR-RCRV garante melhor integridade do vídeo transmitido, sendo importante em ambientes de monitoramento urbano.

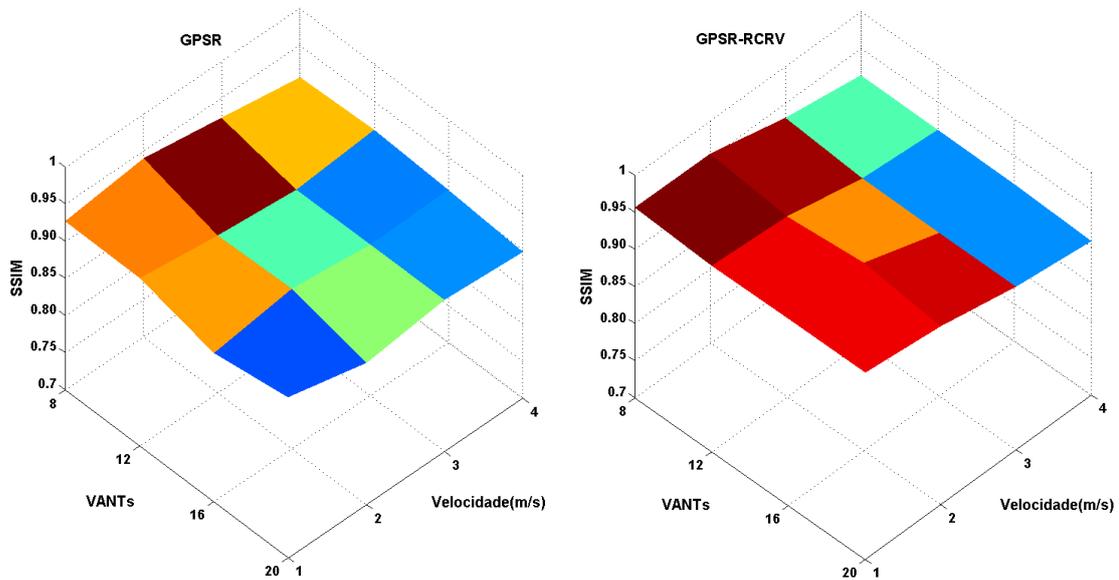


Figura 23: SSIM para 8, 12, 16 e 20 VANTs - UAV₁

A Figura 24 mostra os resultados de QoS para o vídeo UAV₁ transmitido pelos protocolos GPSR e GPSR-RCRV e densidades de 24, 28 e 32 VANTs. Neste cenário, a rede tende a ter melhor nível de conectividade devido à elevada densidade, de modo que é possível ter melhores taxas de entregas. Então, a figura mostra que o GPSR-RCRV teve uma considerável superioridade de desempenho em relação ao GPSR, onde, para todas as quantidades de VANTs com velocidades de 1 e 2 m/s, o GPSR-RCRV manteve os valores de PDR acima de 94% e E2E abaixo de 0.05 s. Por outro lado, para as demais velocidades, ele assegurou o E2E abaixo de 0.05s e o PDR acima de 88%. É importante destacar que à medida que se aumenta a densidade da rede, também se aumenta o número de possíveis candidatos a nó próximo salto. Por consequência, é possível ter o aumento na quantidade de pacotes perdidos e no atraso devido à quantidade de saltos. Entretanto, a análise do comportamento de mobilidade dos VANTs, no plano 3D, como a direção e a distância, provê ao GPSR-RCRV uma eficiente formação de rotas. Desse modo, ele oferece uma transmissão multimídia com baixos atrasos e perdas de pacotes.

