



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA
COMPUTAÇÃO

LARISSA MONTEIRO PIMENTEL

CABR: PROTOCOLO DE ROTEAMENTO
BEACONLESS, OPORTUNÍSTICO E
ADAPTATIVO PARA DISTRIBUIÇÃO
MULTIMÍDIA EM FLYING AD-HOC NETWORKS

BELÉM-PA

maio / 2015

LARISSA MONTEIRO PIMENTEL

**CABR: PROTOCOLO DE ROTEAMENTO *BEACONLESS*,
OPORTUNÍSTICO E ADAPTATIVO PARA DISTRIBUIÇÃO
MULTIMÍDIA EM FLYING AD-HOC NETWORKS**

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

Orientador: Prof. Dr. Denis Lima do
Rosário

Co-Orientador: Prof. Dr. Eduardo Coelho
Cerqueira

BELÉM-PA

maio / 2015

LARISSA MONTEIRO PIMENTEL

CABR: PROTOCOLO DE ROTEAMENTO
BEACONLESS, OPORTUNÍSTICO E
ADAPTATIVO PARA DISTRIBUIÇÃO
MULTIMÍDIA EM FLYING AD-HOC NETWORKS

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

Aprovada em: --/--/----

BANCA EXAMINADORA

Prof. Prof. Dr. Denis Lima do Rosário
Universidade Federal do Pará
Orientador

Prof. Prof. Dr. Eduardo Coelho Cerqueira
Universidade Federal do Pará
Co-orientador

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

Prof. Dr. Marcos César da Rocha Seruffo
Universidade Federal do Pará (Campus
Castanhal)
Membro da Banca

A person who never made a mistake, never tried anything new - Albert Einstein

Agradecimentos

Dedico este trabalho a todos que me acompanharam durante estes anos e que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a sua conclusão.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a Deus por ter possibilitado que eu chegasse até aqui e por ser sempre meu escudo e minha fortaleza. À minha mãe, Rúbia Monteiro Pimentel, que sempre foi meu maior exemplo de mulher determinada e forte a ser seguido. Mãe, sou eternamente grata por seus esforços sem medida para nunca nada me faltar e para me dar a melhor educação possível. Estou aqui por tua causa, te amo!

Ao meu co-orientador Prof. Dr. Eduardo Cerqueira, que enxergou em mim algo que nem eu mesma via e me estimulou a superar meus limites. Professor, vou levar os seus ensinamentos pra vida. Muito obrigada pela confiança, amizade, pela oportunidade e por ter sempre disponibilizado seu tempo, intelecto e recursos a todos no lab. Sou imensamente grata e expresso aqui minha eterna admiração e respeito. Valeu, Dudu!

Ao meu orientador, Prof. Dr. Denis do Rosário, a quem admiro muito pela enorme paciência, liderança e cuidado durante os momentos de maior pressão. Sua orientação e a relação de confiança que estabelecemos foram fundamentais pra que eu conseguisse definir diversos aspectos deste trabalho. Muito obrigada por toda a tolerância, broncas, conselhos e todo o conhecimento valioso repassado.

Ao GERCOM (Grupo de Estudos em Redes de Computadores e Comunicação Multimídia), pela colaboração significativa na minha experiência acadêmica, onde tive a oportunidade de desenvolver este e outros trabalhos. Aos colegas de laboratório, que são pessoas por quem guardo muito carinho e foram solícitos em diversos momentos na troca de conhecimentos e me ajudando com algumas dúvidas.

Aos meus amigos, que nunca desistiram de mim mesmo eu desaparecendo da vida deles e reduzindo minha vida social a praticamente zero em diversos momentos durante estes anos.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo

suporte financeiro. A Microsoft Azure pela infraestrutura de cloud disponibilizada ao nosso laboratório para processamento de simulações. E por fim, mas de forma alguma menos importante, agradeço ao Programa de Pós Graduação em Ciência da Computação PPGCC/UFPA por esta grande oportunidade.

Resumo

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

CABR: Protocolo de Roteamento *Beaconless*, Oportunístico e Adaptativo para Distribuição Multimídia em Flying Ad-Hoc Networks

Orientador: Prof. Dr. Denis Lima do Rosário

Co-orientador: Prof. Dr. Eduardo Coelho Cerqueira

Palavras-chave: roteamento beaconless; FANETs; VANTs; transmissão multimídia; QoE

A experiência do usuário ao assistir vídeos em tempo real deve ser satisfatória mesmo quando transmitidos por redes dinâmicas sob influência de diferentes condições e mudanças topológicas, como as Flying Ad-Hoc Networks (FANETs). Serviços de roteamento para disseminação de vídeo através de FANETs devem ser capazes de adaptar as decisões de roteamento em tempo de execução para preencher os requisitos de Qualidade de Experiência (QoE) sem desperdício de recursos durante a transmissão.

Este trabalho de dissertação apresenta um protocolo de roteamento beaconless, oportunístico e adaptativo projetado para disseminação de vídeos em FANETs com suporte à QoE, levando em consideração múltiplos tipos de informações contextuais como qualidade do link, energia residual, estado do buffer, assim como informação geográfica e mobilidade em um espaço 3D. O protocolo proposto utiliza redes Bayseanas para definir os vetores peso em conjunto com a técnica de tomada de decisões Analytic Hierarchy Process (AHP) para ajustar o grau de importância das informações contextuais com base em seus valores instantâneos. O protocolo também inclui um predicionamento de posição para monitorar a distância entre dois nós, escolhendo os que possuem a melhor conectividade para serem os transmissores, de forma a detectar possíveis falhas de rota e prevenir

a perda de dados.

Para avaliação do desempenho da proposta, foram utilizados os dados coletados após múltiplas transmissões de vídeos em cenários FANETs simulados. Métricas de QoE foram utilizadas para comparar a qualidade dos vídeos obtidos após transmissão pelo CABR em comparação com os transmitidos por outros protocolos FANETs, de forma a provar a vantagem do CABR na entrega de vídeos com qualidade satisfatória e superior ao usuário final.

Abstract

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

CABR: Adaptive Beaconless Opportunistic Routing Protocol for Multimedia Distribution in Flying Ad-Hoc Networks

Advisor: Prof. Dr. Denis Lima do Rosário

Co-advisor: Prof. Dr. Eduardo Coelho Cerqueira

Key words: beaconless routing; FANETs; UAVs; multimedia transmission; QoE

User experience on watching live videos must be satisfactory even under the influence of different network conditions and topology changes, such as happening in Flying Ad-Hoc Networks (FANETs). Routing services for video dissemination over FANETs must be able to adapt routing decisions at runtime to meet Quality of Experience (QoE) requirements without wasting of resources.

This work introduces an adaptive beaconless opportunistic routing protocol for video dissemination over FANETs with QoE support, by taking into account multiple types of context information, such as link quality, residual energy, buffer state, as well as geographic information and node mobility in a 3D space. The proposed protocol takes into account Bayesian networks to define weight vectors and Analytic Hierarchy Process (AHP) to adjust the degree of importance for the context information based on instantaneous values. It also includes a position prediction to monitor the distance between two nodes in order to detect possible route failures and prevent data losses.

In order to evaluate the proposal performance, data collected after multiple video transmission in simulated FANETs scenarios were used. QoE metrics were utilized to compare the quality of obtained videos after transmission through CABR when compared to videos transmitted by other FANETs protocols, in order to prove CABR advantage in delivering videos with satisfactory and superior quality to the final user.

Sumário

1	Introdução	p. 2
1.1	Visão geral	p. 2
1.2	Motivação e desafios	p. 4
1.3	Objetivos	p. 5
1.4	Organização do texto	p. 6
2	Referencial Teórico	p. 7
2.1	Classificação dos Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs)	p. 7
2.2	Enxames (Swarms)	p. 11
2.3	Redes Móveis	p. 13
2.4	Redes Ad-Hoc	p. 15
2.5	Redes Bayesianas	p. 18
2.6	Analytical Hierarchy Process (AHP)	p. 22
2.7	Métricas de avaliação de desempenho para protocolos de roteamento em FANETs	p. 25
2.7.1	Métricas de QoE	p. 25
2.7.1.1	Structural Similarity Index (SSIM)	p. 25
2.7.1.2	Video Quality Measurement Tool (VQM)	p. 26
2.8	Conclusões do capítulo	p. 28
3	Trabalhos Relacionados	p. 29

3.1	Protocolos de Roteamento Oportunístico	p. 29
3.2	Protocolos de Roteamento <i>Beaconless</i>	p. 30
3.2.1	BLR	p. 31
3.2.2	BOSS	p. 32
3.2.3	MRR	p. 33
3.2.4	XLinGO	p. 34
3.2.5	CAOR	p. 36
3.3	Outras propostas utilizadas em FANETs	p. 37
3.3.1	GPSR	p. 37
3.3.2	ECORA	p. 37
3.4	Conclusões do capítulo	p. 39
4	CABR: Protocolo de Roteamento <i>Beaconless</i>, Oportunístico e Adaptativo para Distribuição Multimídia em Flying Ad-Hoc Networks	p. 42
4.1	Arquitetura	p. 43
4.1.1	Encaminhamento Baseado em Contenção utilizando o DFD	p. 44
4.1.2	Parâmetros de Contexto para Cálculo do DFD	p. 47
4.1.2.1	Qualidade do Link	p. 47
4.1.2.2	Estado do Buffer	p. 48
4.1.2.3	Energia Residual	p. 49
4.1.2.4	Índice de Conectividade	p. 49
4.1.3	Grau de Importância dos Parâmetros de Contexto	p. 51
4.1.4	Esquema de Adaptação em Tempo de Execução	p. 54
4.1.5	Modo de Rota Persistente	p. 55
4.2	Conclusões do capítulo	p. 56
5	Avaliação de desempenho	p. 57
5.1	Descrição da simulação	p. 57
5.2	Análise dos resultados	p. 59
5.3	Conclusões do Capítulo	p. 64
6	Conclusão	p. 65

Referências	p. 67
-------------------	-------

Lista de Abreviaturas

FANETs	Flying Ad-Hoc Networks
VANTs	Veículos Aéreos Não Tripulados
DoD	Department of Defense
single-UAV	Single Unmanned Aerial Vehicle
multi-UAV	Multiple Unmanned Aerial Vehicle
IoT	Internet of Things
QoE	Quality of Experience
DFD	Dynamic Forwarding Delay
AHP	Analytic Hierarchy Process
EUROUVS	European Association of Unmanned Vehicle Systems
VTOL	Vertical Take Off and Landing
DARPA	U.S. Defense Advanced Research Projects Agency
CR	Close Range
SR	Short Range
MR	Medium Range
LR	Long Range
EN	Endurance
MALE	Medium Altitude Long Endurance
HALE	High Altitude Long Endurance
NASA	North American Space Agency
MANETs	Mobile Ad-Hoc Networks
VANETs	Vehicular Ad-Hoc Networks
RB	Rede Bayesiana
TPC	Tabelas de Probabilidade Condicional
PSNR	Peak Signal-to-Noise Ratio
MSE	Mean Square Error

SSIM	Structural Similarity Index
VQM	Video Quality Measurement Tool
BLR	Beacon-less Routing Algorithm
BOSS	Beaconless On-demand geographic routing Strategy
PRR	Packet Reception Ratio
PPA	Positive Progress Area
NPA	Negative Progress Area
DDFD	Discrete Dynamic Forwarding Delay
CSA	Common Sub Area
NSA	Number of Sub Areas
MRR	Multipath Routeless Routing protocol
XLinGO	Cross-layer Link quality and Geographical-aware beaconless OR protocol
ack	Mensagem de confirmação de recebimento de pacote
CAOR	Context-aware Adaptive beaconless OR protocol
GPSR	Greedy Perimeter Stateless Routing
ECORA	Enhanced Connectivity for Robust Multimedia Transmission in UAV Networks
LQE	Link Quality Estimator
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SNR	Signal to Noise Ratio
FIFO	First In First Out
GPS	Global Positioning System
MD	Mineração de Dados
GoP	Group of Pictures
QoS	Quality of Service

Lista de Símbolos

P	Probabilidade em Redes Bayesianas
λ_{max}	Autovalor máximo de uma matriz
μ	Intensidade média de luminância de um frame
σ	Raíz quadrada das variâncias entre vetores de contraste de frames
σ_{xy}	Coefficiente de correlação estrutural entre frames
$S - T_i$	Sub-região espaço-temporal em uma sequência de vídeo
q_i	Parâmetro de qualidade obtido através da comparação de características em sequências de vídeo
f	Característica extraída de um vídeo a ser analisado
$S - T$	Região espaço-temporal em uma sequência de vídeo
DFD	Tempo de contenção em um nó
DFD_{max}	Valor máximo que pode ser atribuído ao DFD em um nó
r	Raio de transmissão de um nó
p	Progresso de um nó em relação ao destino
N_i	Um determinado nó, personagem do roteamento
$dist$	Distância de um ponto a outro
D	Nó destino
N_S	Nó fonte
N_R	Nó candidato intermediário
Φ	Coefficiente de Multiplicação (Peso)
RS	Sensibilidade de rádio de um nó
sp	Intensidade do sinal de rádio
β	Distância de um nó vizinho até a linha imaginária traçada entre nó fonte e nó destino
α	Linha imaginária que conecta um nó fonte a um nó destino
EN_{ini}	Energia inicial em um nó

EN	Energia atual no nó
δ	Constante de padronização de valores
LQ	Qualidade do link em um nó
BS	Estado do buffer em um nó
LV	Duração do link entre dois nós
$param$	Determinado parâmetro considerado nos protocolos para tomadas de decisão de roteamento
IC	Índice de Conectividade entre par de nós
TEx	Tempo de Expiração do enlace entre nós
$DirI$	Direção de Interceptação de um nó
$DisI$	Distância de Interceptação de um nó
N_F	Nó encaminhador atual
$Nb(N_i) \subset V$	Wizinhos de um nó N dentre um conjunto de nós V
(BS)	Tamanho da fila no buffer de um nó
BS_{max}	Capacidade máxima de fila no buffer de um nó
BS_{tam}	Tamanho atual de uma fila no buffer de um nó
$nFlow$	Números de fluxos de vídeos transmitidos pelo nó
$dataRate_{in}$	Fluxo de entrada de pacotes de vídeo
$dataRate_{out}$	Fluxo de saída de pacotes de vídeo
EN_{tx}	Energia necessária para efetuar todas as transmissões
EN_v	Energia necessária para que o nó efetue vôo para a base
$EN_{pkt_{tx}}$	Energia necessária para efetuar a transmissão de um pacote
N_{vel}	Velocidade de um nó
EN_{fly}	Energia necessária para que o nó se movimente
$H(Y X)$	Entropia Condicional H de um conjunto de variáveis Y sobre uma variável X
c	Critério analisado no AHP

Lista de Figuras

Figura 1	Mini VANTs VTOL e Asas Fixas	9
Figura 2	MQ1-Predator - VANT Tático MALE (U.S. Air Force, 2010a)	10
Figura 3	Global Hawk - VANT Estratégico HALE (Northrop Grumman, 2015)	10
Figura 4	Helios - VANT Estratégico HALE da NASA (AeroVironment, Inc., 2015b)	11
Figura 5	Arquiteturas de Comunicação em Redes de VANTs (FREW; BROWN, 2009)	14
Figura 6	MANETs, VANETs e FANETs	15
Figura 7	Uma RB típica, mostrando a topologia e também as tabelas de probabilidade condicional, adaptado de (HECKERMAN, 1997)	21
Figura 8	Sistema de medição de SSIM (WANG et al., 2004)	26
Figura 9	Diagrama de funcionamento do VQM, adaptado de (PINSON; WOLF, 2004)	27
Figura 10	Área de Progresso do BOSS, dividida em sub-áreas (SANCHEZ; MARIN-PEREZ; RUIZ, 2007)	33
Figura 11	Encaminhamento de dados através da Área de Encaminhamento do MRR	

(AL-OTAIBI; SOLIMAN; ZHENG, 2011)	34
Figura 12 Encaminhamento de dados utilizando áreas de Progresso Positiva (PPA) e Negativa (NPA) no XLinGO (ROSÁRIO et al., 2014a)	35
Figura 13 Formação de rota no GPSR (KARP; KUNG, 2000)	38
Figura 14 Arquitetura do ECORA (COSTA, 2014)	38
Figura 15 Visão Geral CABR	44
Figura 16 Diagrama de Atividades do Cálculo do DFD em um Nó	46
Figura 17 Função Sigmóide	48
Figura 18 Rede Bayesiana	53
Figura 19 Estrutura de formação de cenários para simulação	58
Figura 20 Nível de Qualidade de Vídeo para 1 nó fonte, em cenários de 30 e 40 nós	60
Figura 21 Nível de Qualidade de Vídeo para 2 nós fonte, em cenários de 30 e 40 nós	60
Figura 22 Nível de Qualidade de Vídeo para 3 nós fonte, em cenários de 30 e 40 nós	61
Figura 23 SSIM atingido por frame durante a transmissão do vídeo	62
Figura 24 VQM atingido por frame durante a transmissão do vídeo	62
Figura 25 Frames do vídeo UAV1 retirados das sequências de vídeo transmitidas por cada protocolo	63
Figura 26 Porcentagem de Frames Perdidos por Protocolo	64

Lista de Tabelas

Tabela 1	Especificações de VANTs segundo suas aplicações e categorias	8
Tabela 2	Diferenças entre Redes Móveis	14
Tabela 3	Comparação entre MANETs, VANETs e FANETs (BEKMEZCI; SAHINGOZ; TEMEL, 2013), adaptado	18
Tabela 4	Escala de Importância para o AHP (SAATY, 2008)	23
Tabela 5	Valores de <i>threshold</i> considerados no CAOR (ZHAO et al., 2014)	37
Tabela 6	Comparação entre Protocolos de Roteamento	41
Tabela 7	Média e desvio padrão para os parâmetros analisados	51
Tabela 8	Matriz de Comparação a partir das Inferências Realizadas em RB	54
Tabela 9	Importância Contextual entre Pares CABR	54
Tabela 10	Thresholds CABR	55
Tabela 11	Parâmetros de Simulação	59

CAPÍTULO 1

Introdução

Este capítulo introduz os conceitos sobre Flying Ad-Hoc Networks (FANETs), ilustrando os principais desafios existentes para a elaboração de propostas a nível de roteamento e aplicações, sumariza as contribuições essenciais e apresenta o conteúdo dos próximos capítulos deste trabalho de dissertação.

1.1 Visão geral

Com a crescente popularização dos Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), suas aplicações vêm sendo amplamente estudadas e difundidas. Os VANTs existem em uma gama de categorias e formas, sendo bastante úteis em atividades que normalmente, com o fator humano envolvido, são de custo econômico mais elevado, podem submeter tal mão-de-obra a riscos de integridade física ou, ainda, são mais onerosas. Por exemplo, a Amazon, companhia americana multinacional de varejo, causou grande entusiasmo nas redes sociais ao divulgar um vídeo do seu protótipo de um novo serviço de entrega: o Amazon PrimeAir. Tal serviço contará com VANTs de pequeno porte que farão entregas de pacotes, cobrindo curtas distâncias em até 30 minutos (Amazon.com, Inc., 2014).

O Departamento de Defesa Norte Americano (DoD), órgão que mais investe no estudo e compra de VANTs, divulgou seu portfólio e seus recentes estudos em VANTs em conjunto com um guia do que é esperado em avanços neste campo por parte da indústria e da pesquisa nas próximas décadas (CAMBONE, 2005). Uma das capacidades que é mencionada como de grande prioridade em avanços é a autonomia dos VANTs, que varia em uma escala de “remotamente controlados” a “enxames de veículos completamente independentes”. Segundo o DoD, o futuro dos VANTs é a evolução de apenas robôs operados à distância para máquinas independentes, capazes de tomar decisões em grupo de forma autônoma para executar uma dada tarefa. Ainda segundo este mesmo documento,

a principal função de sensoriamento dos veículos é para captura de imagens de vídeo comuns, infravermelho e radar, seguida por outros tipos de sensores; e as principais missões que os VANTs são usados são para descoberta de áreas, imagens em alta resolução de um determinado local, identificação de locais e estimativa de danos.

Os VANTs podem atuar como fontes valiosas nestes domínios de aplicações. Equipados com câmeras de vídeo, estes veículos são capazes de prover uma visão geral da área e permitir o estudo imediato da dimensão da situação do ambiente através da transmissão de vídeos em tempo real (QUARITSCH et al., 2010). Geralmente, nestes cenários, as estruturas fixas podem não estar mais disponíveis ou pode ser perigoso e dispendioso deslocar recursos humanos para estudo do local sem prévio conhecimento dos danos ocorridos. Com apenas um único VANT, contudo, não é possível cobrir um terreno de grandes dimensões bem como prover transmissão em tempo real de vídeos de toda a área monitorada, o que acaba não oferecendo vantagens à operação. Os chamados sistemas single-UAV utilizam apenas um VANT para realização destas coletas de dados. Além do mais, tais sistemas apresentam certas desvantagens em relação aos sistemas compostos por múltiplos VANTs, os multi-UAV, já que a capacidade de cobertura e operação de um único VANT é limitada.

A coordenação e cooperação entre múltiplos VANTs possibilita a criação de sistemas que vão além da capacidade de um único, também conhecidos como Enxames (em inglês, *Swarms*), trazendo vantagens à missão e uma gama de opções de operabilidade. Um sistema com múltiplos VANTs proporciona, por exemplo, escalabilidade à aplicação já que pode cobrir uma área de maior tamanho, onde cada VANT pode ficar responsável por colher informações de uma parte da área total desejada, destacando o aspecto colaborativo dos nós. Tal fator contribui também para a diminuição do tempo de conclusão da missão já que as tarefas podem ser distribuídas entre os nós e realizadas paralelamente em prol de um objetivo. Também, se houver alguma dificuldade técnica em um VANT, a rede pode reorganizar-se e dar prosseguimento à missão; o que não acontece em uma rede single-UAV, onde a missão possivelmente falha nestes casos. Estes fatores evidenciam a característica de resiliência nestas redes, que sobrevivem mesmo com a perda de nós e se reorganizam para garantir a confiabilidade da missão (BÜRKLE; SEGOR; KOLLMANN, 2011).

Por isso, o uso de múltiplos VANTs em Enxames para a formação de FANETs é uma tendência frente ao aumento da necessidade de sistemas autônomos e da implementação mais rápida de aplicações em diversos campos (EZEQUIEL et al., 2014). Estes sistemas fornecem a escalabilidade necessária para situações emergenciais e outros tipos de aplicações como observadas, por exemplo, em cenários de monitoramento ambiental, gerenciamento pós-desastres, controle de fronteiras, video surveillance, entretenimento, e outros (BEKMEZCI; SAHINGOZ; TEMEL, 2013).

Além disso, a proliferação de conteúdo multimídia e a demanda de novos serviços de áudio e vídeo para aplicações voltadas à Internet das Coisas (IoT) faz parte de uma nova era de disseminação de conteúdo baseada em informação multimídia. Vídeos são dados importantes para auxiliar na avaliação da proporção de danos e eventos ocorridos em uma

área de interesse, pois fornecem informações mais valiosas sobre o ambiente monitorado. Em casos de desastres ambientais ou civis, por exemplo, dados de vídeos contribuem para que as equipes de resgate em solo possam, de forma eficaz, traçar planos de ação coerentes com base em informações visuais detalhadas, mais ricas que simples mensagens de texto ou outros tipos de dados (PARK; LEE; GERLA, 2010).

Contudo, é fundamental que os vídeos capturados cheguem às equipes com um mínimo de qualidade para que o usuário tenha uma percepção consistente dos fatos. Para que isso seja possível, no entanto, é preciso considerar os desafios da transmissão de dados através de FANETs com transmissões de vídeos simultâneas, tais como congestionamento, estouros de buffer (buffer overflow), perda/duplicação de pacotes e atraso no fluxo. Tais fatores contribuem para distorções severas nos vídeos entregues (pixelização, frames congelados, ghosting, etc), diminuindo a experiência do usuário ao assistí-los.

O protocolo de roteamento utilizado influencia diretamente na entrega dos vídeos, e conseqüentemente na sua qualidade final. O serviço de roteamento deve, então, encontrar um conjunto de rotas confiáveis entre a fonte e o destino através da seleção de bons nós encaminhadores no trajeto, prevenindo a seleção daqueles com alta carga de tráfego ou baixa energia, o que pode ocasionar quebra de rotas e conseqüentemente perda de pacotes. Deve também adaptar-se às mudanças de topologia e da rede, de modo a recuperar-se e manter sempre a qualidade do vídeo com um nível aceitável, provendo robustez em cenários com características tão dinâmicas. Desta forma é possível prover a entrega de vídeos ao usuário com suporte a Qualidade de Experiência (QoE).

1.2 **Motivação e desafios**

Um dos principais desafios no roteamento de pacotes em FANETs é como mitigar os efeitos da mobilidade dos VANTs em um espaço 3D de forma a evitar falhas de comunicação, atraso e perda de pacotes durante a transmissão de vídeos (SAHINGOZ, 2013). A característica mobilidade tridimensional dos VANTs agrava os efeitos negativos de mobilidade dos nós, quebrando links de comunicação e impondo sérias restrições na entrega de vídeos em tempo real, com suporte a QoE em FANETs.

Neste contexto, serviços de distribuição de vídeos em tempo real requerem transmissão de vídeos com uma baixa taxa de perda de pacotes, atraso fim-a-fim e jitter toleráveis, para suportar a disseminação desses vídeos para a base com suporte a QoE. O conteúdo multimídia deve ser entregue com nível de qualidade aceitável do ponto de vista do usuário, uma vez que os vídeos possuem características específicas e prioridades diferentes de frames que, ao serem perdidos, podem causar severas distorções. Tais particularidades devem ser consideradas no projeto de protocolos de roteamento voltados para estas redes, já que a estratégia de roteamento deve considerar a natureza da rede, da aplicação e as características próprias do cenário (EHSAN; HAMDAOUI, 2012).

Protocolos de roteamento existentes para FANETs estabelecem rotas fim-a-fim, levando em consideração informações existentes armazenadas em tabelas de roteamento.

Porém, a natureza dinâmica dos VANTs causa mudanças frequentes na topologia da rede, o que resulta em atualizações constantes nas tabelas, inconsistência ou falha de rotas. Desta maneira, os protocolos de roteamento oportunístico *beaconless* agem de uma maneira completamente distribuída na escolha dos nós que farão parte da rota e farão o encaminhamento dos pacotes (HSU; LIU; SEAH, 2011). Neste modelo, os nós não necessitam estabelecer previamente as rotas para transmissão de dados, evitando troca frequente de mensagens de controle (beacons) para manutenção ou descoberta de rotas, poupando recursos escassos de rede como largura de banda e energia.

Protocolos de roteamento oportunístico *beaconless* utilizam o conceito de Dynamic Forwarding Delay (DFD), onde os nós calculam um curto período de espera (ou seja, o DFD) antes de encaminhar o pacote recebido (HEISSENBÜTTEL et al., 2004). O valor do DFD pode ser calculado a partir de uma função multi-critérios baseada em múltiplas informações de contexto, tais como energia, distância, ou qualquer outra informação de contexto que seja considerada relevante para a tomada de decisão. Em um roteamento ciente de contexto, o algoritmo utiliza as informações contextuais da rede e dos nós para selecionar suas rotas e executar suas estratégias de encaminhamento. Neste trabalho, contexto refere-se a qualquer informação que impacte na decisão de roteamento para entrega de vídeos em FANETs com suporte a QoE.

Soluções que levem em consideração características múltiplas do contexto são mais interessantes porque abrangem diversas variáveis, tornando o protocolo mais confiável e realista. Contudo, é importante primeiramente analisar qual dessas informações de contexto tem mais impacto na decisão de encaminhamento.

Além disso, computar o DFD com o mesmo grau de importância para cada métrica é irrealista e torna difícil lidar com as mudanças frequentes de contexto durante a transmissão multimídia. Neste aspecto, o Analytic Hierarchy Process (AHP) pode auxiliar já que é uma ferramenta de análise que busca prover soluções ótimas quando múltiplos parâmetros estão envolvidos em uma determinada tomada de decisão, como os contextos integrados no processo de roteamento.

1.3 **Objetivos**

Este trabalho apresenta um protocolo de roteamento oportunístico adaptativo e ciente de contexto, denominado de CABR, que tem como objetivo entregar múltiplos fluxos de vídeos simultâneos transmitidos por FANETs com suporte a QoE. No CABR, múltiplos tipos de informação de contexto são consideradas para computar o DFD, que podem tanto ser adquiridas localmente (energia do nó, estado do buffer, localização geográfica) ou extraídas dos pacotes recebidos (qualidade do link e informação de mobilidade dos nós vizinhos). O protocolo também conta com um módulo de predição de mobilidade para monitorar a distância entre um dado nó e um possível nó encaminhador e detectar previamente possíveis falhas de rota.

Os objetivos deste trabalho compreendem:

- Realização de levantamento sobre soluções a nível de roteamento para transmissão de vídeos em FANETs.
- Desenvolvimento e implementação de um protocolo de roteamento *beaconless* oportunístico que considere múltiplos parâmetros de contexto da rede em suas tomadas de decisão durante o roteamento, a fim de adaptar suas escolhas e entregar vídeos com suporte a QoE ao usuário.
- Utilização de Redes Bayesianas como modelo de inteligência computacional para análise e correlação dos dados obtidos, de forma a analisar a importância de cada parâmetro de contexto.
- Utilização de um método analítico de tomada de decisão multicritério para definição do vetor peso e para ajuste de grau de importância de cada parâmetro de contexto em tempo de execução.
- Análise do desempenho do protocolo através de repetidas simulações executadas em um simulador de eventos discretos, em cenários com diferentes densidades, mobilidade e números de transmissões de vídeo.
- Análise dos benefícios obtidos na qualidade do vídeo através da transmissão pelo protocolo CABR e por outros protocolos difundidos em FANETs, avaliando o seu desempenho utilizando métricas de QoE e comparando os resultados dos protocolos.

1.4 Organização do texto

O restante do documento está dividido seguindo o ordenamento descrito abaixo:

- Capítulo 2: Apresenta um estudo sobre os aspectos importantes relacionados aos VANTs e às FANETs, como as aplicações, a estrutura, a arquitetura de comunicação e as diferentes categorias de VANTs. Além disso, descreve as técnicas utilizadas para tomada de decisão no protocolo.
- Capítulo 3: Apresenta algumas soluções existentes em roteamento em FANETs. São descritas as principais vantagens e desvantagens de todas as soluções apresentadas no capítulo.
- Capítulo 4: Detalha a proposta do trabalho, sua arquitetura e os módulos que a compõem.
- Capítulo 5: Apresenta o ambiente de simulação, os cenários considerados e a avaliação do desempenho da proposta.
- Capítulo 6: Descreve as considerações finais deste trabalho, bem como os possíveis trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

Referencial Teórico

Neste capítulo, será apresentada uma visão geral sobre as redes FANETs quanto às características da rede, as teorias principais que a circundam e os benefícios fornecidos pelo seu uso. Além disso, serão apresentados alguns exemplos de sistemas que fazem uso deste tipo de rede e onde são aplicados. As arquiteturas de comunicação e as configurações de comunicação entre os elementos que compõem a rede serão abordadas. E, por fim, as ferramentas e teorias que serviram de apoio para auxiliar nas tomadas de decisão do protocolo: AHP e Redes Bayesianas.

A nível de informação e nomenclatura, ao longo do texto, “Máquina” é definida como uma entidade capaz de executar atividades mecânicas (transferência de matérias, movimentação espacial); “Autômato” é definido como uma entidade capaz de executar atividades informacionais (transferência e processamento de informações); e “Robô” é definido como uma entidade capaz de executar ambas as atividades mecânicas e informacionais (um robô é tanto um autômato quanto uma máquina) (BENI; WANG, 1993). Por isso, os VANTs citados ao longo deste trabalho podem também ser classificados como robôs.

2.1 Classificação dos Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs)

Um VANT é um veículo aéreo capaz de alçar vôo sem a necessidade de um operador humano à bordo. Pode ser controlado remotamente, de maneira semi-autônoma, autônoma ou uma combinação de ambos, de forma a executar vários tipos de tarefas, dependendo do propósito da aplicação. Existem diversas atribuições para estes veículos, que possuem diferentes capacidades e características em resposta às diferentes necessidades

dos usuários.

Muitos grupos propuseram a criação de padrões de referência para os VANTs. A Associação Europeia de Sistemas de Veículos Autônomos (EUROUVS) organizou uma classificação destes veículos com o propósito de fazer uma compilação dos grupos e categorias existentes baseando-se em alguns parâmetros considerados fundamentais, como: altitude de vôo, autonomia de bateria, velocidade, peso máximo, tamanho, etc.

Com relação a diferenças de *design*, existem dois grupos de VANTs: os Vertical Take Off and Landing (VTOL), veículos de decolagem e pouso vertical com asas giratórias; e os de Asas Fixas, com pouso e decolagem horizontal com necessidade de pista. Cada grupo oferece diferentes capacidades durante o vôo. Os de asas fixas, por exemplo, podem voar por maiores distâncias mas precisam de espaço adicional e pista de pouso ou equipamento de lançamento adequados para decolagem. Porém, são incapazes de parar no ar e sobrevoar uma região, o que é imprescindível em algumas aplicações (Aeryon Labs, Inc., 2014). Os VTOL possuem menos autonomia de vôo mas podem ser lançados de qualquer ponto sem necessidade de equipamentos adicionais e também podem sobrevoar áreas e fazer paradas no espaço aéreo, semelhante à maneira de operação dos helicópteros. A Tabela 1 identifica as três principais categorias, suas sub-categorias e as quatro principais características e especificações técnicas dos VANTs.

Tabela 1: Especificações de VANTs segundo suas aplicações e categorias

	Categoria	Peso (kg)	Altitude Máxima (m)	Autonomia Energética (h)	Alcance do Link (km)
Micro/Minis	Micro	0.1	250	1	<10
	Mini	<30	150-300	<2	<10
Táticos	Próximo/Curto Alcance (SR)	150-200	3000	2-6	10-70
	Médio Alcance (MR)	150-500	3000-5000	6-10	70-200
	Longo Alcance (LR)	-	5000	6-13	200-500
	Auton. Energética (EN)	500-1500	5000-8000	12-24	>500
	MALE	1000-1500	5000-8000	24-48	>500
Estratégicos	HALE	2500-12500	15000-20000	24-48	>2000

- Micro/Mini VANTs: É a categoria formada pelas menores plataformas e que voam em atitudes mais baixas (abaixo de 300 metros). Designs desenvolvidos recentemente para esta classe de dispositivos têm priorizado a criação de veículos que sejam implementáveis em diversos tipos de cenários, incluindo áreas urbanas ou mesmo no interior de construções e que sejam capazes de carregar pequenos dispositivos de gravação/sensoreamento e pequenas cargas. Tais capacidades, aliadas ao baixo custo econômico e facilidade de implementação, tornam esta a categoria favorita para aplicações comerciais e civis envolvendo vigilância e reconhecimento de ambientes, sejam estes urbanos ou não.

A Agência de Projetos de Pesquisa Avançada de Defesa (DARPA), estabeleceu alguns critérios que devem ser seguidos pela indústria na fabricação de modelos de veículos nesta categoria, para aquisição institucional. Porém, nem todos os veículos preenchem tais requisitos seja por condições ambientais ou mesmo tecnologia disponível.

Armazenamento de energia e dispositivos de propulsão ainda continuam sendo os maiores desafios nesta categoria. De acordo com suas especificações, podem enquadrar-

se nesta categoria os VANTs abaixo de 30kg, com altitude de vôo entre 150 e 300 metros e autonomia de bateria de até duas horas.



(a) Dji Phantom 2 (Drone Central, 2015) (b) DragonEye (AeroVironment, Inc., 2015a)

Figura 1: Mini VANTs VTOL e Asas Fixas

- Táticos: Esta categoria inclui plataformas mais pesadas que voam em altitudes mais altas (de 3000 a 8000 metros). Diferentemente dos micro/mini UAVs, que são mais utilizados para aplicações comerciais e civis, VANTs táticas são usadas primordialmente em aplicações militares. De acordo com seus critérios, VANTs táticas podem ser divididas em seis subcategorias: Próximo (CR) ou Curto Alcance (SR), Médio Alcance (MR), Longo Alcance (LR), Autonomia Energética (EN) e Média Altitude Longa Autonomia Energética (MALE), onde cada uma possui características próprias e podem ser utilizadas conforme os requisitos da aplicação.