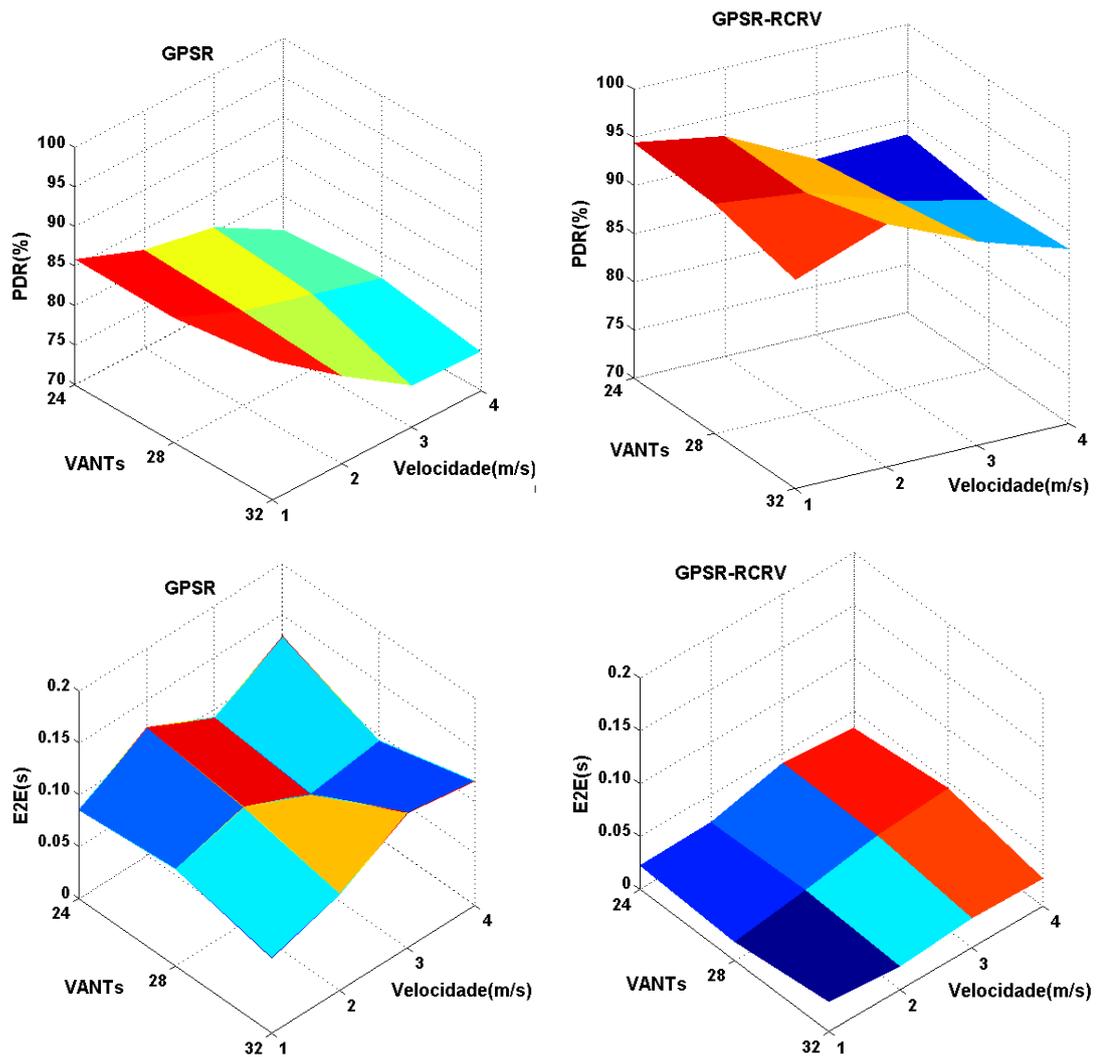


Figura 24: PDR e E2E para 24, 28 e 32 VANTs - UAV1

A Figura 25 mostra os resultados de QoE dos protocolos GPSR e GPSR-RCRV em uma rede com densidades de 24, 28 e 32 VANTs. Em todas as quantidades de VANTs e velocidades de 1 e 2 m/s, o GPSR-RCRV garantiu o SSIM acima de 0.93 e ofereceu uma qualidade de vídeo 10% superior comparado ao GPSR. Além disso, para as demais velocidades o GPSR-RCRV manteve o SSIM acima de 0.93 e um ganho de 5% na qualidade do vídeo entregue. Isso porque o GPSR-RCRV estabelece rotas robustas e confiáveis à mobilidade dos VANTs. Portanto, o GPSR-RCRV assegura melhor integridade do vídeo transmitido, sendo importante em ambientes de monitoramento urbano.

5.3 Resultados de QoS e QoE para UAV₂

Em um ambiente real, grande parte dos VANTs apresentam oscilações durante o voo devido às influências do vento. Assim, o vídeo UAV₂ possui uma maior região de movimentação causada pela instabilidade na movimentação dos VANTs durante o voo.

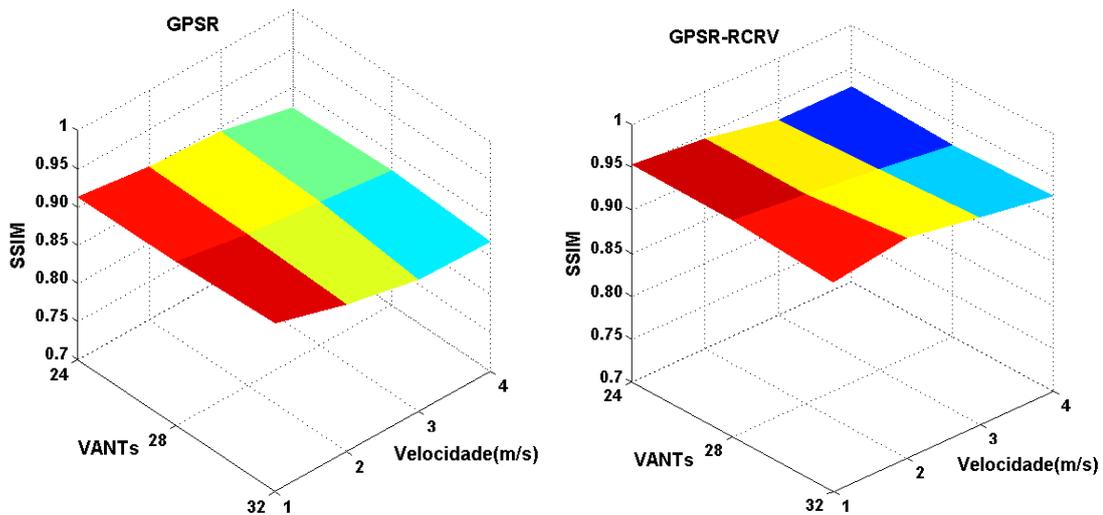


Figura 25: SSIM para 24, 28 e 32 VANTs - UAV1

Em [65], argumenta-se que esse tipo de vídeo é mais afetado pela perda de frames. Desse modo, a Figura 26 mostra os resultados de QoS para o vídeo UAV₂ transmitido pelos protocolos GPSR e GPSR-RCRV em uma rede com densidades de 8, 12, 16 e 20 VANTs. Observa-se que, para todas as densidades e velocidades de 1 e 2 m/s, o GPSR-RCRV mantém o PDR acima de 93% e o atraso E2E abaixo de 0.005s. Por outro lado, ele ainda oferece baixas perdas de pacotes e atrasos ante ao aumento da velocidade. Neste caso, ele mantém o PDR acima de 82% e o E2E abaixo de 0.07s. Pois, o GPSR-RCRV monitora a distância entre os VANTs e seus nós próximos saltos, a fim de reduzir a quantidade de falhas de rotas. Logo, ele garante uma transmissão multimídia mais eficiente.

A Figura 27 mostra os resultados de QoE, para o vídeo UAV₂ transmitido em uma rede com densidades de 8, 12, 16 e 20 VANTs. Então, para todas as densidades e velocidades de 1 e 2m/s, o GPSR-RCRV manteve o SSIM estável e acima de 0.93. Além disso, comparado ao GPSR, o GPSR-RCRV assegurou a entrega do vídeo com qualidade superior em até 6%. Para as demais velocidades, o GPSR-RCRV manteve o SSIM acima de 0.87 e aumentou a qualidade do vídeo em 5%. Isso devido ao uso do IC, que proporciona a transmissão dos dados multimídia por rotas robustas e confiáveis. Desse modo, é possível proteger os *frames* prioritários, como os *I-frames* e os *P-frames*, de períodos de congestão e quebras de enlace. Assim, o GPSR-RCRV reduz a perda dos frames prioritários e, por consequência, reduz a distorção do vídeo entregue ao usuário.