A falta de sistemas de comunicação via satélite acoplados nestes veículos limita as distâncias por onde os VANTs de curto e médio alcance podem operar. Esta falta deve-se, principalmente, a limitações de tamanho, peso e custo econômico deste tipo de tecnologia para este tipo de VANT. VANTs de longo alcance, por outro lado, podem e devem usar hardware mais avançado para atingir seus objetivos de missão. Normalmente isso significa incorporar um link satélite ou alguma outra plataforma para atuar como *relay* para contornar o problema de comunicação existente entre a estação terrestre e o veículo, causado pela curvatura natural da Terra.

VANTs da categoria MALE possuem *design* mais aerodinâmico e sistemas de controle mais avançados graças aos seus altos requisitos de operação. O MQ-1 Predator (Figura 2), por exemplo, projetado e construído pela General Atomics Aeronautical Systems, pode operar por mais de 40 horas, tem alcance de 3700km e foi utilizada em missões no Afeganistão e outras áreas de conflito que poderiam expor pilotos humanos a riscos (U.S. Air Force, 2010b). O MQ-1 Predator é considerado um dos sistemas de VANTs de maior sofisticação. Contudo, sua aplicação é essencialmente militar e, para tais propósitos, são necessários veículos de grandes dimensões e alta capacidade.

- Estratégicos: Até este ponto, foi possível observar que VANTs que alcançam maiores altitudes tendem a ser plataformas mais pesadas com maior alcance de rádio e autonomia de bateria. De fato, isto é facilmente deduzível, visto que grandes plataformas podem carregar maiores equipamentos que tornem possível atingir maiores



Figura 2: MQ1-Predator - VANT Tático MALE (U.S. Air Force, 2010a)

distâncias, voando por mais tempo sem grandes restrições de energia. Por isso, grandes plataformas são normalmente utilizadas para aplicações que necessitam de veículos que alcancem grandes altitudes, tenham autonomia energética para isso e raio de longo alcance. É o caso dos veículos Longa Altitude e Longa Autonomia Energética (HALE), que são os maiores e mais equipados das categorias. VANTs HALE são veículos estratégicos, geralmente de aplicação militar, com pesos que variam de 2500 a 1200kg, voam a altitudes máximas de 20000 metros, com pouso e decolagem automáticas. A qualquer momento durante a missão, a estação de controle em terra pode controlar o veículo. O Global Hawk (Figura 3), da Northrop Grumman, com 35 horas de autonomia, é provavelmente o mais conhecido VANT da categoria HALE. Como exemplo de HALE de aplicação não-militar, existe o Helios (Figura 4) da Agência Nacional Norte-Americana (NASA), alimentado via sistemas elétricos e painéis solares. Tal veículo atingiu altitude recorde de 30000m. Este veículo é utilizado para observação da Terra, mapeamento e monitoramento atmosférico.



Figura 3: Global Hawk - VANT Estratégico HALE (Northrop Grumman, 2015)



Figura 4: Helios - VANT Estratégico HALE da NASA (AeroVironment, Inc., 2015b)

2.2 Enxames (Swarms)

O comportamento direcionado à tarefas executadas por grupos de agentes é comum na natureza. Interações entre organismos naturais como pássaros, formigas, abelhas, primatas, peixes e lobos têm sido examinadas pela Biologia e Etologia e servem como inspiração para o desenvolvimento de arquiteturas de robôs e estratégias para suas formas de comunicação (BROOKS, 1995). Por que múltiplos robôs poderiam ser usados para a execução de determinada tarefa? Apesar de a maioria dos sistemas envolvendo dispositivos robóticos móveis envolverem um único robô na execução de uma dada tarefa, alguns pesquisadores concluíram que utilizar grupos de robôs mais simples e menores cooperando entre si para desenvolver uma tarefa é mais simples que utilizar um grande, caro e complexo robô (DUDEK et al., 1996).

Exploração de áreas afetadas por desastres físicos ou químicos, empurrar objetos pesados ou limpeza de resíduos tóxicos foram algumas das principais tarefas inicialmente atribuídas a robôs e que necessitam destes até hoje, seja por possuírem certos atributos superiores, para poupar recursos ou evitar a exposição de humanos a riscos na realização de tarefas excepcionalmente perigosas ou insalubres (PARKER, 1995).

Sistemas de VANTs podem operar onde humanos não podem. Eles podem trabalhar dia e noite para conclusão de uma tarefa, alcançar áreas remotas em ambientes austeros, e prover uma melhor “consciência situacional” (*situation-awareness*, do inglês) do evento durante missões complexas. Cenários de aplicação para VANTs podem ser basicamente divididos entre militares e civis. Algumas das possíveis aplicações são: fins agrícolas, vigilância policial, controle de poluição, monitoramento ambiental, combate a incêndios, inspeção de danos, monitoramento de linhas elétricas e hidráulicas, vigilância por vídeo, vigilância de fronteiras, inspeção de desastres naturais e detecção de minas (VALAVANIS, 2008).

Para aplicações civis, no caso de um grande incidente existe a necessidade de um sistema de implementação imediata para dar suporte às equipes de resgate na tomada de decisões. A busca por sobreviventes, corpos e estimativa dos estragos pode ser mais facilmente concluída com uma rede entre um grupo de equipamentos capazes de sensorar a região obtendo dados de vídeo ou outros. Apenas na minoria dos casos, as equipes podem contar com uma infraestrutura de sensores previamente existente e há uma chance signifi-

cativa de tais sensores terem sido totalmente ou parcialmente destruídos pelo evento. Um sistema de sensores móveis, proporcionado por um enxame de VANTs, pode rapidamente ser deslocado para o local e preencher esta necessidade, especialmente em casos críticos como este, onde o tempo é um fator essencial (BÜRKLE; SEGOR; KOLLMANN, 2011).

Em aplicações que usam apenas um VANT, por exemplo, as chamadas single-UAV mencionadas anteriormente, cada nó em solo pode se comunicar facilmente com um UAV e estabelecer uma topologia em estrela utilizando o VANT como ponto de acesso entre redes ou equipamentos isolados, sem comunicação disponível. Contudo, sistemas single-UAV tem alguns problemas desafiadores em relação a área de transmissão e interferência. Soluções para estes problemas geralmente envolvem o uso de hardware específico como antenas unidirecionais, porém as melhorias são limitadas e não são completamente satisfatórias. Utilizar veículos com hardware mais poderoso com processadores, sensores e hardware de comunicação melhor é, claro, uma boa alternativa. Contudo, tais características estão presentes em VANTs maiores que são não somente maiores e mais pesados, apresentando perigo à vida humana em caso de falhas, mas também apresentam custo econômico mais elevado.

Veículos menores, no entanto, possuem menor custo e têm se tornado mais populares no meio acadêmico e em aplicações comerciais. Eles são pequenos em tamanho, não causam danos significativos em caso de falhas, podem ser utilizados em vários tipos de missões e são mais difíceis de detectar em casos de aplicações de segurança, além de poderem voar em altitudes mais baixas, ser transportados para diferentes áreas e lançados por um indivíduo em qualquer tipo de terreno sem necessidade de pista de decolagem ou dispositivo de lançamento. Mas, apesar de todas as vantagens, estes veículos de menor porte também possuem diversas limitações: energia, sensoreamento, hardware de comunicação e computação. Tais limitações, contudo, podem ser contornadas a partir da formação de times ou, como denominados neste texto, enxames.

Entre as principais vantagens de sistemas multi-UAV, se pode citar:

- Escalabilidade: Especialmente em missões de busca ou cobertura de áreas, múltiplos VANTs podem cobrir uma área de maior tamanho em um menor período de tempo (MORSE; ENGH; GOODRICH, 2010).
- Resiliência: Se um dos VANTs apresentar algum defeito, a missão continua com a reorganização dos outros nós. Tal aspecto não seria possível em um sistema com apenas um veículo, onde a missão falharia.
- Tempo de Missão: Múltiplos VANTs podem paralelizar as atividades diminuindo assim o tempo total de missão (YANMAZ et al., 2010).

2.3 Redes Móveis

Redes formadas por VANTs podem ser classificadas em quatro tipos principais de arquiteturas de comunicação: link direto, satélite, celular e *ad-hoc* (FREW; BROWN, 2009). Após conceituá-las, suas principais diferenças são destacadas na Tabela 2.

- **Link Direto/Satélite:** Cada veículo comunica-se diretamente com uma estação de controle ou um satélite, por meio de um enlace único (Figura 5a e 5b). A comunicação entre os VANTs ocorre de maneira centralizada através de um modelo de topologia em estrela, centralizando o controle da rede em um ponto. Entre suas limitações, pode-se destacar o fato de que cada veículo deve ser equipado com hardwares mais sofisticados e conseqüentemente de custo elevado para comunicação com uma estação base ou um satélite. A confiabilidade da informação também é outra limitação por conta das condições dinâmicas do ambiente, movimento dos nós e estrutura do terreno, de modo que os VANTs podem não manter o link de comunicação. Outro problema é a restrição de alcance de rádio, já que se um VANT sair da área de cobertura da infraestrutura central, ele se desconecta da rede.
- **Celular:** Utiliza uma infraestrutura semelhante à utilizada em sistemas de telefonia móvel (Figura 5c). Esta arquitetura apresenta algumas vantagens que podem proporcionar uma entrega confiável 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. Também há a melhor distribuição da largura de banda, de forma que esta pode ser reutilizada ou reajustada de acordo com a demanda. A arquitetura celular, porém, tem um alto custo de implantação, em razão de dispositivos como torre, local e equipamentos de rádio terem custos muito elevados.
- **Ad-Hoc:** A arquitetura *ad-hoc* (Figura 5d) é uma arquitetura descentralizada onde os nós possuem a mesma funcionalidade e responsabilidade no que diz respeito ao repasse de informações pela rede. Cada VANT pode atuar como um nó retransmissor, a fim de encaminhar os dados até o destino. Desse modo, esta abordagem descentralizada oferece uma rede mais flexível e dinâmica, onde os nós não dependem de um ponto central para realizar a transmissão dos dados. Além disso, ela permite a implantação de redes confiáveis de baixo custo mesmo em regiões de difícil acesso. Possui como limitação, porém, a baixa confiabilidade na entrega de dados quando comparada aos outros modelos de rede existentes. Esta arquitetura, no entanto, é promissora para aplicações compostas por VANTs, em que a infraestrutura não está disponível e há a necessidade de que os nós operem de maneira cooperativa para conclusão das tarefas. Suas limitações devem ser contornadas com a utilização de protocolos de comunicação adequados que implementem mecanismos de controle que considerem os desafios existentes.

Na última década, as capacidades e aplicações dos VANTs desenvolveram-se rapidamente, e seu uso nas áreas militares e civis vem se tornando extremamente popular

Tabela 2: Diferenças entre Redes Móveis

Tipo de Rede Móvel	Comunicação	Custo de Implementação	Confiabilidade na Entrega de Dados
Link Direto	Centralizada	Médio	Sim
Satélite	Centralizada	Alto	Sim
Celular	Centralizada	Alto	Sim
Ad-Hoc	Distribuída	Baixo / Normal	Não

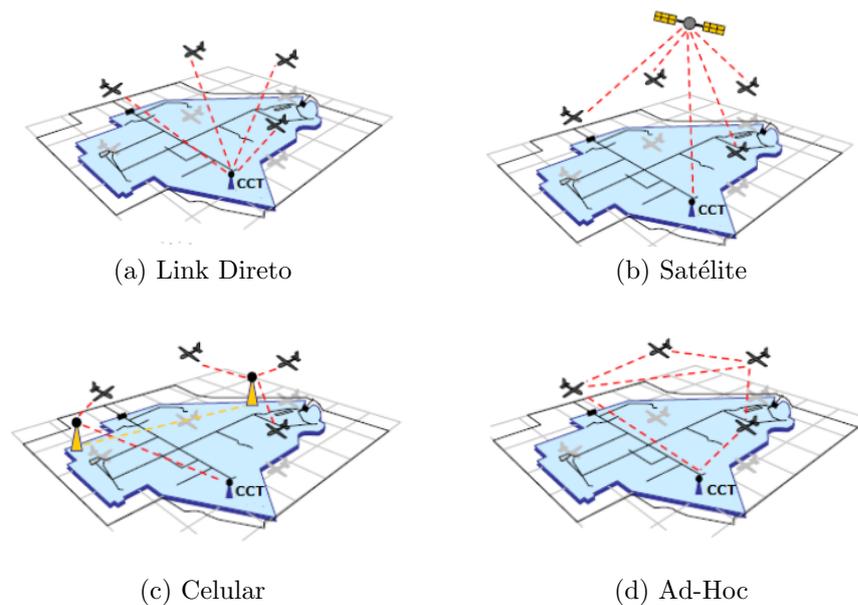


Figura 5: Arquiteturas de Comunicação em Redes de VANTs (FREW; BROWN, 2009)

como resultado do avanço em sistemas de automação como processadores, sensores, comunicações e tecnologias de rede (SAHINGOZ, 2014). Com o progresso desta área tecnológica, o desenvolvimento de projetos e a diminuição dos custos envolvendo sua implementação têm se tornado mais frequentes e permitido o surgimento de novas aplicações e, consequentemente, a demanda por novas soluções.

O uso de enxames de veículos a partir do modelo multi-UAVs é uma das estratégias utilizada para conseguir atingir objetivos através da mútua colaboração entre os nós na rede. Este nível de coordenação requer modelos de rede que permitam que dois determinados nós possam comunicar-se diretamente, se estiverem no raio de alcance do rádio do outro, ou indiretamente, através de nós ao longo do caminho que façam parte da rota traçada pelo protocolo de roteamento.

De maneira complementar, os VANTs precisam atingir um alto grau de coordenação com comunicação robusta entre veículos e por isso, o estabelecimento de redes ad-hoc entre estes veículos mostra-se a solução ideal já que, como mencionado, são redes que não necessitam de indivíduo centralizador para o estabelecimento de conexão e encaminhamento dos dados ao destino onde todos os nós podem atuar como roteadores.

Tradicionalmente, as tecnologias de comunicação utilizadas em redes fixas ou em outras classes de redes ad-hoc não são adequadas para lidar com as características únicas das FANETs, que contém nós com capacidades e requisitos diferenciados.

2.4 Redes Ad-Hoc

Uma rede ad-hoc é uma rede sem fio descentralizada que não necessita de infraestrutura pré-existente, como roteadores ou pontos de acesso, para encaminhar os dados de uma origem a um destino. Ao invés disso, cada nó participa de forma ativa do roteamento, encaminhando dados por outros nós pelo caminho de acordo com a conectividade da rede no momento (TOH, 2001). Desta forma, é uma tecnologia que permite conexão em ambientes que são carentes de infraestrutura (campos de batalha, recuperação de desastres). Como sugere o próprio termo cunhado “ad-hoc”, este tipo de rede é uma rede estabelecida para serviços especiais customizados para aplicações por um determinado período de tempo (GERLA, 2005).

Por causa de sua natureza móvel, não-estruturada, a rede ad-hoc impõe novos requisitos de projeto. O primeiro é auto-configuração (de endereços e roteamento) por causa da mobilidade. Tipicamente, tais redes comunicam-se em times a nível de aplicação. Por isso, necessitam de comunicação em grupo eficiente para transmissão de dados, sejam eles em tempo real ou não.

Redes ad-hoc são classificadas de acordo com suas características determinantes, principalmente no que diz respeito à densidade, nível e modelo de mobilidade e aplicação. FANETs compartilham muitas similaridades com as MANETs (Mobile Ad-Hoc Networks) e as VANETs (Vehicular Ad-Hoc Networks) sendo consideradas inclusive um subgrupo destas redes por alguns autores. Porém, apesar das claras similaridades, existem muitas diferenças e desafios únicos que a tornam um tipo específico de rede ad-hoc.

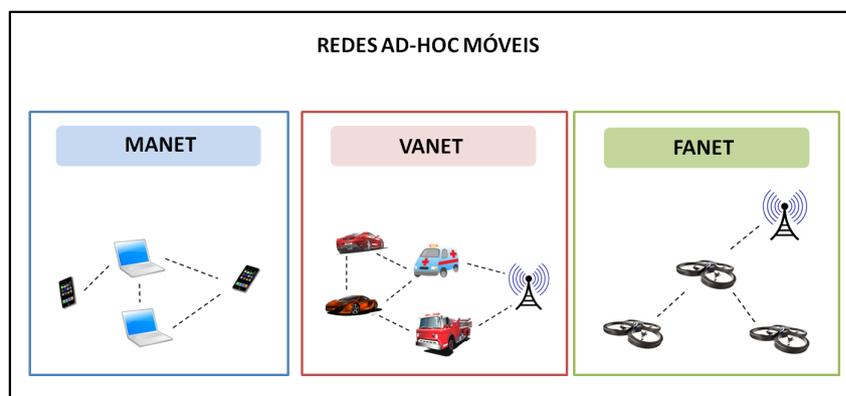


Figura 6: MANETs, VANETs e FANETs

- Grau de Mobilidade: Uma das principais diferenças entre tais redes é a mobilidade dos nós. A movimentação dos nós em uma MANET, por exemplo, é lenta em

comparação com os nós em VANETs e FANETs. Enquanto nós em uma MANET movem-se com a velocidade de um pedestre, nós em VANETs movem-se com velocidades de veículos terrestres e em FANETs, os veículos podem chegar a velocidades entre 30 - 460 km/h (CLAPPER et al., 2007).