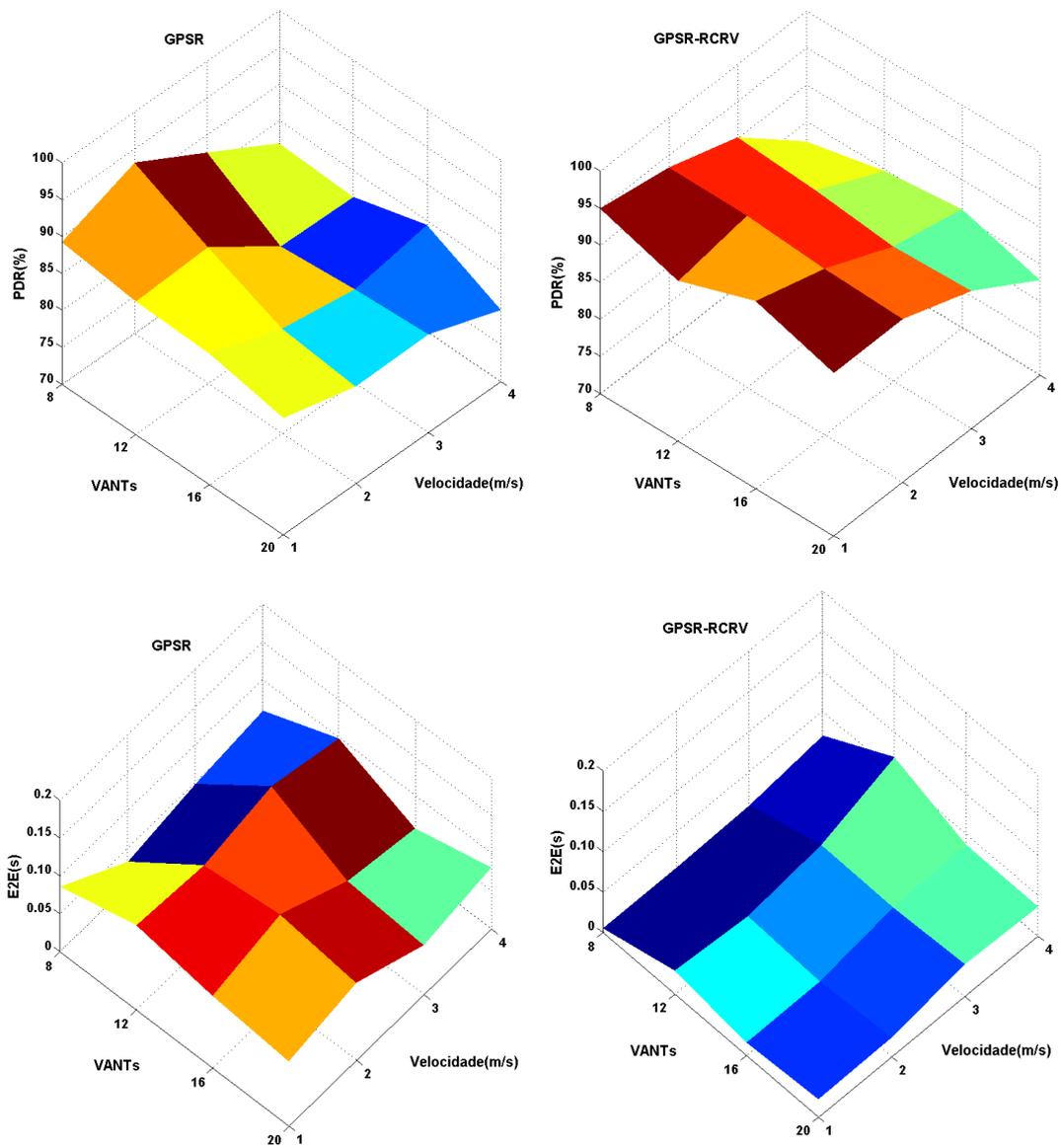


Figura 26: PDR e E2E para 8, 12, 16 e 20 VANTs - UAV2

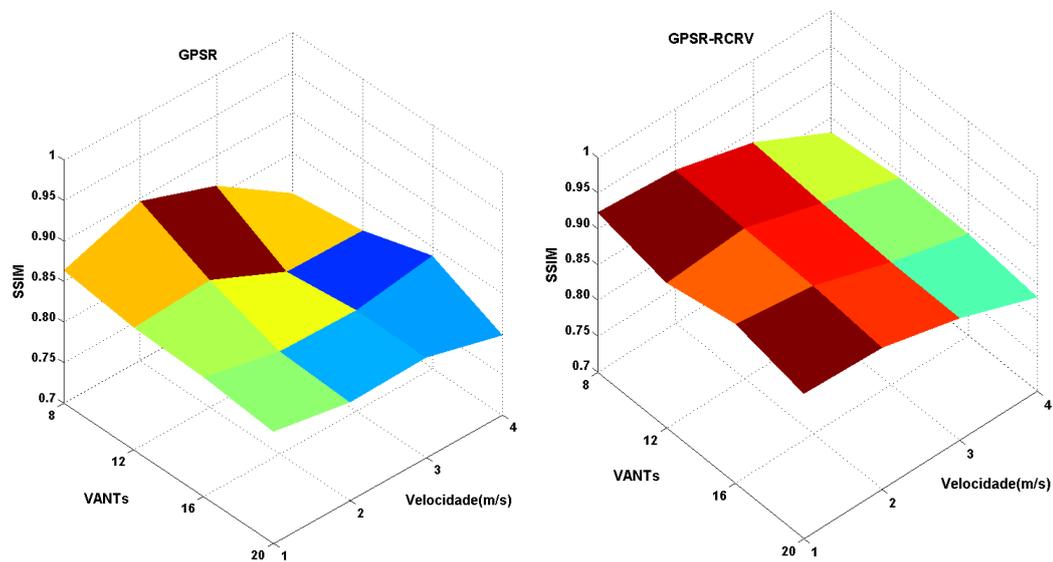


Figura 27: SSIM para 8, 12, 16 e 20 VANTs - UAV2

A Figura 28 mostra os resultados de QoS para o vídeo UAV₂ transmitido em uma rede com densidades de 24, 28 e 32 VANTs. Nesse caso, para todas as densidades e velocidades de 1 e 2 m/s o GPSR-RCRV garantiu taxas de PDR acima de 93% e atraso E2E abaixo de 0.003s. O uso do IC possibilita o prolongamento da conectividade entre os VANTs, bem como evita a formação de rotas com longos saltos. Para as demais velocidades, o GPSR-RCRV manteve as taxas de PDR estáveis e acima de 88%. Além disso, ele assegurou a transmissão multimídia com atrasos E2E abaixo de 0.05s. Portanto, o GPSR-RCRV garante a entrega de pacotes com baixos atrasos diante a alta densidade ou mobilidade dos VANTs.

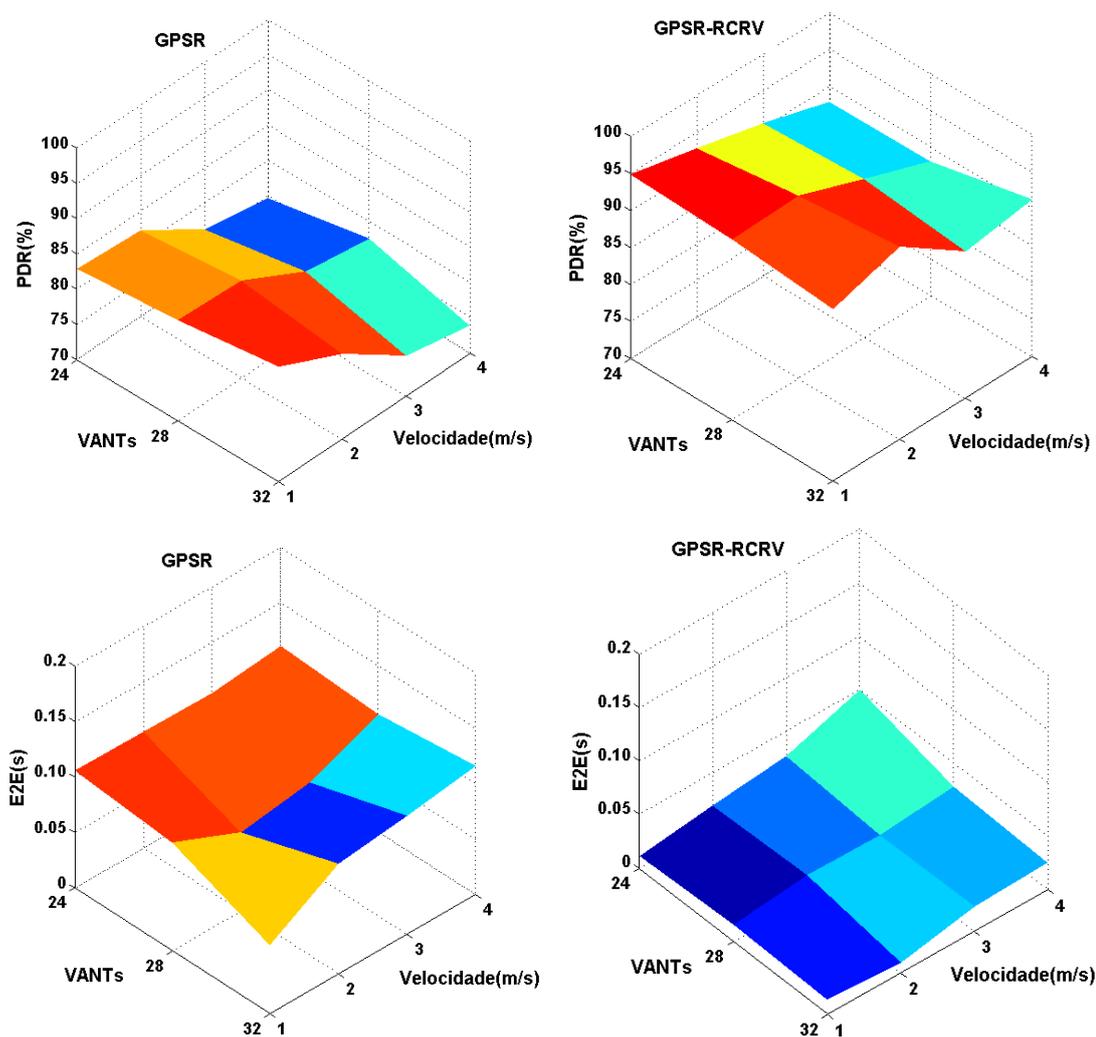


Figura 28: PDR e E2E para 24, 28 e 32 VANTs - UAV₂

A Figura 29 mostra os resultados de QoE para densidades de 24, 28 e 32 VANTs. Nela, observa-se que, para todas as densidades e velocidades de 1 e 2m/s, o GPSR-RCRV assegurou valores de SSIM acima de 0.92. Ademais, ele garantiu ganhos de até 10% na qualidade do vídeo entregue em relação ao protocolo GPSR. Para as demais velocidades, o GPSR-RCRV manteve o SSIM acima de 0.87 e um ganho de 5% na qualidade do vídeo entregue ao usuário. Assim, o GPSR-RCRV garante a disseminação multimídia com aceitável nível de qualidade do vídeo sob a percepção do usuário.

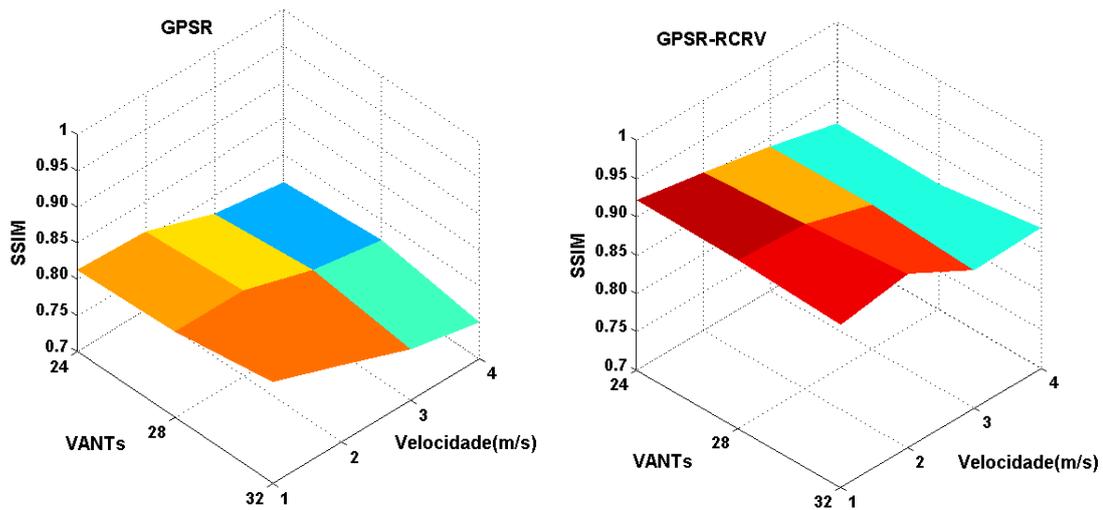


Figura 29: SSIM para 24, 28 e 32 VANTs - UAV2

5.4 Conclusões do capítulo

A partir da análise dos resultados obtidos, conclui-se que o uso do mecanismo RCRV no protocolo GPSR proporciona resultados estáveis e superiores em relação ao GPSR puro, para os cenários utilizados nas simulações. Então, os gráficos apresentados mostraram que o GPSR-RCRV garantiu uma transmissão multimídia com poucas perdas de pacotes e atrasos. Isso ocorreu devido ao conjunto de critérios utilizados para a formação de rotas robustas e confiáveis diante a mobilidade dos VANTs. Por fim, o uso da predição de mobilidade reduz as influências das quebras de enlace.

Os resultados também mostram que o GPSR-RCRV melhorou a qualidade dos vídeos UAV_1 e UAV_2 sobre a perspectiva do usuário. Isso porque o RCRV assegurou a melhor proteção dos *frames* prioritários, como os *I-frames* e os *P-frames*, devido a redução da quantidade de pacotes perdidos durante a transmissão multimídia. Desse modo, ele garante a melhor integridade do vídeo transmitido, sendo importante em ambientes de monitoramento urbano. Mais resultados referentes aos benefícios do RCRV podem ser vistos no Anexo A.

CAPÍTULO 6

Conclusões

A manutenção da conectividade em redes VANTs, compostas por quadricópteros, é um requisito desafiador. A alta dinâmica do ambiente dificulta a manutenção precisa do estado da rede. Essa dinâmica tem relação com o elevado grau de mobilidade dos quadricópteros. Ao contrário das demais categorias (Seção 2.2), esses dispositivos podem assumir comportamentos distintos de mobilidade, como a variação brusca na altura ou na direção, bem como podem permanecer estáticos ou móveis no ambiente. Desse modo, isso implica em elevados números de desconexões durante o encaminhamento dos dados na rede. Por consequência, a rede se torna ineficiente, pois grande parte dos pacotes de dados ou são descartados ou entregues ao destino com um atraso significativo. Ademais, essa ineficiência é prejudicial à transmissão de dados multimídia. Isso porque esse tipo de dado é sensível a perdas e atrasos nos pacotes.