- **Modelo de Mobilidade:** O modelo de mobilidade é o que rege o padrão de movimentação de uma determinada entidade. Nós em uma rede MANET, por exemplo, movem-se em um determinado terreno e apresentam padrões de parada, mudança de direção e constância de velocidade específicos. Nós em VANETs movem-se em ruas ou auto-estradas com eixos de movimentação bidimensionais e modelos de mobilidade claramente diferentes (Ex.: Um ser humano apresenta um padrão de mudança de direção randômico, podendo escolher qualquer direção e um veículo terrestre necessita obedecer às sinalizações de trânsito e sentidos das vias). Nós em FANETs movem-se no céu, variando sua altura e possui padrões de mobilidade diferentes de acordo com o tipo de missão. Missões onde os veículos seguem trajetórias pré-determinadas possuem um padrão de mobilidade diferente de missões onde os veículos possuem autonomia de movimentação.
- **Mudanças de Topologia:** Dependendo do grau de mobilidade do nó, a topologia em FANETs pode mudar mais frequentemente que em VANETs ou MANETs. Em adição à mobilidade dos nós em FANETs, as falhas que podem ocorrer nos VANTs também afetam a topologia de rede. Quando um VANT falha, as rotas estabelecidas também falham e isto resulta em uma atualização na topologia. Da mesma forma, a inserção de novos veículos ao grupo também resulta em atualização de topologia. Outro fator que também afeta a topologia das FANETs é a variação de links por causa da movimentação dos nós e variação de distâncias onde a qualidade do link muda rapidamente, causando disrupções (YANMAZ; KUSCHNIG; BETTSTETTER, 2011).
- **Propagação de Rádio:** Diferenças entre os meios de operação entre as FANETs e outras redes ad-hoc afetam a funcionalidade da propagação de rádio. MANETs e VANETs operam próximo ao solo e não possuem linha de visão entre o nó origem e o nó destino, em muitos casos. A propagação do sinal pode ser afetada pela característica geográfica do terreno e por construções.
- **Consumo de Energia / Tempo de Vida da Rede:** O tempo de vida da rede é um fator essencial em FANETs que são constituídas essencialmente de dispositivos de processamento equipados com baterias. O desenvolvimento de protocolos de comunicação energeticamente eficientes é um dos principais fatores que devem ser atentados para aumentar o tempo de vida da rede, sobretudo enquanto os dispositivos vêm se tornando cada vez menores e possuem mais poder de processamento. Dependendo da classe de veículos utilizados em FANETs, a energia deve ser um fator a ser atentado para aumentar o tempo de vida da rede e evitar disrupções (PUROHIT; MOKAYA; ZHANG, 2012).

- **Capacidade Computacional:** No conceito de redes ad-hoc, os nós devem atuar como roteadores. Assim, eles devem ter certas capacidades computacionais para processar o dado recebido em tempo real. Geralmente, a capacidade computacional estará sempre restringida à capacidade energética e de carga do veículo. Veículos que não possuem tantas limitações energéticas geralmente possuem hardwares mais poderosos.

Em razão das características e diferenças listadas, o design de soluções para FANETs deve considerar alguns conceitos e requisitos. Sendo estes indispensáveis para o bom desempenho do sistema e entrega confiável de dados. Tais quais:

- **Adaptabilidade:** Existem diversos parâmetros em FANETs que podem mudar durante sua operação. Seus nós são altamente móveis e estão sempre mudando suas posições. Por causa dos requisitos operacionais, as rotas dos VANTs podem ser diferentes e a distância entre os veículos pode não ser constante. Outro problema que deve ser considerado são as falhas nos veículos devido a problemas técnicos ou ataques. Variações ambientais podem também afetar seu funcionamento, afetando a qualidade do link. Por isso, soluções para FANETs devem ser projetadas de maneira que tais redes continuem a operação mesmo em ambientes altamente dinâmicos, de modo que elas possam se ajustar frente a qualquer falha ou mudança. A manutenção de rotas em redes ad-hoc está fortemente relacionada às mudanças de rotas de modo que o desempenho do sistema depende do protocolo de roteamento para adaptar-se.
- **Escalabilidade:** Como mencionado, o trabalho colaborativo entre VANTs pode aumentar o desempenho do sistema em comparação com sistemas single-VANT. De fato, esta é a principal motivação de usar enxames de VANTs. Em várias aplicações, o desempenho está altamente ligado ao número de veículos. Quanto mais veículos, mais rápido um grupo pode completar uma determinada operação (YANMAZ et al., 2010). Protocolos para FANETs devem ser projetados de forma que qualquer número de veículos possa operar em conjunto, com o mínimo de degradação no desempenho do sistema.
- **Latência:** Latência é um dos maiores problemas no projeto de soluções para todos os tipos de rede. Os requisitos de latência das FANETs é totalmente dependente do tipo de aplicação para que a rede é voltada. Especialmente para aplicações em tempo real, como monitoramento ambiental e civil ou transmissão de dados com restrições de tempo de entrega, os pacotes de dados devem chegar com um certo limite de atraso.
- **Banda:** Na maioria das aplicações para FANETs, o foco é coletar dados do ambiente e entregá-lo para uma estação base (QUARITSCH et al., 2010). Em aplicações de segurança, monitoramento ou resgate, as imagens ou vídeos da área desejada devem ser entregues à estação base com um limite de atraso bem restrito. Isto requer alta largura de banda, especialmente em razão da evolução dos sensores que são capazes

de produzir resoluções de imagens cada vez maiores. A colaboração e coordenação dos VANTs também requer recursos de banda adicionais. Por outro lado, existem várias limitações para o uso da banda disponível, como: a capacidade do canal, velocidade dos veículos, etc. Um protocolo para FANETs deve fazer uma boa gestão da largura de banda disponível.

Desta maneira, FANETs surgiram como uma classe de redes ad-hoc própria para veículos voadores, de modo que suas soluções devem se diferenciar em relação às restrições de conectividade, qualidade de serviços, tipos de sensores, entrega de dados e outros serviços. FANETs podem ser vistas como uma forma especial de MANETs e VANETs. Contudo, como já discutido, existem diferenças cruciais entre as FANETs e as redes ad-hoc já existentes. Tais características foram resumidas para melhor visualização na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3: Comparação entre MANETs, VANETs e FANETs (BEKMEZCI; SAHINGOZ; TEMEL, 2013), adaptado

	MANETs	VANETs	FANETs
Nível de Mobilidade dos Nós	Baixo	Alto	Muito Alto
Modelo de Mobilidade	Aleatório	Regular	Regular para rotas pré-determinadas e Especiais para Sistemas Autônomos
Densidade	Baixa	Variável	Variável
Mudanças na Topologia	Lenta	Rápida	Rápida
Consumo de Energia	Protocolos com Consumo Eficiente de Energia	-	Conforme Classe de Veículos

2.5 Redes Bayesianas

A inteligência computacional permite antecipar possíveis problemas e/ou eventos, e desta forma, auxiliar em tomadas de decisão mais realistas através do uso de métodos de análises de probabilidades que possibilitem otimizar uma determinada tarefa, reduzindo riscos e adicionando autonomia a uma determinada aplicação. Segundo Russell, uma decisão pode ser considerada correta ou racional a partir da análise da importância relativa de várias metas e da probabilidade de que elas serão alcançadas e em que grau (NORVIG; RUSSELL, 2014).

A lógica tradicional (de primeira ordem) é uma abordagem falha em domínios complexos, por motivos como:

- Praticidade: É muito trabalhoso listar o conjunto completo de antecedentes e consequentes exatos para assegurar uma regra sem exceções que retrate a realidade do problema.
- Ignorância Teórica: Muitas vezes não existe uma teoria completa que conheça todos os pormenores de funcionamento de um determinado domínio.

- **Ignorância Prática:** Ainda que todas as regras sejam conhecidas, não existem provas de sua existência por haver impossibilidade ou falta de execução de todos os testes necessários para provar as teorias.

Dentre os modelos existentes e amplamente difundidos na área da Inteligência Computacional, é possível citar as Redes Neurais Artificiais, a Lógica Difusa (Lógica Fuzzy) e as Redes Bayesianas (RB).

As Redes Neurais dividem os nós (nomeados de neurônios) em camadas, recebem um conjunto de valores de entrada que serão repassados aos neurônios intermediários para processamento, onde então seus valores serão determinados através de uma combinação linear de pesos. Após processamento nestas camadas intermediárias, os valores são repassados com a probabilidade calculada para as camadas de saída. As Redes Neurais Artificiais contém, em sua maioria, regras de aprendizado que modificam os pesos durante os processamentos nos nós intermediários de acordo com os valores de entrada apresentados. Desta maneira, é possível dizer que estas redes aprendem através de exemplos/experiências assim como o funcionamento dos neurônios biológicos (BITTENCOURT, 1998).

A Lógica Difusa é uma evolução da lógica booleana e admite valores lógicos intermediários além do VERDADEIRO (1) e do FALSO(0), de modo a representar mais fielmente a relatividade dos fatos. Contudo, a lógica difusa assume que as probabilidades são inerentes a um determinado evento, assumindo valores fixos, e, ao analisar determinada variável a partir desta lógica, é possível afirmar que ela tem um determinado percentual de similaridade ao valor considerado verdadeiro. Tal abordagem torna a lógica difusa mais inflexível quando não existe um conhecimento numérico do valor que uma determinada variável deve assumir, tornando a modelagem dos problemas mais complexa (REZENDE, 2005).

As RB têm como base a abordagem de que a probabilidade é fundamentalmente uma propriedade baseada na quantidade de conhecimento possuído. Tais redes realizam as previsões de eventos a partir de um estado de conhecimento parcial. Significa dizer que, a partir de um determinado volume de dados (conhecimento), tais redes extrairão a probabilidade de um evento ocorrer e a relação encontrada entre as variáveis de entrada com base em seus valores. Possuem a vantagem de terem modelagem mais simples já que podem tratar qualquer sub conjunto de variáveis como entrada e de terem uma inserção simples de conhecimento. Por meio da representação gráfica da RB é possível visualizar e compreender mais facilmente as relações entre as variáveis do ambiente, representando a distribuição de probabilidade conjunta para todas as variáveis. Os sistemas baseados em RB são capazes de gerar automaticamente previsões ou decisões mesmo na situação de inexistência de algumas peças de informação (DARWICHE, 2009). As Redes Neurais, por exemplo, não permitem uma modelagem extensa e mais amigável, ressaltando o real relacionamento entre as variáveis, além da alimentação inicial dos dados e definição das seeds utilizadas. Dependendo da quantidade de dados, o treino da rede também pode ser mais lento.

Por isso, a escolha de RB foi preferida. A motivação de sua escolha incluiu também, fatores como: a difusão desses métodos em diversas áreas de pesquisa; sua maior facilidade de modelagem a partir dos dados disponíveis; sua maior adequação à problemática em comparação com as outras redes e a expertise de especialistas próximos que auxiliaram na modelagem e obtenção dos dados.

Assim sendo, uma RB pode ser representada graficamente através de um grafo acíclico direcionado com os seguintes componentes (PEARL, 2011):

- Os nós representam as variáveis do domínio (variáveis presentes na base de dados) $X = X_1, \dots, X_n$;
- As arestas conectoras representam as relações de dependência condicional e causalidade entre os nós;
- Para representar o nível de dependência, são utilizadas probabilidades P , associadas a cada grupo de nós pais (que estão hierarquicamente acima, na origem da aresta) e filhos na rede.

Com o objetivo de facilitar a explanação sobre a construção de uma RB, um exemplo simples de detecção de fraudes em compras com cartões de crédito será utilizado, ilustrado pela Figura 7. As arestas ligam a causa ao efeito, os quadros representam as Tabelas de Probabilidade Condicional (TPC) que mostram a distribuição da probabilidade associada a cada nó da RB e os asteriscos representam a distribuição de quaisquer valores possíveis às variáveis. Neste exemplo, os nós fraude, idade, gasolina, joias e sexo correspondem às variáveis do domínio, ou seja $X = fraude, idade, sexo, gasolina, joias$. As variáveis fraude, idade e sexo, por serem do tipo raiz, possuem apenas as respectivas probabilidades a priori $P(X_i = verdadeiro)$ e $P(X_i = falso)$. Os nós gasolina e joias, por sua vez, apresentam distribuições de probabilidade condicional $P(X_i | Pais(X_i))$, que são relações de dependência quantitativa entre os nós da rede.

É possível inferir sobre as dependências condicionais que se estabelecem entre as variáveis através do gráfico da rede, bastando evidenciar a ocorrência de um determinado estado em uma ou mais variáveis da rede. Através das inferências, qualquer análise, pergunta ou hipótese que se deseje fazer ao modelo torna-se factível. Os questionamentos levantados inicialmente sobre o domínio podem agora ser estudados, evidenciando os devidos eventos nos atributos da rede e, dessa forma, computando e atualizando as probabilidades das demais variáveis da RB.

Para calcular a inferência, são utilizados os cálculos de probabilidade condicional e probabilidade condicional conjunta do teorema proposto por Bayes, conforme a Equação 2.1, onde $Pr(A)$ e $Pr(B)$ são as probabilidades a priori de A e B e $Pr(B|A)$ e $Pr(A|B)$ são as probabilidades a posteriori de B condicional a A e de A condicional a B, respectivamente. A ideia principal é que a probabilidade de um evento A dado um evento B depende não apenas do relacionamento entre os eventos A e B, mas também da

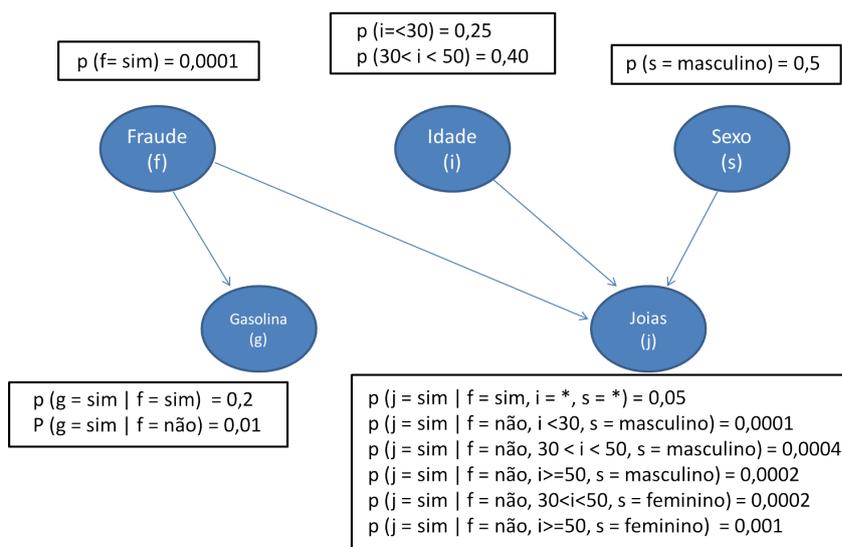


Figura 7: Uma RB típica, mostrando a topologia e também as tabelas de probabilidade condicional, adaptado de (HECKERMAN, 1997)

probabilidade da ocorrência de cada evento. O Teorema de Bayes fundamenta atualmente a base matemática de todos os sistemas que trabalham com inferência probabilística.

$$Pr(A|B) = \frac{Pr(B|A)Pr(A)}{Pr(B|A)Pr(A)} \quad (2.1)$$

Desta forma, a estrutura da RB pode ser obtida através dos seguintes passos:

1. Selecionar o conjunto de variáveis que descrevem o domínio. No exemplo utilizado, o conjunto é composto por: fraude (f), representando se a compra é ou não fraudulenta; gasolina (g), se houve ou não compra de gasolina nas últimas 24h; joias (j), se houve ou não compra de joias nas últimas 24h; idade (i) do usuário do cartão; e sexo (s) do usuário do cartão.
2. Elegar uma ordem para tais variáveis e o conjunto de nós-pais da rede, de modo a satisfazer a propriedade de independência condicional. Utilizando a ordem f, i, s, g e j, obtém-se:

$$\begin{aligned} P(i|f) &= P(i) \\ P(s|f, i) &= P(s) \\ P(g|f, i, s) &= P(g|f) \\ P(j|f, i, s, g) &= P(j|f, i, s) \end{aligned} \quad (2.2)$$

3. Definir as TPCs

Esse processo de construção considera apenas o conhecimento prévio (ou de fundo) do domínio. Em outras palavras, a rede deve ser concebida por intermédio da interação com o especialista do domínio. Essa interação tem a finalidade de identificar os relacionamentos entre as variáveis de interesse, para em seguida codificá-los na rede.

A aprendizagem de RBs consiste em induzir, a partir de um conjunto de dados, as distribuições de probabilidades condicionais e identificar as relações de independência existentes nesse conjunto. Esse processo de aprendizagem considera dois aspectos: aprendizagem da estrutura, quando não se tem a priori definido pelo especialista do domínio, tal estrutura; e a aprendizagem dos parâmetros, após a obtenção da estrutura, por intermédio das interações com o especialista ou induzida a partir dos dados.

No caso do problema da detecção de fraude, as variáveis foram discretizadas em um número de estados (valores) para que cada distribuição de probabilidade seja representada na TPC. Idade foi discretizada dentro dos valores (≤ 30 , $30 - 50$, ≥ 50), por exemplo.

Para o aprendizado em RBs, o algoritmo K2 (COOPER; HERSKOVITS, 1992) é utilizado. Este método aprende a estrutura de uma RB a partir de um conjunto de dados, cuja ordem das variáveis deve ser fornecida pelo usuário desse método. O K2 adota um método para calcular (selecionar) a estrutura com máxima verossimilhança e um algoritmo de aprendizado para encontrá-la. Essa busca é iterativa e inicia com uma estrutura de rede bem simples, onde todas as variáveis são independentes uma das outras. Em seguida são avaliadas as verossimilhanças marginais de cada rede resultante de possíveis mudanças, e então é aplicada a melhor das alterações antes de uma nova iteração. Esse processo continua até que o algoritmo não consiga encontrar nenhuma alteração simples que aumente o valor de máxima verossimilhança.

2.6 Analytical Hierarchy Process (AHP)

A tomada de decisões pode ser vista como uma ciência matemática, atualmente, que busca formalizar o pensamento utilizado em busca de melhores decisões a partir de uma análise mais transparente dos aspectos envolvidos em um problema (FIGUEIRA; GRECO; EHRGOTT, 2005).

Tomadas de decisão envolvem muitos critérios e subcritérios usados para categorizar as alternativas disponíveis na busca de soluções. Não somente é necessário criar prioridades para estas alternativas entre si, como também é necessário definir qual delas é mais importante e que grau de influência exercem sobre um determinado objetivo. Porém, nem sempre é possível ordenar estas prioridades apenas com um conhecimento subjetivo, sem auxílio de um método que busque correlacionar tais informações.

Uma coisa é bem clara: variáveis devem ser interpretadas conforme seu significado, utilidade e de acordo com suas prioridades para servir certos objetivos em uma determinada decisão e possuem diferentes variações numéricas. Não possuem a mesma prioridade para todos os problemas e sua importância é diretamente ligada ao objetivo desejado e ao estado das outras variáveis. Por isso, é importante derivar as prioridades relativas nas tomadas de decisão (SAATY, 2008).

O método de processo analítico hierárquico foi proposto na década de 70 por

Thomas L. Saaty, do departamento de defesa dos Estados Unidos, e trata-se de uma técnica de tomada de decisão com múltiplos critérios, em que um problema complexo possui uma hierarquia de solução a partir das variáveis utilizadas nessa solução (SERUFFO, 2012).