Uma forma de melhorar a conectividade está na análise dos comportamentos de mobilidade dos VANTs em ambientes 3D. Essa análise permite o desenvolvimento de soluções mais realísticas para ao gerenciamento da conectividade. Contudo, foi visto na Seção 3 que as soluções existentes tentam prover conectividade ou pelo uso de *hardwares* adicionais, como arranjos de antenas, ou por meio de critérios de seleção de rotas que consideram apenas alguns comportamentos de mobilidade e em ambientes 2D. Por fim, elas não dão suporte para aplicações que utilizam dados multimídia, como as aplicações de monitoramento urbano ou ambiental.

Este trabalho propôs o mecanismo RCRV para realçar a conectividade em roteamento nas redes VANTs. O RCRV é um mecanismo feito para atuar em redes compostas por quadricópteros. Além disso, ele é composto por critérios que analisam o tempo de expiração do enlace, a direção e a distância de interceptação num ambiente 3D, a fim de indicar os comportamentos de mobilidade dos VANTs. Em seguida, por meio de um índice de conectividade, o RCRV auxilia o protocolo de roteamento geográfico a detectar

o melhor VANT a ser encaminhado um fluxo de pacotes de dados multimídia. Por fim, o mecanismo também obtém uma estimativa de posicionamento futuro ao monitoramento de possíveis quebras de enlace de um VANT por afastamento da área de transmissão.

Simulações foram realizadas com diferentes cenários. A velocidade e o número de VANTs foram definidos como fatores. Desse modo, variou-se a velocidade em 1,2,3 e 4 m/s e o número de VANTs em 8,12,16 e 20. Além disso, utilizou-se dois vídeos distintos para a simulação de uma transmissão multimídia. Com isso, os resultados das simulações mostraram que o GPSR usando o RCRV apresentou maiores taxas de entrega de pacotes e menores atrasos fim-a-fim para os dois vídeos testados, com ganhos de 15% no PDR e 60% no E2E. Além disso, os resultados de QoE mostraram que ele garantiu a entrega dos vídeos com maior nível de qualidade superior a 12% em relação ao GPSR sem o mecanismo. Esses resultados são consequência das estratégias adotadas pelo mecanismo. Isso porque o RCRV é um mecanismo baseado em posicionamento e que considera os possíveis comportamentos de mobilidade dos VANTs para a formação de rotas robustas e confiáveis. Aliado a isso, o módulo de previsão de mobilidade possibilita o monitoramento de possíveis quebras de enlace pelo distanciamento entre pares de VANTs durante a transmissão multimídia. Portanto, o RCRV reduz as perdas, proporcionando uma disseminação multimídia com confiabilidade, robustez e suporte a QoE.

Os trabalhos futuros têm o objetivo de expandir a avaliação do RCRV. Para isso, pretende-se utilizar o RCRV em um dos protocolos analisados no Capítulo 3. Além disso, pretende-se fazer um estudo sobre o estado da arte quanto aos protocolos de roteamento baseados em múltiplos fluxos adequados às redes VANTs. Em seguida, pretende-se aplicar o RCRV no respectivo protocolo e avaliar o seu desempenho com o mecanismo. Pretende-se também analisar a possibilidade da utilização do RCRC em um protocolo de roteamento oportunístico. Por fim, será feito um estudo sobre um esquema que possibilite o ajuste dinâmico dos pesos (α, β, γ) que ponderam o Índice de Conectividade.

Referências

- [1] A. Bürkle, F. Segor, and M. Kollmann, “Towards autonomous micro uav swarms,” *Journal of intelligent & robotic systems*, vol. 61, no. 1-4, pp. 339–353, 2011.
- [2] C.-c. LI, G.-s. ZHANG, T.-j. LEI, A. GONG *et al.*, “Quick image-processing method of uav without control points data in earthquake disaster area,” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 21, pp. s523–s528, 2011.
- [3] O. K. Sahingoz, “Mobile networking with uavs: opportunities and challenges,” in *2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS'13)*. Atlanta, USA: IEEE, 2013, pp. 933–941.
- [4] A. I. Alshbatat and L. Dong, “Adaptive mac protocol for uav communication networks using directional antennas,” in *International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC'10)*. Chicago, USA: IEEE, 2010, pp. 598–603.
- [5] S. Temel and I. Bekmezci, “On the performance of flying ad hoc networks (fanets) utilizing near space high altitude platforms (haps),” in *6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST'13)*. Istanbul, Turkey: IEEE, 2013, pp. 461–465.
- [6] Y. Li, M. St-Hilaire, and T. Kunz, “Improving routing in networks of uavs via scoped flooding and mobility prediction,” in *IFIP Wireless Days (WD '12)*. Dublin, Ireland: IEEE, 2012, pp. 1–6.
- [7] L. Lin, Q. Sun, S. Wang, and F. Yang, “A geographic mobility prediction routing protocol for ad hoc uav network,” in *IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps'12)*. California, USA: IEEE, 2012, pp. 1597–1602.
- [8] Q. Zhou, W. Gu, J. Li, Q. Sun, and F. Yang, “A topology aware routing protocol based ads-b system for aeronautical ad hoc networks,” in *8th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM'12)*. Shanghai, China: IEEE, 2012, pp. 1–4.

- [9] D. Perez, I. Maza, F. Caballero, D. Scarlatti, E. Casado, and A. Ollero, “A ground control station for a multi-uav surveillance system,” *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 69, no. 1-4, pp. 119–130, 2013.
- [10] Globo, “Configurações dos vants,” 2014, <http://g1.globo.com/brasil/noticia/2013/03-/numero-de-voos-com-drones-dobra-mas-so-duas-unidades-tem-certificado.html>. Acessado em 23 de Abril de 2014.
- [11] D. A. Mindell, “Anti-aircraft fire control and the development of integrated systems at sperry, 1925-40,” *Control Systems, IEEE*, vol. 15, no. 2, pp. 108–113, 1995.
- [12] K. Daniel, B. Dusza, A. Lewandowski, and C. Wietfeld, “Airshield: A system-of-systems muav remote sensing architecture for disaster response,” in *3rd Annual IEEE Systems Conference (SysCon'09)*. Vancouver, Canada: IEEE, 2009, pp. 196–200.
- [13] Wikipedia, “Unmanned aerial vehicle - Wikipedia,” 2013, <http://en.wikipedia.org/wiki/UAV>. Acessado em 21 de Abril de 2014.
- [14] A. Mohammed, A. Mehmood, F.-N. Pavlidou, and M. Mohorcic, “The role of high-altitude platforms (haps) in the global wireless connectivity,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 11, pp. 1939–1953, 2011.
- [15] E. W. Frew and T. X. Brown, “Networking issues for small unmanned aircraft systems,” *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 54, no. 1-3, pp. 21–37, 2009.
- [16] İ. Bekmezci, O. K. Sahingoz, and Ş. Temel, “Flying Ad-Hoc Networks (FANET): A Survey,” *Ad Hoc Networks*, vol. 11, no. 3, pp. 1254–1270, 2013.
- [17] H. Chao, Y. Cao, and Y. Q. Chen, “Autopilots for small fixed-wing unmanned air vehicles: A survey,” in *International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA'07)*. Heilongjiang, China: IEEE, 2007, pp. 3144–3149.
- [18] E. Yanmaz, C. Costanzo, C. Bettstetter, and W. Elmenreich, “A discrete stochastic process for coverage analysis of autonomous uav networks,” in *GLOBECOM Workshops (GC Wkshps'10)*. Miami, USA: IEEE, 2010, pp. 1777–1782.
- [19] A. K. Widiawan and R. Tafazolli, “High altitude platform station (haps): a review of new infrastructure development for future wireless communications,” *Wireless Personal Communications*, vol. 42, no. 3, pp. 387–404, 2007.
- [20] R. Austin, “Unmanned aircraft systems,” *UAVS Design, Development and Deployment*. Wiley, 2010.
- [21] I. Spectrum, “The Coolest Flying Robot Projects At IROS Conference,” 2014, http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/robotics-software/the_coolest_flying_robot_proje. Acessado em 23 de Abril de 2014.
- [22] S. News, “Army buying 20 manportable UAVs for Kashmir operations,” 2014, <http://www.suasnews.com/2012/08/18534/army-buying-20-man-portable-uavs-for-kashmir-operations/>. Acessado em 23 de Abril de 2014.
- [23] Uaver, “UAV Classification,” 2014, <http://www.uaver.com/about-2-5.html>. Acessado em 23 de Abril de 2014.

- [24] J. Gertler, “Us unmanned aerial systems.” DTIC Document, 2012.
- [25] Wikipedia, “General Atomics MQ-1 Predator,” 2014, http://en.wikipedia.org/wiki/General_Atomics_MQ-1_Predator. Acessado em 23 de Abril de 2014.
- [26] J. N. Fox, P. M. Kodzwa, D. M. Tate, and P. F. Bronson, “Global hawk: Root cause analysis of projected unit cost growth,” DTIC Document, Tech. Rep., 2011.
- [27] M. Blog, “Global Hawk-1,” 2014, <http://markosun.wordpress.com/2010/01/19/remotely-piloted-aircraft-from-models-to-killer-drones/global-hawk-1/>. Acessado em 23 de Abril de 2014.
- [28] S. Gupte, P. I. T. Mohandas, and J. M. Conrad, “A survey of quadrotor unmanned aerial vehicles,” in *Proceedings of IEEE Southeastcon (Southeastcon'12)*. Orlando, USA: IEEE, 2012, pp. 1–6.
- [29] P. SA, “AR Drone 2.0,” 2014, <http://ardrone2.parrot.com/>. Acessado em 23 de Abril de 2014.
- [30] G. Lin, G. Noubir, and R. Rajaraman, “Mobility models for ad hoc network simulation,” in *Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM'04)*. Hong Kong, China: IEEE, 2004, pp. 7–11.
- [31] J. Xie, Y. Wan, J. H. Kim, S. Fu, and K. Namuduri, “Analysis of mobility models for airborne networks,” in *IEEE Military Communications Conference (MILCOM'13)*. San Diego, USA: IEEE, 2013, pp. 858–863.
- [32] I. Rhee, M. Shin, S. Hong, K. Lee, S. J. Kim, and S. Chong, “On the levy-walk nature of human mobility,” *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, vol. 19, no. 3, pp. 630–643, 2011.
- [33] X.-S. Yang, “Firefly algorithm, levy flights and global optimization,” in *XXVI Research and Development in Intelligent Systems*. Springer, 2010, pp. 209–218.
- [34] F. Bai and A. Helmy, “A survey of mobility models,” *Wireless Adhoc Networks. University of Southern California, USA*, vol. 206, 2004.
- [35] J. Xie, Y. Wan, J. Kim, S. Fu, and K. Namuduri, “A survey and analysis of mobility models for airborne networks,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, no. 99, pp. 1–18, 2013.
- [36] W. Wang, X. Guan, B. Wang, and Y. Wang, “A novel mobility model based on semi-random circular movement in mobile ad hoc networks,” *Information Sciences*, vol. 180, no. 3, pp. 399–413, 2010.
- [37] E. Kuiper and S. Nadjm-Tehrani, “Mobility models for uav group reconnaissance applications,” in *International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC'06)*. Bucharest, Romania: IEEE, 2006, pp. 33–33.
- [38] J. Xie, Y. Wan, K. Namuduri, S. Fu, G. L. Peterson, and J. F. Raquet, “Estimation and validation of the 3d smooth-turn mobility model for airborne networks,” in *IEEE Military Communications Conference (MILCOM'13)*. San Diego, USA: IEEE, 2013, pp. 556–561.

- [39] D. Broyles, A. Jabbar, and J. P. Sterbenz, “Design and analysis of a 3-d gauss-markov mobility model for highly-dynamic airborne networks,” in *Proceedings of the International Telemetering Conference (ITC’10)*, 2010.
- [40] T. Camp, J. Boleng, and V. Davies, “A survey of mobility models for ad hoc network research,” *Wireless communications and mobile computing*, vol. 2, no. 5, pp. 483–502, 2002.
- [41] Nasa, “Aircraft Rotations,” 2014, <http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/rotations.html>. Acessado em 17 de Maio de 2014.
- [42] D. Gavalas, C. Konstantopoulos, and G. Pantziou, “Mobility prediction in mobile ad hoc networks,” *Next Generation Mobile Networks and Ubiquitous Computing*, pp. 226–240, 2011.
- [43] S. Gambs, M.-O. Killijian, and M. N. del Prado Cortez, “Next place prediction using mobility markov chains,” in *Proceedings of the First Workshop on Measurement, Privacy, and Mobility (MPM’12)*. Bern, Switzerland: ACM, 2012, pp. 3–6.
- [44] W. Su, S.-J. Lee, and M. Gerla, “Mobility prediction and routing in ad hoc wireless networks,” *International Journal of Network Management*, vol. 11, no. 1, pp. 3–30, 2001.
- [45] S.-J. Lee, W. Su, and M. Gerla, “Wireless ad hoc multicast routing with mobility prediction,” *Mobile Networks and Applications*, vol. 6, no. 4, pp. 351–360, 2001.
- [46] S. Sivavakeesar, G. Pavlou, and A. Liotta, “Stable clustering through mobility prediction for large-scale multihop intelligent ad hoc networks,” in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC’04)*, vol. 3. Atlanta, USA: IEEE, 2004, pp. 1488–1493.
- [47] C. Konstantopoulos, D. Gavalas, and G. Pantziou, “Clustering in mobile ad hoc networks through neighborhood stability-based mobility prediction,” *Computer Networks*, vol. 52, no. 9, pp. 1797–1824, 2008.
- [48] H. Hartenstein and K. P. Laberteaux, “A tutorial survey on vehicular ad hoc networks,” *Communications Magazine, IEEE*, vol. 46, no. 6, pp. 164–171, 2008.
- [49] E. Crawley, R. Nair, B. Rajagopalan, and H. Sandick, “A framework for qos-based routing in the internet,” in *RFC*. Citeseer, 1998.
- [50] M. Mu, E. Cerqueira, F. Boavida, and A. Mauthe, “Quality of experience management framework for real-time multimedia applications,” *International Journal of Internet Protocol Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 54–64, 2009.
- [51] K. J. Ma, R. Bartoš, and S. Bhatia, “Review: A Survey of Schemes for Internet-based Video Delivery,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 34, no. 5, pp. 1572–1586, 2011.
- [52] X. Gao, W. Lu, D. Tao, and X. Li, “Image quality assessment based on multiscale geometric analysis,” *Image Processing, IEEE Transactions on*, vol. 18, no. 7, pp. 1409–1423, 2009.