Saaty baseou-se no princípio de que é possível aprender sobre uma determinada entidade a partir de sua análise com outras entidades e relacioná-las através de comparações. O grande diferencial do método AHP é permitir que o usuário atribua pesos relativos para múltiplos critérios ou múltiplas alternativas para um dado critério, de forma intuitiva, ao mesmo tempo em que realiza uma comparação par a par entre os mesmos. Isso permite que, mesmo quando duas variáveis são incomparáveis, com os conhecimentos e a experiência dos especialistas da área, pode-se reconhecer qual dos critérios é mais importante.

Primeiramente, de acordo com o método, é necessário decompôr a decisão da seguinte maneira:

1. Estruturar a hierarquia de decisão em formato de árvore, de modo que o topo seja composto pelo objetivo, os nós intermediários pelos parâmetros que influenciam neste objetivo e o nível mais baixo que é o resultado das combinações (grupo de alternativas).
2. Construir matrizes de comparação onde serão definidas as importâncias de cada parâmetro intermediário em relação ao outro.
3. Usar as prioridades obtidas das comparações para ponderar as prioridades e gerar as alternativas.

Para fazer as comparações, é necessário uma escala de números que indiquem quantas vezes mais importante ou dominante um determinado elemento é em relação a outro a qual ele é comparado. Quanto mais variáveis ou mais complexidade um problema tiver, maior a necessidade de limiares na escala, de forma que ela pode ser adaptada conforme a necessidade do avaliador.

Tabela 4: Escala de Importância para o AHP (SAATY, 2008)

Importância	Definição	
1	Mesma Importância	Ambos os parâmetros contribuem igualmente com o objetivo.
2	Importância Leve	
3	Importância Moderada	
4	Moderada (um nível a mais)	
5	Forte Importância	Um é fortemente favorecido em relação a outro.
6	Mais Forte	
7	Muito Forte	
8	Muito, Muito Forte	
9	Extrema Importância	Evidentemente mais importante que outro, maior grau possível.

O exemplo abaixo (Matriz 2.3) retrata uma matriz de comparação (retirada de (SAATY, 2008)), montada com base na escala apresentada, e representa o nível de con-

sumo de determinada bebida em relação a outra. Segundo o método AHP, definimos e consultamos a importância de um critério em relação a outro na matriz através das linhas e colunas, onde o critério em uma linha é o elemento que se deseja avaliar em relação a outro critério em uma coluna. Nota-se que a matriz recebe valores inteiros e fracionários para retratar a correspondência proporcional das relações entre seus elementos.

Neste exemplo, pode-se inferir que o consumo de café é evidentemente mais importante do que o consumo de vinho pois Café recebe o valor 9 na sua posição de comparação correspondente ao Vinho. O Vinho, todavia, possui o valor contrário na sua posição de comparação com Café que, de forma inversamente proporcional, acusa que o consumo de vinho é evidentemente menos importante do que o consumo de café. Assim, é possível verificar a atribuição dos valores da matriz a partir da análise da importância dos critérios em pares, de acordo com seus valores relacionais baseados na escala definida.

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{c}
 \text{Café} \\
 \text{Vinho} \\
 \text{Chá} \\
 \text{Cerveja} \\
 \text{Refri} \\
 \text{Leite} \\
 \text{Água}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \left(\begin{array}{cccccccc}
 \text{Café} & \text{Vinho} & \text{Chá} & \text{Cerveja} & \text{Refri} & \text{Leite} & \text{Água} \\
 1 & 9 & 5 & 2 & 1 & 1 & 1/2 \\
 1/9 & 1 & 1/3 & 1/9 & 1/9 & 1/9 & 1/9 \\
 1/5 & 2 & 1 & 1/3 & 1/4 & 1/3 & 1/9 \\
 1/2 & 9 & 3 & 1 & 1/2 & 1 & 1/3 \\
 1 & 9 & 4 & 2 & 1 & 2 & 1/2 \\
 1 & 9 & 3 & 1 & 1/2 & 1 & 1/3 \\
 2 & 9 & 9 & 3 & 2 & 3 & 1
 \end{array} \right)
 \end{array}
 \end{array} \quad (2.3)$$

Os pesos relativos para cada critério são então obtidos através da normalização da matriz e da checagem de consistência. A normalização é obtida após a divisão de cada valor pelo total da soma da coluna. Em sequência, é calculada a média aritmética das linhas da matriz, resultando em um vetor chamado de “Vetor de Eigen” que determina a contribuição de cada critério no objetivo final. Este vetor (2.4) apresenta o peso relativo de cada critério, respectivamente.

$$w = [0.180, 0.010, 0.040, 0.120, 0.180, 0.140, 0.330] \quad (2.4)$$

Para verificar a consistência da matriz de prioridades dos critérios, se multiplica a mesma pelo vetor peso e se obtém a matriz de consistência. O Resultado da Consistência (RC) (Equação 2.5) é determinado através da divisão do Índice de Consistência (CI) pelo índice RI (um valor randômico que varia de acordo com o tamanho da amostra). Na Equação 2.6, λ_{max} representa o autovalor máximo resultado da multiplicação da matriz pelo vetor coluna de prioridades e n é a dimensão da matriz.

$$RC = CI/RI \quad (2.5)$$

$$CI = ((\lambda_{max} - n)/(n - 1)) \quad (2.6)$$

2.7 Métricas de avaliação de desempenho para protocolos de roteamento em FANETs

2.7.1 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. 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. 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.

Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) (MA; BARTOŠ; BHATIA, 2011), Mean Square Error (MSE), Structural Similarity Index (SSIM) (GAO et al., 2009) e Video Quality Measurement Tool (VQM) (PINSON; WOLF, 2004) são exemplos de métricas objetivas utilizadas para estimar o nível de qualidade de serviços multimídia, de acordo com a percepção do usuário.

Uma hipótese largamente adotada é que a perda da qualidade percebida é diretamente relacionada à visibilidade do sinal de erro. A implementação mais simples deste conceito está presente no MSE, que qualifica objetivamente a força deste sinal. Porém, duas imagens distorcidas com o mesmo valor de MSE podem conter diferentes tipos de erro, alguns dos quais podem ser muito mais visíveis que outros de acordo com a percepção humana (WANG et al., 2004).

A métrica SSIM busca 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.

2.7.1.1 Structural Similarity Index (SSIM)

O SSIM é um índice obtido através de um método de comparação que busca medir a similaridade entre duas imagens. Pode ser visto como métrica de qualidade, durante a análise de uma imagem distorcida em comparação com a imagem original.

A Figura 8 apresenta o sistema de medição de similaridade para geração do SSIM. Supõe-se que x e y são dois frames a serem comparados (um determinado frame no vídeo original e o frame correspondente no vídeo distorcido). O sistema separa a tarefa em três etapas de medições comparativas: luminância, contraste e estrutura; onde cada conjunto de valores é armazenado em vetores distintos. Primeiramente, a luminância de cada frame é comparada assumindo sua intensidade média em x e em y , representadas por μ na Equação 2.7.

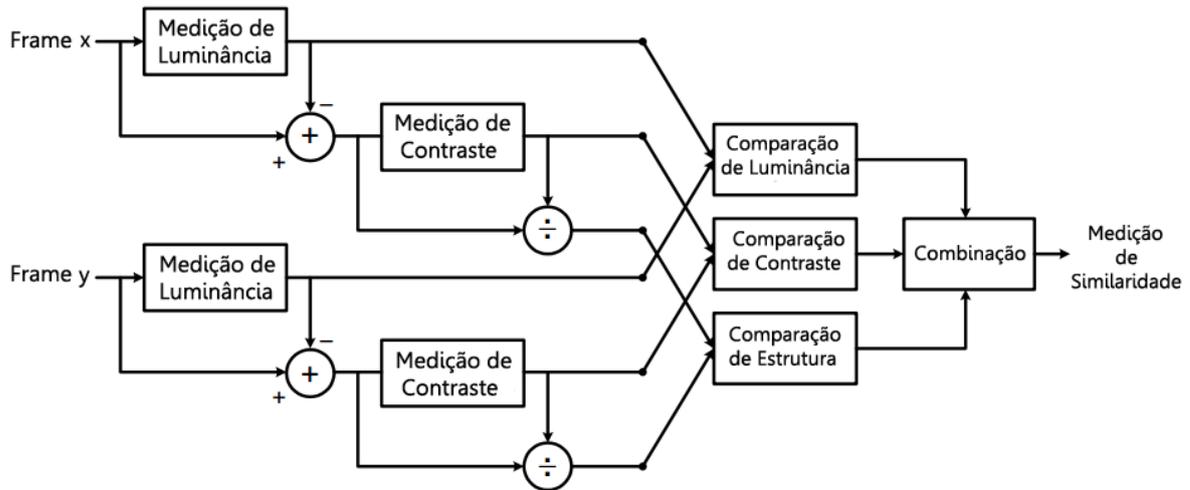


Figura 8: Sistema de medição de SSIM (WANG et al., 2004)

Em seguida, as raízes quadradas das variâncias σ são calculadas nos vetores de contraste. A comparação estrutural dos frames é obtida a partir do cálculo do coeficiente de correlação σ_{xy} entre x e y , correspondendo ao cosseno do ângulo entre os dois vetores. Após este processo, obtêm-se a média de cada vetor e o indicativo da qualidade do vídeo SSIM é gerado pela combinação e análise das três médias.

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \quad (2.7)$$

O valor resultante correspondente ao SSIM é representado como um valor decimal entre 0 e 1. Quanto mais próximo de 0, pior é a qualidade do vídeo. Por outro lado, quanto mais próximo de 1, melhor. Portanto, em um caso que o valor seja igual a 1, o vídeo recebido pelo usuário é equivalente a 100% de similaridade com o vídeo original.

2.7.1.2 Video Quality Measurement Tool (VQM)

O modelo VQM (PINSON; WOLF, 2004) foi desenvolvido para ser um modelo de medição de qualidade de propósito geral para uma ampla variedade de sistemas de vídeo com diferentes resoluções, taxas de frame, técnicas de codificação e taxas de bit. Utiliza sete parâmetros baseados em diferentes características de qualidade de um fluxo de vídeo processado, e as compara ao fluxo de vídeo original para obter uma estimativa geral da

distorção gerada.

A Figura 9 ilustra o processo de obtenção do VQM. O vídeo original é processado e transmitido através de um canal ao receptor, que recebe o vídeo processado após codificação na fonte e decodificação no destino. Em ambos os fluxos de vídeo (original e processado), um processo de calibragem é efetuado para coleta das características desejadas para avaliação. No destino, estas características são utilizadas para cálculo de cada parâmetro de requisito utilizado para avaliação do VQM.

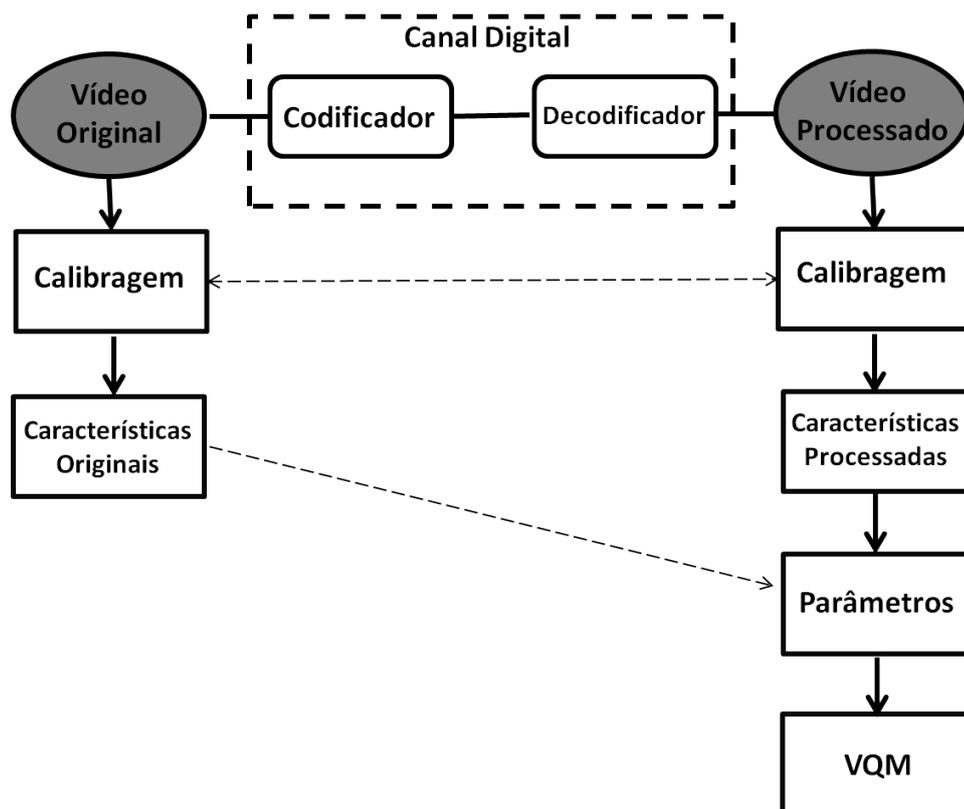


Figura 9: Diagrama de funcionamento do VQM, adaptado de (PINSON; WOLF, 2004)

Uma característica de qualidade é definida, neste contexto, como uma informação quantitativa associada com, ou extraída de, uma sub-região espaço-temporal $S - T_i$ de um fluxo de vídeo (seja ele original ou processado). Através da comparação destas características - que demonstram alterações perceptivas em características espaciais, temporais ou de crominâncias nos fluxos (original e processado) - parâmetros de qualidade q_i podem ser calculados como um indicativo das mudanças visuais na qualidade do vídeo.

Cada parâmetro utiliza funções que utilizam as características quantitativas obtidas como entrada para comparação das regiões segundo sua prioridade de avaliação. Quatro destes parâmetros são baseados em dados espaciais de luminância; dois em dados de componentes de crominância ¹; e um é baseado no produto dos dados que medem contraste e movimentação, ambos extraídos do componente de luminância.

¹A diferença colorimétrica entre uma dada cor em uma imagem transmitida e uma cor padrão de igual luminância

O modelo VQM executa basicamente os mesmos passos. No primeiro estágio, um filtro é aplicado a sequência original e ao vídeo distorcido para evidenciar alguma das propriedades necessárias para a análise de qualidade. Após isto, características f são extraídas da sub-região espaço-temporal, usando a média ou o desvio padrão de cada região $S - T$ filtrada. Finalmente, um parâmetro de qualidade é obtido através da comparação entre características do vídeo original, f_o , e características do vídeo distorcido, f_d .

As alterações visuais de cada região $S - T$ são calculadas utilizando determinadas funções de comparação. Alguns parâmetros utilizam uma função de comparação que apenas executa simples funções Euclidianas sobre as características obtidas entre o fluxo original e o processado (Equação 2.8), porém, a grande maioria utiliza a comparação por razão (Equação 2.9) ou a comparação logarítmica (Equação 2.10).

$$q_i = \sqrt{(f_o - f_d)^2 + (f_{o2} - f_{d2})^2} \quad (2.8)$$

$$q_i = \frac{(f_o - f_d)}{f_o} \quad (2.9)$$

$$q_i = \log_{10} \frac{f_d}{f_o} \quad (2.10)$$

2.8 Conclusões do capítulo

Este capítulo teve 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 receberam atenção. Por fim, foram apresentados um pouco dos conceitos que circundam as RB e o Método AHP que são utilizados no projeto do protocolo aqui apresentado.

Assim, este capítulo tem fundamental importância, pois é primordial apresentar os tipos de tecnologia disponíveis, assim como as técnicas utilizadas neste trabalho de forma a tornar claro o entendimento da proposta.

O próximo capítulo tem como objetivo apresentar alguns dos trabalhos relacionados utilizados como base de estudo comparativa para o desenvolvimento deste trabalho, de forma a analisar suas formas de operação e suas principais vantagens e desvantagens.

CAPÍTULO 3

Trabalhos Relacionados

Este capítulo tem como objetivo apresentar alguns trabalhos presentes na literatura, relacionados ao roteamento em FANETs. Ele descreve as principais características e o funcionamento de cada proposta e compara suas vantagens e desvantagens em prover rotas confiáveis e robustas para transmissão de vídeos.

3.1 Protocolos de Roteamento Oportunístico

Protocolos de roteamento tradicionais para redes sem fio fazem o roteamento através da seleção de rotas pré-selecionadas antes da transmissão. A maior limitação desta estratégia é que simplesmente aplica o modo de operação e os princípios de soluções de roteamento que foram inicialmente concebidas para redes cabeadas. Por isso, protocolos de roteamento sem fio tradicionais não se adaptam bem às variações dinâmicas de ambientes sem fio. Tais protocolos experienciam excessivas retransmissões, desperdício de recursos de rede e outras situações que contribuem para o desempenho indesejável do sistema. Além disso, o meio sem fio é visto como uma limitação pela maioria desses protocolos, uma característica negativa que se deve lidar.

O roteamento oportunístico, contudo, considera o meio sem fio como uma oportunidade ao invés de uma limitação. A ideia chave deste tipo de roteamento é superar as possíveis inconveniências das transmissões sem fio, tirando o máximo de proveito da natureza broadcast do meio sem fio. Ao invés de pré-selecionar um nó a cada transmissão, protocolos de roteamento oportunístico transmitem o pacote de dados de forma que os nós presentes em sua vizinhança sejam todos candidatos a encaminhadores. Então, o encaminhador será escolhido deste grupo de candidatos a partir de regras previamente definidas que variam de acordo com o projeto do protocolo.

Através desta seleção dinâmica do nó encaminhador, o roteamento oportunístico pode reduzir significativamente o número de retransmissões de pacote causadas por falhas de links. Por isso, a robustez da rede é provida a um preço muito menor pelo roteamento oportunístico em comparação com os modelos tradicionais de roteamento (CHAKCHOUK, 2015). Isto têm encorajado a adoção deste modelo de roteamento em uma vasta gama de aplicações que vão de cenários de evacuação e resgate em situações emergenciais (GORBIL; GELENBE, 2013), provisão de internet em áreas isoladas (PENTLAND; FLETCHER; HASSON, 2004), e interconexão de áreas industriais (YOON et al., 2014). O conceito de Roteamento Oportunístico pode ser aplicado para todos os tipos de redes sem fio de múltiplos saltos, como ad-hoc, mesh e redes de sensores.