- [53] M. H. Pinson and S. Wolf, “A New Standardized Method for Objectively Measuring Video Quality,” *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 50, no. 3, pp. 312–322, 2004.
- [54] M. G. . M. Lab, “MSU Quality Measurement Too,” 2014, http://compression.ru/video/quality_measure/video_measurement_tool_en.html. Acessado em 17 de Maio de 2014.
- [55] A. Takahashi, D. Hands, and V. Barriac, “Standardization activities in the itu for a qoe assessment of iptv,” *Communications Magazine, IEEE*, vol. 46, no. 2, pp. 78–84, 2008.
- [56] C. E. Perkins and E. M. Royer, “Ad-hoc on-demand distance vector routing,” in *Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA '99)*. Louisiana, USA: IEEE, 1999, pp. 90–100.
- [57] B. Karp and H.-T. Kung, “GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks,” in *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking (MobiCom'00)*. Boston, USA: ACM, 2000, pp. 243–254.
- [58] A.-B. Technologies, “Automatic Dependent Surveillance-Broadcast,” 2014, <http://www.ads-b.com>. Acessado em 18 de Maio de 2014.
- [59] M. A. Uddin, M. Mamun, and Rashid, “Link Expiration Time-Aware Routing Protocol for UWSNs,” *Journal of Sensors*, vol. 2013, no. 625274, p. 9, 2013.
- [60] G. do Estudante, “Círculo Trigonométrico - Trigonometria,” 2014, <http://guiadoestudante.abril.com.br/estudar/matematica/circulo-trigonometrico-trigonometria-677843.shtml/>. Acessado em 23 de Junho de 2014.
- [61] G. Develop, “What are atan and atan2 used for in games?” 2014, <http://gamedev.stackexchange.com/questions/14602/what-are-atan-and-atan2-used-for-in-games>. Acessado em 23 de Junho de 2014.
- [62] R. A. Alsaqour, M. S. Abdelhaq, and O. A. Alsukour, “Effect of network parameters on neighbor wireless link breaks in gpsr protocol and enhancement using mobility prediction model,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2012, no. 1, pp. 1–15, 2012.
- [63] Google, “Google Earth,” 2014, <http://www.google.com/earth/>. Acessado em 04 de Junho de 2014.
- [64] GERCOM, “Source Videos Used for Simulations,” 2013, <https://plus.google.com/117765468529449487870/videos>. Acessado em 10 de Setembro de 2013.
- [65] E. Aguiar, A. Riker, A. Abelém, E. Cerqueira, and M. Mu, “Video quality estimator for wireless mesh networks,” in *IEEE 20th International Workshop on Quality of Service (IWQoS '12)*. Coimbra,POR: IEEE, 2012, pp. 1–9.

-
- [66] R. Costa, D. Rosário, A. Santos, and E. Cerqueira, “Um mecanismo para realçar a conectividade de roteamento geográfico na transmissão multimídia em vants,” *XIX Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços*, vol. 19, no. 1, pp. 149–162, 2014.

ANEXO A – Resultados de QoS e QoE para densidades de 36, 44 e 56 VANTs

As Figuras 30 e 31 mostram os resultados de QoS e QoE para os vídeos UAV_1 e UAV_2 , respectivamente. Para isso, foram feitas simulações em um ambiente contendo 36, 44 e 56 VANTs dispostos aleatoriamente em uma área de 1000x1000 m, e altura uniforme entre 40 e 50 m. O posicionamento do destino é o centro da área (500,500,5). Além disso, cada VANT possui uma área de transmissão de 250 m, sendo definida por uma potência de transmissão de 33 dBm.

Na Figura 30 observa-se que o GPSR com o mecanismo proposto ofereceu ganhos de aproximadamente 10% no PDR, 60% no E2E e de 9% no SSIM. Em relação a Figura 31, os ganhos foram de aproximadamente 8% no PDR, 50% no E2E e de 6% no SSIM. Esses ganhos se devem ao uso da predição de posicionamento, que provê o monitoramento de possíveis quebras de conectividade pelo afastamento da área de transmissão de VANTs vizinhos. Além disso, o uso do IC proporciona a formação de rotas mais robustas à mobilidade. Portanto, o RCRV garantiu maiores taxas de entrega de pacotes, menores atrasos fim-a-fim e melhores níveis de qualidade dos vídeos entregues. Em [66], pode-se ter uma análise mais detalhada sobre esses resultados.

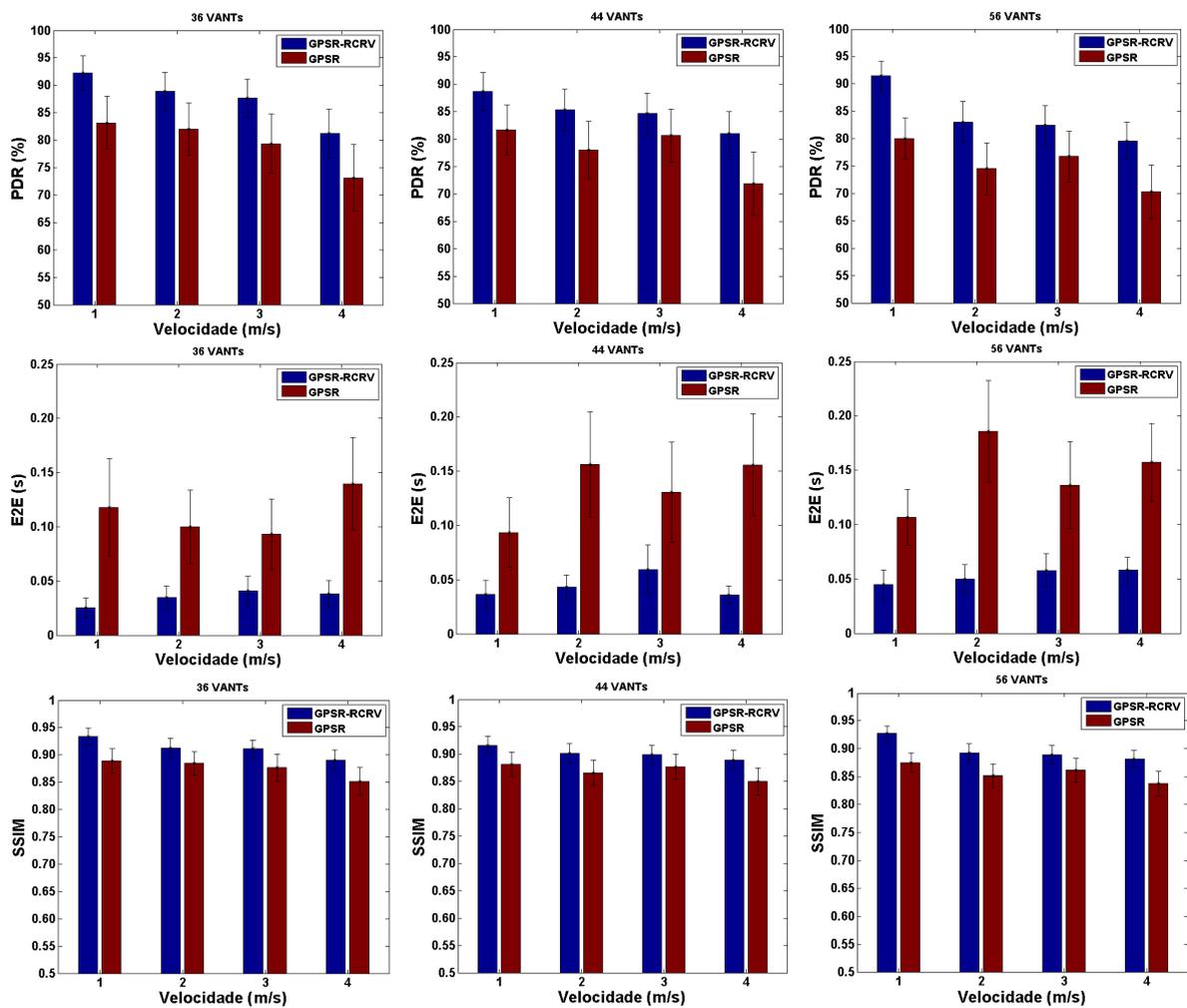


Figura 30: PDR, E2E e SSIM para 36, 44 e 56 VANTs - UAV1

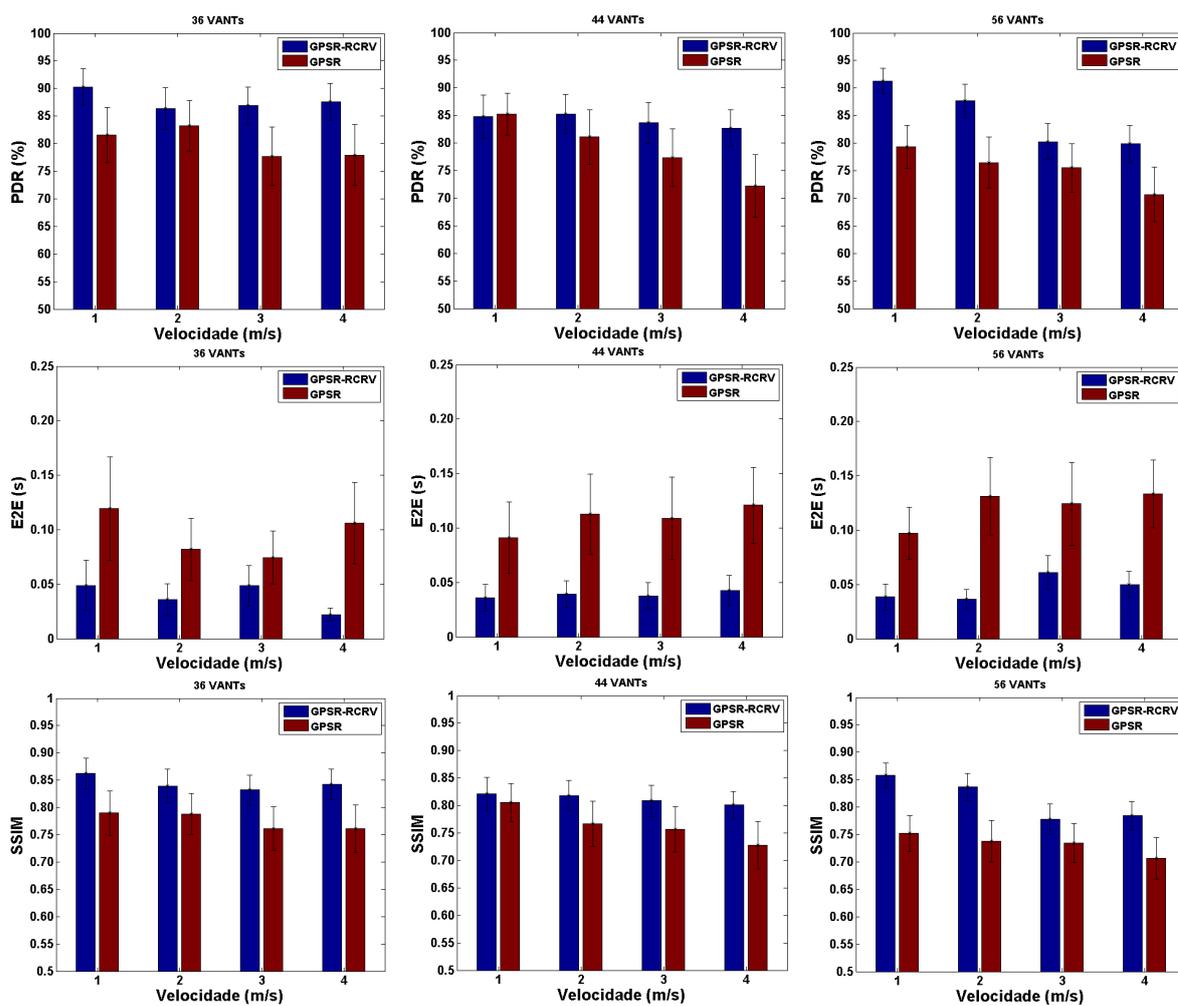


Figura 31: PDR, E2E e SSIM para 36, 44 e 56 VANTs - UAV2