Protocolos de roteamento oportunístico *beacon-based* selecionam e priorizam os nós de um grupo de candidatos através da transmissão de beacons antes da transmissão de pacotes. Isto possibilita que o protocolo ordene a prioridade dos candidatos de acordo com algum critério. Assim, de acordo com a prioridade do candidato, o nó decide quem será o encaminhador e notifica os seus vizinhos.

(MAO et al., 2011) apresenta um protocolo de roteamento oportunístico baseado em eficiência energética para priorizar os candidatos de forma a otimizar o desempenho da rede. (LU; STEENKISTE; CHEN, 2007) introduziu um modelo analítico para estudar o desempenho da transmissão de vídeos através de redes de múltiplos saltos. Finalmente, (SEFEROGLU; MARKOPOULOU, 2009) apresenta o papel do tempo de vida dos pacotes de vídeo na tomada de decisão.

Porém, esquemas de roteamento baseados em *beacon* não provêem robustez e suporte a QoE na presença de falha de nós e mobilidade. Isto é porque este tipo de protocolo cria uma lista de prioridades através do envio de *beacons*, o que aumenta o *overhead* da rede. Além disso, a lista de candidatos é determinada antes do envio de pacotes e pode não refletir a situação real no momento da transmissão.

3.2 Protocolos de Roteamento *Beaconless*

No roteamento com protocolos de roteamento oportunísticos *beaconless*, o nó que deseja enviar não necessita estar ciente dos seus vizinhos e, conseqüentemente, não há a necessidade de que os nós enviem mensagens de controle (beacons) de maneira pró-ativa para sinalizar sua existência. Tais protocolos selecionam o nó encaminhador de maneira completamente distribuída, através da transmissão do pacote de dados para seus vizinhos, de forma que cada um seja responsável pelo cálculo de um tempo de espera, definido como “tempo de contenção” ou, como abordado ao longo deste trabalho, *DFD*, que consiste basicamente em um curto período de tempo que o nó deverá permanecer em estado de contenção antes de transmitir um pacote de dados.

O cálculo do DFD é feito com base em critérios que variam de acordo com o projeto do protocolo em questão, critérios estes obtidos com base em informações que podem ser extraídas do pacote recebido ou localmente. O nó que tiver as melhores condições,

computa o menor valor de DFD e transmite o pacote primeiro, sendo então escolhido como o nó encaminhador. Tal abordagem tem como principais vantagens a diminuição significativa do número de mensagens de controle na rede e o uso de informações sempre atualizadas, em tempo-real. Tais vantagens contribuem para a formação de rotas mais confiáveis e a diminuição do *overhead* na rede causado pela extensiva troca de beacons.

3.2.1 BLR

O Beaconless Routing Algorithm (BLR) (HEISSENBÜTTEL et al., 2004) é um protocolo de roteamento que faz uso das informações geográficas dos nós de forma a escolher o nó mais próximo do destino, diminuindo os saltos durante a transmissão. Porém, diferentemente de outros protocolos de roteamento baseados em posicionamento, o BLR não requer que os nós façam envio periódico de *beacons* para controle de rotas. Desta maneira, é possível contornar problemas causados por esta estratégia, como o uso extensivo de recursos de bateria escassos, interferências, *overhead* de mensagens na rede e consequente degradação de desempenho. O protocolo seleciona o nó encaminhador de maneira distribuída entre seus nós vizinhos sem possuir informações sobre suas posições ou mesmo estar ciente da existência destes, e trabalha para que apenas um entre estes nós seja o nó encaminhador.

Isto é possível graças ao uso do DFD, calculado com base na Equação 3.1, que define o período de espera em cada nó e pode aplicar diferentes políticas de encaminhamento que podem ser ajustadas dependendo da necessidade do protocolo. DFD_{max} é o tempo máximo de DFD em um nó, r é o raio de transmissão e p é o progresso do nó em relação ao destino.

$$DFD = DFD_{max} \times \left(\frac{r - p}{r} \right) \quad (3.1)$$

No caso do BLR, todos os nós presentes em uma área denominada “área de encaminhamento” calculam p quando recebem um pacote em modo *broadcast*. Esta área de encaminhamento garante que apenas nós localizados na direção do destino participem do processo de contenção e calculem o DFD, enquanto nós fora desta área descartam o pacote. A partir do valor de p e r , o nó deriva seu valor de DFD de forma a receber valores de p maiores se estiverem mais próximos da borda do raio de transmissão.

Considera-se um nó N_i que deseja encaminhar um conjunto de dados sem ainda ter um nó encaminhador eleito como próximo salto na rota. N_i envia o pacote de dados em *broadcast* com informações sobre o seu posicionamento e id encapsuladas no cabeçalho do pacote. Supõe-se ainda, dois nós na área de encaminhamento que receberam o pacote de v_i . Ambos irão calcular seus valores de progresso com base nas suas informações de localização em relação ao destino e as informações do nó N_i , extraídas do cabeçalho do pacote recebido.

Assim, um nó com menor progresso adiciona um maior atraso na função DFD.

Isto é um fator importante já que o nó está mais longe do destino e não é desejável que ele se torne o encaminhador escolhido, pois isto introduz um maior número de saltos na rota. Já um nó com maior progresso em relação ao destino adiciona um menor atraso na função, o que possibilita que este tenha mais chances de tornar-se o encaminhador, por passar menos tempo em contenção e encaminhar o pacote primeiro.

Então, todos os nós na área de encaminhamento detectam o encaminhamento realizado e cancelam suas transmissões do mesmo pacote. O nó transmissor anterior também detecta a transmissão e conclui que o pacote foi recebido com sucesso e que o nó em questão tem as melhores condições geográficas para encaminhar os próximos pacotes, elegendo-o seu encaminhador. Após isso, o protocolo entra em modo *unicast* e encaminha, desta forma, os pacotes subsequentes para o nó encaminhador. Tal estratégia busca evitar os problemas provenientes do encaminhamento *broadcast*, no qual os pacotes são transmitidos com a taxa mais alta de transmissão, podendo causar interferências, e possuem velocidade de transmissão menor (2Mbps contra 11Mbps no modo *unicast* com IEEE 802.11b (ASSOCIATION, 2001)).

3.2.2 BOSS

O Beaconless On-demand geographic routing Strategy (BOSS) (SANCHEZ; MARIN-PEREZ; RUIZ, 2007) é um protocolo que estende o BLR introduzindo uma área de encaminhamento distinta, e aplicando um mecanismo de reconhecimento em três vias. O BOSS leva em consideração as perdas e colisões típicas das comunicações de rádio. Os autores fizeram um estudo para determinar o impacto que o tamanho do pacote tem na Packet Reception Ratio (PRR), e concluíram que quanto maiores os pacotes, maior é a tendência de serem perdidos. Desta forma, o BOSS busca selecionar somente nós encaminhadores que tenham capacidade de receber o pacote segundo seu tamanho, enviando diretamente o pacote de dados ao invés de simples mensagens de controle aos seus vizinhos.

O BOSS também utiliza o conceito de “áreas de encaminhamento”, podendo estas serem positivas (Positive Progress Area - PPA) ou negativas (Negative Progress Area - NPA). A PPA compreende a área de encaminhamento onde o nó vizinho está mais próximo do destino do que o nó do salto anterior; e NPA compreende o restante da área, onde os vizinhos não estão mais próximos do destino que o nó que enviou o pacote. Para o encaminhamento, o BOSS também utiliza o conceito de DFD. Os nós vizinhos que recebem o pacote verificam em qual das áreas se encontram. Se estão na PPA, iniciam o processo de contenção e calculam o DFD com base no seu progresso em relação ao destino.

O BOSS introduz um novo esquema de DFD, chamado de Discrete Dynamic Forwarding Delay (DDFD), que divide a área de encaminhamento em sub-áreas (Figura 10), com o objetivo de atribuir tempos de contenção mais espaçados entre os vizinhos de acordo com sua localização dentro da área de encaminhamento, buscando evitar colisões de mensagens de resposta por conta de tempos de espera muito próximos. Para isso, ao invés de utilizar o valor total do progresso, utiliza-se o valor da sub-área (denominada Common Sub Area CSA) em que o nó se encontra, divididas em um número pré-definido

(Number of Sub Areas - NSA), considera-se o progresso, o DFD_{max} e adiciona-se uma distribuição randômica. As Equações 3.2 e 3.3 apresentam o processo de cálculo das Common Sub Areas e do DFD, respectivamente. $dist$ representa a distância calculada de um determinado nó N_i ao destino D .

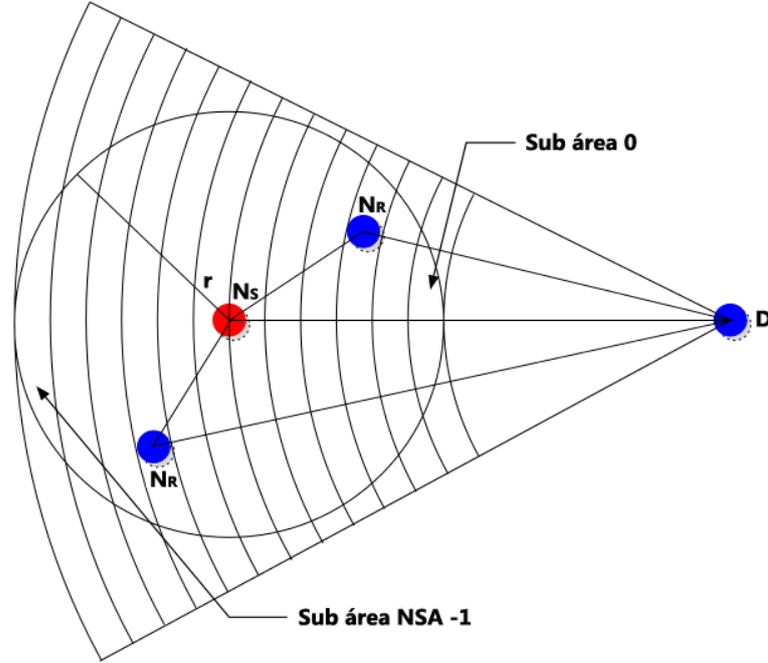


Figura 10: Área de Progresso do BOSS, dividida em sub-áreas (SANCHEZ; MARIN-PEREZ; RUIZ, 2007)

$$CSA = \left[NSA \times \frac{r - (dist(N_1, D) - dist(N_2, D))}{2r} \right] \quad (3.2)$$

$$DFD = \left(CSA \times \frac{DFD_{max}}{NSA} \right) + random \left(\frac{DFD_{max}}{NSA} \right) \quad (3.3)$$

Após o processo de DFD, o nó envia uma mensagem de resposta em *broadcast* contendo sua posição. O nó encaminhador então fará o *broadcast* de uma mensagem de seleção para a vizinhança anunciando que aquele nó (que enviou primeiro uma mensagem de resposta) é o escolhido.

3.2.3 MRR

O Multipath Routeless Routing protocol (MRR) (AL-OTAIBI; SOLIMAN; ZHENG, 2011) define a sua área de encaminhamento como um retângulo e combina as seguintes métricas para cálculo do DFD: potência do sinal em dBm, energia residual e distância. Desta maneira, o protocolo busca formar múltiplos caminhos através da seleção de nós que estejam mais próximos da fronteira da área de encaminhamento. Na Figura 11, vê-se

que o nó fonte N_S cria duas rotas até o destino através dos nós candidatos intermediários N_R .

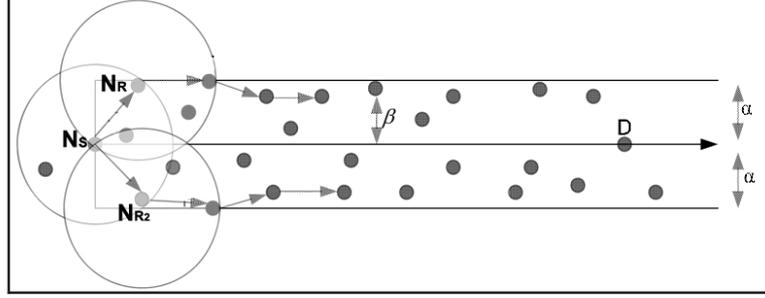


Figura 11: Encaminhamento de dados através da Área de Encaminhamento do MRR (AL-OTAIBI; SOLIMAN; ZHENG, 2011)

$$DFD = DFD_{max} \times \left(\Phi_1 \times \frac{|RS|^\delta - |sp_{ij}|^\delta}{|RS|^\delta} + \Phi_2 \times \frac{\alpha^\delta - \beta^\delta}{\alpha^\delta} + \Phi_3 \times \frac{E_{ini}^\delta - E^\delta}{E_{ini}^\delta} \right) \quad (3.4)$$

Na Equação 3.4, pode-se visualizar como se dá o cálculo do DFD no MRR. Φ (Φ_1 , Φ_2 e Φ_3) são coeficientes fixos de multiplicação de parâmetros utilizados para priorizar um parâmetro em relação ao outro e diferenciar seus impactos no cálculo do DFD; RS é a sensibilidade do nó que recebe o pacote e sp a intensidade do sinal recebido no nó j pelo nó i , ambos em dBm; β é a distância de um nó até a “linha imaginária” α que conecta o nó fonte S até o destino D ; EN_{ini} é a energia inicial do nó e EN é a energia atual do nó; δ é uma constante de configuração.

Através desta Equação é possível deduzir que, nós que recebem sinais mais fracos e estão localizados mais próximos das bordas da área de encaminhamento e possuem mais energia residual, têm menor tempo de contenção.

3.2.4 XLinGO

O Cross-layer Link quality and Geographical-aware beaconless OR protocol (XLinGO) (ROSÁRIO et al., 2014a), também é um protocolo com abordagem *beaconless* que busca prover disseminação de múltiplos fluxos de vídeo simultâneos com suporte a QoE em FANETs. O XLinGO possui dois modos de operação básicos: “contenção” e “persistente”, que implementam encaminhamento *broadcast* e *unicast* respectivamente. Para decisão de roteamento (que inclui o cálculo do DFD), combina uma série de parâmetros *cross-layer* como: PDR, QoE, tamanho da fila, qualidade do link, localização geográfica e energia residual. Conta com um modo de recuperação para contornar falhas de rotas, provendo melhor operação em ambientes dinâmicos.

O XLinGO utiliza o conceito de PPA e NPA tal qual o BOSS, onde os nós na NPA devem descartar o pacote recebido já que estão mais distantes e adicionam mais

saltos a rota. Por outro lado, os nós na PPA são candidatos a nós encaminhadores e farão parte do processo de contenção. Na Figura 12, N_S seleciona o N_R presente em sua PPA como encaminhador, que procede o algoritmo até alcançar o destino.

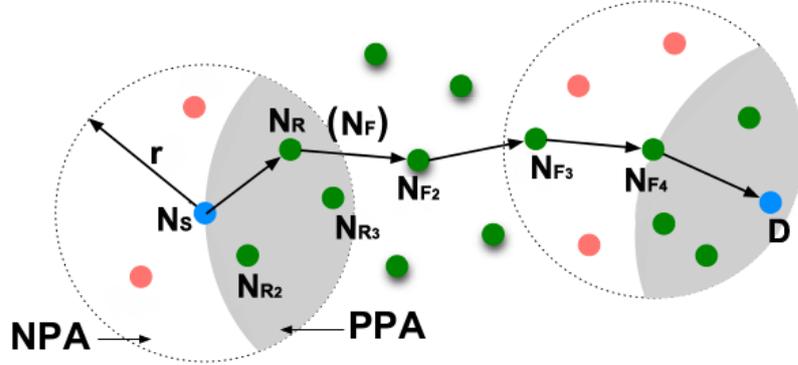


Figura 12: Encaminhaç o de dados utilizando áreas de Progresso Positiva (PPA) e Negativa (NPA) no XLinGO (ROSÁRIO et al., 2014a)

Para cáculo de DFD, o XLinGO considera a Equação 3.5, utilizando os parâmetros: qualidade de link (LQ), informação geográfica (p) e *buffer* (BS). O valor de cada um destes parâmetros é comparado com *thresholds* previamente definidos no protocolo, de forma a mensurar o impacto de cada um no valor do DFD. Além disso, para cada um destes parâmetros, o XLinGO inclui coeficientes multiplicadores fixos Φ para priorizar a importância de um parâmetro em relação ao outro.

$$DFD = DFD_{max} \times (\Phi_{LQ} \times LQ + \Phi_p \times p + \Phi_{BS} \times BS) \quad (3.5)$$

O XLinGO considera um mecanismo de recuperação para detectar e se recuperar de falhas de rotas. Para isso, considera que cada não que compõe uma rota persistente deve continuamente “checar” se o seu encaminhador ainda   confiável para fazer parte da rota ou se ainda está disponível.

Cada não encaminhador deve, então, enviar uma mensagem de *acknowledgement* após a recepção de um conjunto de x pacotes (número definido pelo projetista). Isto evita os danos de ter que enviar um ack a cada pacote de vídeo recebido, já que isso causa impactos negativos à rede (*overhead*, interferência, consumo de banda). Ao receber esta mensagem, também   possível extrair informações do estado do não a partir de métricas objetivas como a qualidade do link e PRR, que podem ser usadas para ponderar se aquele não ainda é um encaminhador em potencial ou   necessário fazer outro processo de contenção e escolher um novo não.

Assim que o não encaminhador recebe um determinado conjunto de pacotes, ele deve computar o PRR e a média da qualidade do link dos últimos x pacotes recebidos. Após isso, deve encaminhar uma mensagem *ack* para o não anterior contendo esta informação. O não no salto anterior pode, então, avaliar se o não ainda   confiável para enviar os pacotes subsequentes analisando os dados recebidos em comparação com os

thresholds definidos como ideais para manter a qualidade do roteamento. Se não, deve iniciar um novo processo de contenção para prevenir um roteamento sub-ótimo. Se o nó não receber um *ack* do nó encaminhador depois de um determinado período de tempo, também deve iniciar um processo de contenção para prevenir a perda de pacotes.

3.2.5 CAOR

O Context-aware Adaptive Beaconless Opportunistic Routing Protocol (CAOR) (ZHAO et al., 2014) também utiliza múltiplas informações de contexto para calcular o DFD, sendo elas: qualidade do link (LQ), progresso (p), energia residual (EN) e duração do link (LV). Semelhante ao funcionamento do XLinGO, este protocolo também conta com valores de coeficientes Φ para ajustar o DFD de acordo com a importância dos parâmetros *param*, de forma que a somatória dos coeficientes seja igual a 1. Porém, no CAOR, o valor destes coeficientes varia de acordo com o valor de cada parâmetro, como mostrado na Equação 3.6.

$$\sum_{\Phi} = \Phi(\text{param}) = 1 \quad (3.6)$$

A duração do link corresponde a um cálculo que considera, também, o tempo de contato de dois nós com base em suas velocidades e direções. Nós em velocidades muito diferentes ou movendo-se em direções contrárias recebem valores de parâmetro maiores.

O CAOR considera o método AHP para ajustar o grau de importância de cada parâmetro de contexto de acordo com os seus valores em tempo de execução, com o objetivo de adaptar o comportamento do protocolo. Isto porque definir pesos fixos somente reflete a importância relativa de uma informação. Porém, em tempo de execução, o contexto da rede sofre mudanças contínuas. Para um nó que possua níveis de bateria muito baixos em um determinado momento, o peso do parâmetro deve se adaptar de forma a prevenir que o nó torne-se um encaminhador e ocasione consequente falha de rota por esgotamento de bateria.

Cada candidato constrói sua própria matriz de comparação (como mostrada anteriormente na seção 2.6) para estabelecer a importância de cada métrica de acordo com seu valor instantâneo. Três intervalos de *thresholds* são definidos para cada parâmetro, podendo ser divididos em ruim, intermediário e bom (Tabela 5). A importância de comparação baseia-se no intervalo que o valor do parâmetro ocupa no momento. Quanto mais crítico (mais perto de ruim) for o valor do parâmetro, maior sua importância na matriz.

Os níveis de qualidade de link são definidos de acordo com valores testados e pré-estabelecidos pelos projetistas. Os níveis de progresso p são definidos de acordo com a posição do nó no raio de alcance do destino. Para a energia EN são considerados três níveis de bateria, que variam de forma crescente e fracionada. A duração do link LV varia em escala de tempo, em milissegundos.

Tabela 5: Valores de *threshold* considerados no CAOR (ZHAO et al., 2014)

Contexto	<i>Thresholds</i>
Qualidade do Link (lq)	$(0, lq_{ruim}), (lq_{ruim}, lq_{bom}), (lq_{bom}, lq_{max})$
Progresso (p)	$(0, \frac{2}{3}r), (\frac{2}{3}r, \frac{4}{3}r), (\frac{4}{3}r, 2r)$
Energia Residual (E)	$(0, \frac{1}{3}E_0), (\frac{1}{3}E_0, \frac{2}{3}E_0), (\frac{2}{3}E_0, E_0)$
Duração do Link (LV)	$(0, 3), (3, 5), (5, \infty)$

3.3 Outras propostas utilizadas em FANETs

3.3.1 GPSR

O trabalho de (COSTA, 2014) utilizou o GPSR como protocolo de validação para o mecanismo ECORA, como forma de melhorar seu desempenho para transmissão de vídeos em FANETs. Utiliza a arquitetura característica do GPSR, que armazena informações sobre os nós em tabelas, para obter as informações necessárias a serem computadas.

O Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR) (KARP; KUNG, 2000) possui dois modos de operação para o encaminhamento de pacotes: o modo *greedy* e o modo perímetro. No modo *greedy*, o nó que deseja enviar um pacote de dados escolhe o nó vizinho que esteja dentro do seu alcance de transmissão, bem como o que possua a menor distância Euclidiana em relação ao destino. Para isso, dissemina mensagens de controle pela rede, contendo a localização dos nós, para que sejam feitas as atualizações das tabelas de controle. Essas informações são, então, armazenadas em tabelas presentes nos nós e são utilizadas para calcular distâncias entre pares de nós, auxiliando na decisão de encaminhamento dos pacotes.

A Figura 13 ilustra o processo de encaminhamento pelo modo *greedy*. O nó fonte x deseja enviar um pacote de dados para o nó destino D . Então, x envia o pacote para o nó y que está presente em sua tabela de vizinhos e que tem a menor distância Euclidiana em relação a D , entre os nós presentes na tabela de x . Por fim, esse processo de encaminhamento é repetido pelos nós subsequentes até que o pacote chegue ao destino. Contudo, esta 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 , caso onde é necessário utilizar o modo de recuperação por perímetro.

3.3.2 ECORA

O Enhanced Connectivity for Robust Multimedia Transmission in UAV Networks (ECORA) (COSTA et al., 2014) é um mecanismo que considera informações geográficas no plano 3D tais como localização, velocidade e tempo, para calcular previsão de posicionamento e um índice de conectividade denominado *IC* entre os nós. Para isso, o ECORA utiliza informações armazenadas em tabelas de roteamento, obtidas anteriormente através de *beacons*, para calcular estas informações.

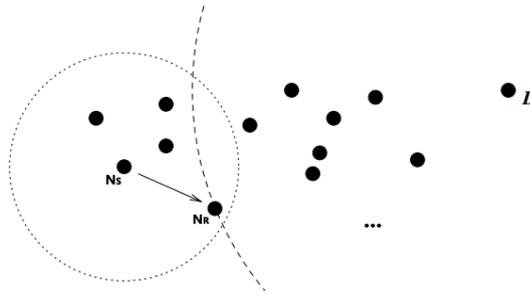


Figura 13: Formação de rota no GPSR (KARP; KUNG, 2000)

É composto por dois módulos: Módulo de Predição de Posicionamento e Módulo Classificador de Rota. O módulo de predição de posicionamento possui duas funcionalidades. A primeira está relacionada ao monitoramento da variação da distância entre o nó atual e o nó eleito para enviar os seus pacotes. Por fim, fornece ao módulo classificador de rota o posicionamento mais atual dos nós presentes em uma tabela de vizinhos de um nó.

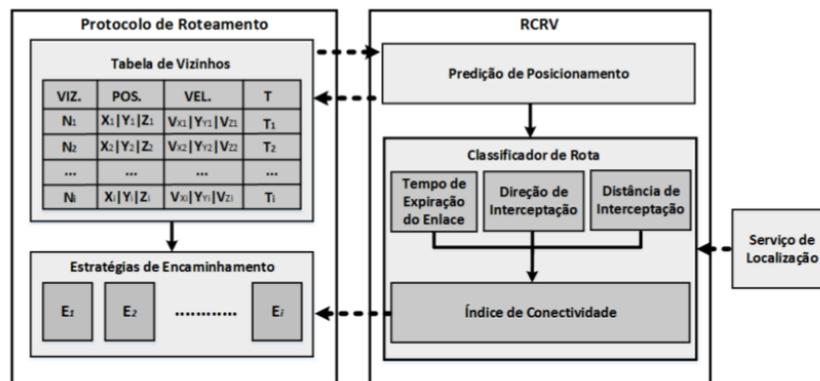


Figura 14: Arquitetura do ECORA (COSTA, 2014)

O módulo classificador de rota é responsável por calcular o IC , um critério importante que provê indicações detalhadas sobre a influência de um dado nó N_i . Considera três parâmetros como entrada para avaliar a conectividade de um nó: Tempo de Expiração do Link (TEx), Direção de Interceptação ($DirI$) e Distância de Interceptação ($DisI$). O valor de IC pode ser aplicado pelas estratégias de encaminhamento presentes nos protocolos de roteamento, com o objetivo de decidir qual o melhor nó próximo salto para encaminhar pacotes em direção ao destino.

TEx estima a duração do enlace entre um par de nós com base em suas velocidades e variações de direção. Altos valores de TEx indicam que os nós estão movendo-se em direções opostas ou com velocidades distintas e, conseqüentemente, tal rota é mais suscetível a falhas causadas por mobilidade. A distância entre um par de nós é obtida através da diferença entre as coordenadas cartesianas x , y , z de cada nó, respectivamente. A direção é obtida através de operações de subtração entre as velocidades vetoriais e ângulos de movimentação de cada nó, para que seja possível deduzir se as direções dos

nós coincidem. Estes resultados são necessários como entrada para equações que efetuam operações quadráticas e trigonométricas para obtenção dos valores de TEx , $DirI$ e $DisI$.

Por isso, o TEx de um link L_{N_i, N_j} é obtido através de uma equação quadrática, considerando que ambos têm raios de transmissão esféricos com uma certa taxa de transmissão TR como mostrado abaixo na Equação 3.7.

$$TExL_{N_i, N_j} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (3.7)$$

$DisI$ é obtida a partir da Equação 3.8. A seleção de nós encaminhadores mais próximos do destino é uma das estratégias mais usadas em protocolos de roteamento geográfico. Porém, esta estratégia é ineficiente para redes com nós móveis como as FANETs. Selecionar nós baseado somente na sua distância para o destino aumenta a possibilidade de desconexão. Por isso, um mecanismo eficiente deve considerar também os efeitos da mobilidade como parâmetros além da posição do destino. $DisI$ é um critério que considera não somente a distância entre um N_R e D , mas também a distância entre um nó encaminhador atual N_F e N_R .

$$DisI_{N_F N_R D} = \left| \frac{dist_{N_F D} - dist_{N_R D}}{dist_{N_F D}} \right| \quad (3.8)$$

$DirI$ é um parâmetro que indica se o nó tem a possibilidade de alcançar o destino. É baseado na direção do N_R em relação a D e suas coordenadas no plano. Este parâmetro é necessário para evitar escolher nós movendo-se em direções opostas ao destino, devido ao fato de que a seleção de um nó encaminhador que esteja em movimento oposto aumenta o número de saltos e pode levar a perda de pacotes e atrasos. Esta métrica é computada com base em operações trigonométricas de forma que θ_1 representa o ângulo entre o eixo x e os componentes de velocidade do nó, v_{ix} v_{iy} . θ_2 é o ângulo entre N_R e o destino, e $angleTh$ é um limiar pré-definido.

$$DirI_{ijD} = \left| \frac{\theta_1 - \theta_2}{angleTh} \right| \quad (3.9)$$

3.4 Conclusões do capítulo

Este capítulo teve como objetivo detalhar o funcionamento dos trabalhos relacionados que atuam como protocolos da camada de rede e também abordar o uso de um mecanismo de realce de conectividade para melhorar a conectividade entre nós em uma FANET. A mobilidade é um dos parâmetros mais relevantes nas redes VANTs e, por isso, é importante desenvolver soluções para mitigar sua influência no roteamento.

O BLR introduziu a idéia do DFD para decisões de encaminhamento. A decisão de encaminhamento é efetuada com base no valor do DFD computado em cada nó vizinho que recebeu um pacote de dados em *broadcast*. O nó que computar o menor valor de

DFD encaminha o pacote e é eleito encaminhador. Todos os protocolos apresentados que utilizam o conceito de DFD, consideram diferentes parâmetros para computar o seu valor.

O BLR e o BOSS baseiam-se somente na localização geográfica para calcular o DFD. Porém, computá-lo com base somente na distância não é suficiente para escolher um nó confiável, já que um nó que esteja mais próximo do destino pode sofrer de má conectividade (BACCOUR et al., 2012). Além disso, o BOSS inclui *overhead* de mensagens e atraso por conta do seu mecanismo de reconhecimento em três vias.

O MRR considera energia residual, potência do sinal e localização geográfica para cálculo do DFD e prioriza a seleção de nós encaminhadores com sinais de transmissão mais fracos com o objetivo de criar múltiplas rotas sem que um sinal interfira no outro. O problema desta abordagem é que isto pode acabar reduzindo a confiabilidade da transmissão e aumentar a perda de pacotes, resultando em vídeos de baixa qualidade. Além disso, o MRR dá prioridade a nós próximos das fronteiras da área de encaminhamento, o que não necessariamente significa que eles realmente estejam fazendo algum avanço em relação ao destino. Isto pode acabar aumentando o número de saltos, interferências e problemas de *buffer overflow*.

O XLinGO e o CAOR consideram múltiplos parâmetros para cálculo do DFD. O XLinGO considera a qualidade do link, localização geográfica do nó, energia residual e estado do *buffer*. Implementa também um mecanismo para detectar e reagir rapidamente a falhas de rota. CAOR considera a qualidade do link, mobilidade 3D do nó e energia residual, além de implementar o método AHP para ajustar o grau de importância de cada parâmetro de acordo com seus valores em tempo real de forma a adaptar o comportamento do protocolo. Contudo, ambos não consideram a mobilidade em um plano 3D como acontece em FANETs, sem mitigar os verdadeiros efeitos que a mobilidade de um VANT pode causar durante a transmissão. Além disso, o XLinGO atribui o mesmo grau de importância para todas as informações de contexto e ambos não analisam e consideram qual o real impacto de cada parâmetro escolhido na qualidade final do vídeo.

Nenhum dos protocolos acima utiliza mecanismos de predição de mobilidade para detectar possíveis falhas de rota. O ECORA é um mecanismo voltado para redes de VANTs que busca unificar recursos de predição de mobilidade em conjunto com informações de mobilidade disponíveis, em um sistema para controle de conectividade de forma a permitir tomadas de decisão mais concisas com base na real mobilidade dos nós. Contudo, o ECORA foi desenvolvido para protocolos que utilizam tabelas de roteamento para armazenar as informações sobre os nós da rede e as rotas disponíveis, o que não é considerado adequado para redes tão dinâmicas quanto as FANETs. Para tirar proveito máximo do mecanismo, é necessário utilizá-lo em um protocolo mais adequado para este tipo de rede, unindo-o com outras estratégias e abordagens. A Tabela 6 sintetiza as semelhanças e diferenças entre as propostas de protocolo aqui abordadas.

As descrições anteriores pontuam a necessidade de um protocolo de roteamento que unifique todos os parâmetros considerados importantes para transmissão de múltiplos fluxos de vídeo em FANETs e que considere o real impacto de cada um na qualidade final

Tabela 6: Comparação entre Protocolos de Roteamento

Protocolos	Parâmetros				Mobilidade		Adaptabilidade
	Energia	Buffer	Link	Localização	2D	3D	
BLR				x			
BOSS				x			
MRR	x		x	x			
XLinGO		x	x	x			
CAOR	x		x	x	x		x
GPSR + ECORA				x		x	

do vídeo. Tal fator é de primordial importância na escolha do melhor nó encaminhador a fazer parte da rota. Também é importante considerar o contexto atual da rede e a situação atual de cada nó de forma a adaptar tal protocolo às necessidades instantâneas da rede, sem ignorar as características peculiares de mobilidade dos VANTs em cenários 3D.

CAPÍTULO 4

CABR: Protocolo de Roteamento *Beaconless*, Oportunístico e Adaptativo para Distribuição Multimídia em Flying Ad-Hoc Networks

O uso de VANTs de pequeno porte 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 eficácia nas missões. Tais características são importantes para aplicações multimídia em cenários de monitoramento ambiental ou de desastres. Para que a rede apresente a robustez necessária para a entrega de vídeos com qualidade ao usuário, é necessário que suas características específicas sejam consideradas e seu dinamismo não seja ignorado no projeto de novas soluções.

Protocolos de roteamento *beaconless* e oportunísticos melhoram a performance da rede através da maneira completamente distribuída com que provêm suporte às decisões de roteamento, mesmo em cenários que apresentam constantes mudanças de topologia. Contudo, os protocolos existentes não consideram informações primordiais de contexto e suas variações ao longo do tempo para refinar a escolha dos nós encaminhadores e tomar decisões no momento do roteamento. Além disso, não levam em conta as características de mobilidade 3D peculiares destes ambientes, tornando as decisões menos realistas e robustas.

Com base nessas informações, nesta seção o CABR é introduzido. Tal protocolo baseia-se em múltiplas informações de contexto para computar o DFD, sendo estas: qualidade do link, estado do *buffer*, energia, informações geográficas em um plano 3D e mobilidade dos VANTs. O CABR também utiliza um mecanismo de predição de posi-

cionamento existente na literatura para monitorar a distância entre dois nós e detectar possíveis falhas de rota. Desta maneira, é possível estabelecer rotas que visem garantir QoE, prevenindo a seleção de nós com alta carga de tráfego de pacotes, baixa energia residual, baixa qualidade de transmissão ou que tenham possibilidade de quebra de comunicação por conta da sua mobilidade.

Para analisar quais das informações de contexto tem mais impacto na qualidade final, foi utilizada uma técnica que inclui RB para mensurar o peso de cada uma. O CABR adapta o comportamento do protocolo considerando o AHP para mudar a prioridade dos contextos em tempo de execução.

4.1 Arquitetura

CABR entrega vídeos de alta qualidade através de FANETs, em cenários onde não há infraestrutura de rede disponível depois de um desastre natural. Em tais situações, o conteúdo multimídia tem um papel muito importante pois torna possível que humanos nos centros de controle tomem atitudes propícias, com base em informações de vídeo ricas, para exploração das áreas atingidas, onde humanos seriam incapazes de atingir facilmente sem correr riscos.

A Figura 15 apresenta uma visão geral dos passos executados para o desenvolvimento do protocolo CABR. Primeiramente, foram transmitidos vídeos com diferentes características em um experimento inicial com o objetivo de coletar informações sobre qualidade do vídeo, qualidade do link, estado do *buffer*, energia e conectividade. Através desses resultados, foi montada uma base de dados com as informações coletadas para posterior montagem de uma RB, visando descobrir o grau de importância de cada parâmetro de contexto. Foi possível, então, definir o peso de cada variável e aplicar o método AHP para ajustar de seus pesos de maneira realista durante o tempo de execução baseada na condição instantânea da rede.

Considera-se uma FANET composta por n nós VANTs, onde cada um tem uma identidade individual denotada por $i \in [1, n]$. Tais nós são representados através de um grafo dinâmico $G(V, A)$, onde os vértices $V = N_1, \dots, N_n$ representam um conjunto finito de nós e as arestas $A = a_1, \dots, a_n$ representam um conjunto finito de enlaces sem fio entre os vizinhos em uma rede FANET. Denota-se $Nb(N_i) \subset V$ como um subconjunto formado pelos vizinhos presentes no raio de alcance de rádio de um dado N_i . Cada N_i é equipado com uma câmera, um codificador de imagens, um *transceiver* de rádio e um suprimento de energia limitado. O cenário possui também um nó de destino estático (D) $\subset V$ equipado com um *transceiver* de rádio, um decodificador de imagens e energia ilimitada. (N_S) $\subset V$ é um nó fonte que pode ser qualquer N_i capturando fluxos de vídeo.

O Link Quality Estimator (LQE) é medido na camada física através do processamento de métricas objetivas como o Received Signal Strength Indicator (RSSI) e Signal to Noise Ratio (SNR). O LQ pode ser usado para analisar as características de cada link a_i , tão logo um N_i receba um pacote. Além do mais, cada N_i tem uma fila (*BS*) de capa-

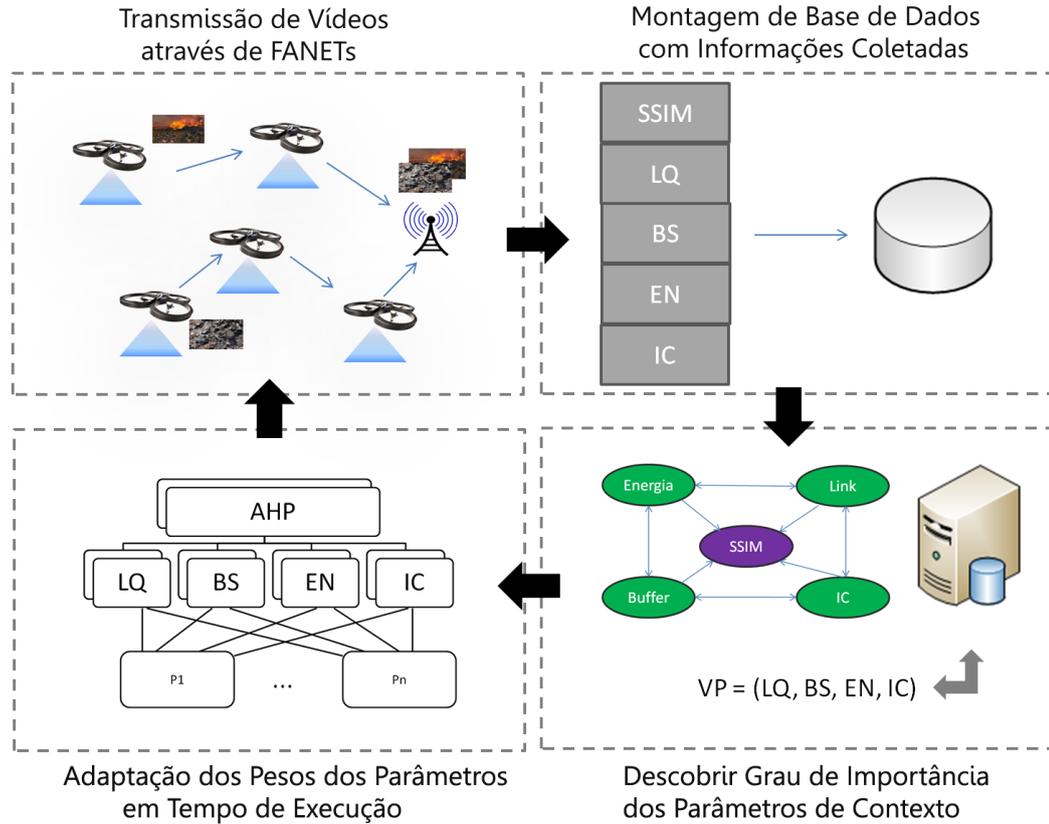


Figura 15: Visão Geral CABR

cidade máxima BS_{max} e tamanho atual BS_{tam} . A política de filas agenda a transmissão do pacote através do algoritmo First In First Out (FIFO). Cada N_i estima sua energia residual EN e está ciente da sua própria localização (x_i, y_i, z_i) em um espaço 3D (R^3) utilizando serviços de localização como o Global Positioning System (GPS), ou qualquer outro serviço de posicionamento. A localização de D é conhecida a priori por cada N_i , já que assume-se que o destino é estático.

4.1.1 Encaminhamento Baseado em Contenção utilizando o DFD

O CABR funciona de maneira similar aos protocolos *beaconless* oportunistas, onde cada vez que um dado N_S deseja enviar um fluxo de vídeo, ele faz envio do pacote em *broadcast* para seus vizinhos $Nb(N_S)$. Antes que N_S transmita um pacote de vídeo, ele deve determinar sua própria localização $(x_{N_S}, y_{N_S}, z_{N_S})$, velocidade v_{N_S} e direção \vec{dir}_{N_S} de modo a incluí-las no cabeçalho do pacote. Após isso, os vizinhos de $Nb(N_S)$ competem de maneira distribuída para encaminhar o pacote de dados e o CABR garante que somente um dos nós seja escolhido como nó encaminhador através do cálculo do DFD.

Ao invés de imediatamente encaminhar o pacote recebido, cada candidato deve calcular o valor do DFD para iniciar o processo de contenção e aguardar pelo fim deste

tempo de espera para encaminhar o pacote recebido. Consequentemente, o $Nb(N_S)$ que gerar o menor valor de DFD encaminha o pacote primeiro e torna-se o nó encaminhador. Os outros nós, ao ouvirem a transmissão do pacote, cancelam suas transmissões e excluem o pacote de seus buffers. Ao mesmo tempo, CABR usa o pacote transmitido como um *ack* passivo, ou seja: o nó que enviou o pacote detecta o encaminhamento do pacote pelo meio *broadcast* e utiliza esta informação como confirmação de entrega de mensagem. Assim, N_S fica ciente do nó responsável pelo encaminhamento, de forma a torná-lo seu eleito como nó encaminhador para transmitir os pacotes subsequentes em modo *unicast*, no modo de rota persistente. O algoritmo continua até que o pacote alcance D , que envia um *ack* explícito.

O DFD pode ser computado como uma função multi-critério baseada em informações de contexto adquiridas localmente (energia residual do nó, estado do *buffer*, localização geográfica) ou retiradas do cabeçalho dos pacotes recebidos (qualidade do link, mobilidade do nó vizinho), de forma que não existe custo adicional de comunicação envolvendo a coleta destes dados. Para seu cálculo, uma função Utilidade é utilizada em cada N_i durante o processo de contenção, conforme a Equação 4.1.

$$DFD(v_i) = DFDmax \times \left(\sum_{i=1}^n \Phi_i \times param_i \right) \quad (4.1)$$

Considera-se $(param_i) \in [0, 1]$ como uma função normalizada para cada tipo de informação de contexto i . Existem diferentes funções normalizadas introduzidas na literatura para resolver vários problemas em redes de comunicação: lineares, logarítmicas, exponenciais e funções sigmóide. Neste trabalho considera-se uma função sigmóide para normalização de cada parâmetro $param_i$ já que este tipo de função é bastante difundida e geralmente utilizada em redes para representar valores de um dado parâmetro (LOHIER; RACHEDI; GHAMRI-DOUDANE, 2009).

O peso atribuído a cada parâmetro é representado por Φ_i , de forma que $\sum_{i=1}^n \Phi_i = 1$. Este peso é calculado em tempo de execução, a partir da comparação do valor instantâneo do parâmetro e dos *thresholds* previamente definidos. Para isso, o protocolo considera o AHP para ajustar o grau de importância de cada informação de contexto baseado nas condições instantâneas da rede e dos nós. O parâmetro será considerado, então, mais ou menos importante que outro de forma a adaptar a escolha dos nós e evitar escolher nós que estejam com parâmetros em limiares ruins.

Durante o desenvolvimento do protocolo, foi observado que muitas vezes todos os valores de contexto caíam em limiares coincidentes (ex: LQ , EN , BS , IC = médio). Em situações como essa como é possível atribuir pesos aos parâmetros? Se fosse atribuído a todos o mesmo peso, o protocolo acabaria tendo o mesmo tipo de comportamento irrealista dos protocolos que atribuem pesos fixos aos seus parâmetros. Por isso, um objetivo é primordial nessa situação: a otimização de um contexto em relação a outro de acordo com sua importância real. Mas como é possível definir esta importância de forma realista, sem basear-se somente no conhecimento empírico? Para resolver este problema,

considerou-se uma técnica que inclui RB para definir o vetor peso através da análise objetiva do impacto de cada parâmetro utilizado no CABR na qualidade final do vídeo. Dessa forma, em situações onde todos os limiares são iguais e é necessário decidir qual parâmetro deve ser priorizado, é possível fazê-lo de posse dos valores obtidos pela RB, tomando então uma decisão condizente com a realidade, baseada em dados científicos objetivos.

A Figura 16 apresenta um diagrama de atividades relativo ao cálculo do DFD em um nó. Primeiro, os parâmetros são derivados das informações obtidas localmente (no próprio nó) ou extraídas dos cabeçalhos dos pacotes. O valor de cada parâmetro é, então, calculado de acordo com equações próprias (apresentadas na Seção 4.1.2). Após isto, os valores obtidos são comparados com os valores estabelecidos como limiares em uma tabela de *thresholds* do AHP. O método AHP é aplicado com base nos valores de comparação obtidos através desta análise. Se todos os valores, porém, coincidirem em limiares iguais, é utilizado o padrão de importância obtido através da RB; se não, os pesos são adaptados de acordo com seus valores instantâneos. De posse destes valores, é possível então efetuar o cálculo do DFD.

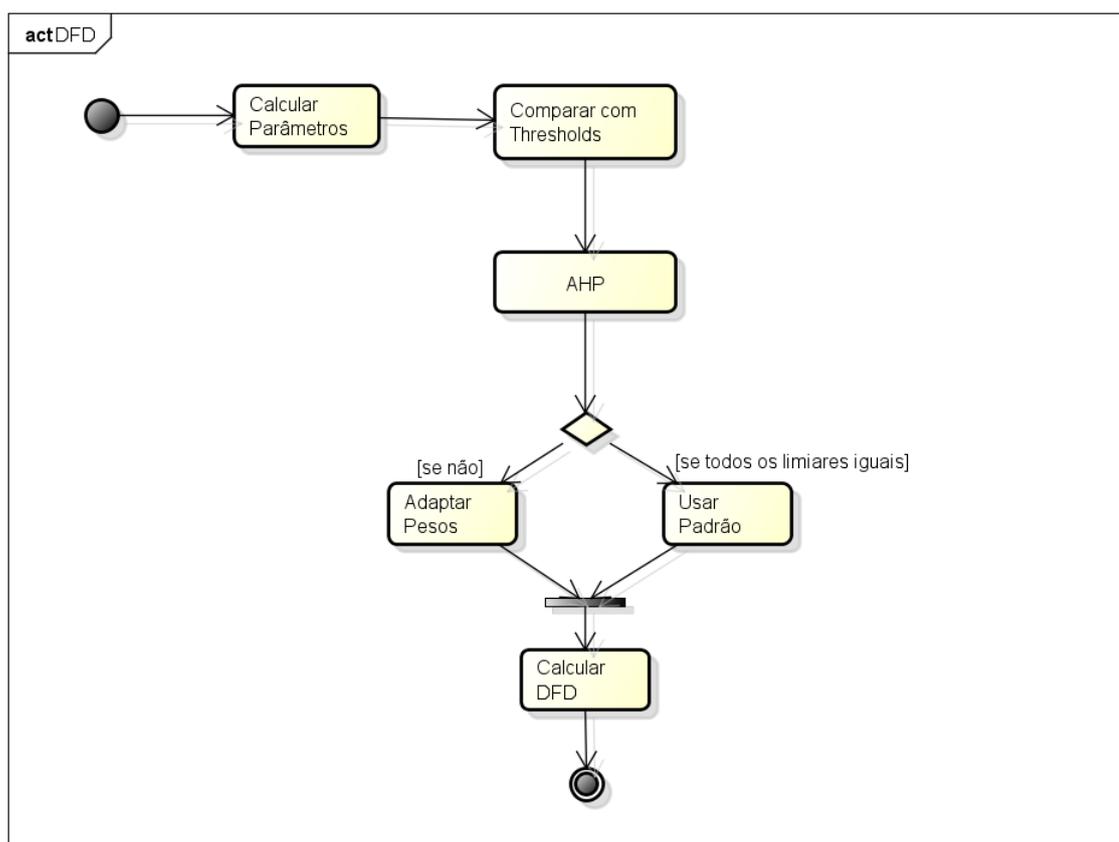


Figura 16: Diagrama de Atividades do Cálculo do DFD em um Nó

4.1.2 Parâmetros de Contexto para Cálculo do DFD

Os parâmetros eleitos para análise de contexto no projeto deste protocolo são considerados relevantes por muitos autores na literatura. No capítulo 3, podemos visualizar que os trabalhos também utilizam alguns deles em suas propostas para cálculo de seus tempos de contenção. Portanto, é importante ressaltar que a utilização de mais variáveis (representadas, neste caso, por parâmetros) para uma tomada de decisão torna a escolha mais “refinada” e precisa já que analisa uma maior gama de fatores influenciadores na obtenção de um resultado. No caso de um cenário específico como o abordado ao longo deste trabalho, é de fundamental importância que a escolha do nó encaminhador seja a mais refinada possível, garantindo a confiabilidade da transmissão através do estabelecimento de rotas robustas, adequadas ao atual contexto da rede.

4.1.2.1 Qualidade do Link

A qualidade do link garante que o nó selecionado seja capaz de prover transmissão multimídia com suporte a uma alta taxa de entrega de pacotes, como esperado em aplicações multimídia (SHU et al., 2010). Cada link tem um peso associado, computado no nó receptor, provido através de métricas objetivas como RSSI, SNR e LQI. Mais especificamente, baseado no trabalho anterior de (ROSÁRIO et al., 2014a), é possível classificar um link em termos de nível de qualidade de vídeo, a partir da comparação com limiares estabelecidos através de experimentações, para identificar o nível de qualidade de vídeo provido por um dado link.

Com base nos limiares estabelecidos LQ_{bom} e LQ_{ruim} é possível analisar o valor do parâmetro, de forma que o nó receba um valor mais alto no cálculo da função e tenha impacto no DFD.

$$LQ = \begin{cases} 0 & \text{se } LQ > LQ_{bom} \\ \frac{1}{1+e^{-c(LQ-x)}} & \text{se } LQ_{ruim} < LQ < LQ_{bom} \\ -1 & \text{se } LQ < LQ_{ruim} \end{cases} \quad (4.2)$$

Na Equação 4.2, se o valor de LQ for maior que o limiar LQ_{bom} , o valor retornado é 0 e, conseqüentemente, é adicionado 0 a função DFD, representando que a qualidade do link não apresenta nenhum impacto significativo. Se LQ , todavia, estiver entre os limiares LQ_{ruim} e LQ_{bom} , a função sigmóide é utilizada para representar a distribuição do parâmetro de qualidade do link com base no seu valor de entrada, apresentando como saída um valor que varia na escala de 0 a 1. Esta função é utilizada também para calcular os valores dos outros parâmetros. Requer um parâmetro x para delimitar o centro da sigmóide e c para regular a taxa de crescimento, como exemplificado na Figura 17.

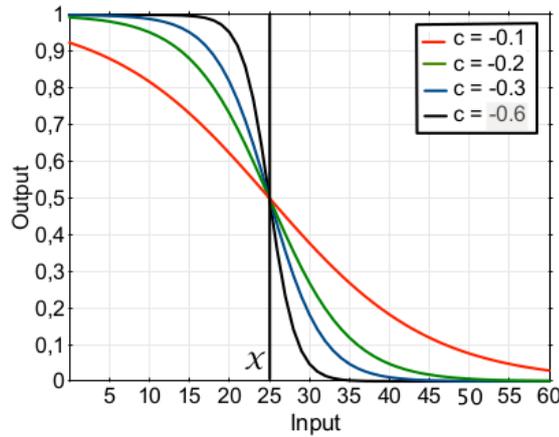


Figura 17: Função Sigmóide

4.1.2.2 Estado do Buffer

Em um cenário com transmissão simultânea de múltiplos fluxos de vídeo, *buffer overflow* pode ser um problema frequente nos nós intermediários que compõem a rota. Por isso, o protocolo também considera o estado do buffer em um determinado nó como parâmetro para cálculo do DFD, já que isso possibilita o estabelecimento de uma rota persistente que evite a seleção de um nó que já possua uma alta carga de tráfego. Por isso, o parâmetro BS ajuda a prevenir buffer overflow, minimizando a perda de pacotes, atrasos e jitter, assim como provendo balanceamento de carga entre os nós.

Cada N_R deve levar em consideração o número de fluxos de vídeo $nFlow$ que ele irá transmitir se ele tornar-se o encaminhador eleito. Deve também considerar o fluxo de entrada de pacotes (pacotes/segundo) requeridos por cada fluxo de vídeo $dataRate_{in}$. Com estas duas informações, o nó é capaz de estimar a taxa de pacotes de entrada para todos os fluxos de vídeo. Cada nó N_R também sabe qual a taxa de saída dos pacotes que está transmitindo $dataRate_{out}$. Com isso, é possível calcular o tamanho da fila no tempo BS_{t+1} de acordo com a Equação 4.3.

$$BS_{t+1} = rate_{out} - (nFlow \times dataRate_{in}) \quad (4.3)$$

Finalmente, cada N_R deve computar o estado do *buffer* com base na Equação 4.4, utilizada para calcular seu valor seguindo a função sigmoidal já apresentada, e adicionar seu valor na função DFD.

$$BS = \frac{1}{1 + e^{(-c(BS_{t+1} - BS_{max}/2))}} \quad (4.4)$$

4.1.2.3 Energia Residual

VANTs de pequeno porte têm grandes limitações de bateria e, por isso, o projeto de protocolos para este tipo de nó móvel deve levar em consideração a energia residual de um dado candidato N_R para seleção de um melhor encaminhador. Objetiva-se com isso, alcançar o provimento de suporte a eficiência energética, evitando falhas de rotas, perda de pacotes ou falhas no veículo em razão de esgotamento de bateria.

O cálculo do valor da energia residual no DFD é determinado através do cálculo da energia mínima necessária para efetuar todas as transmissões em curso EN_{tx} , incluindo a que será aceita se o nó for eleito e, também, a energia necessária para que o nó volte para a base EN_v para possível troca de bateria. EN_{tx} é calculado com base no número total de pacotes do fluxo $nPkts$ multiplicado pela energia necessária para transmitir $ENpkt_{tx}$ cada um (informações obtidas da camada física). EN_v é calculado com base na velocidade do veículo N_{vel} em razão da energia necessária para movimentar-se com esta velocidade EN_{fly} . A partir destas equações, é possível calcular a quantidade de energia mínima EN_{min} que um nó necessita ter para ser qualificado como encaminhador.

$$\begin{aligned} EN_{tx} &= nPkts * ENpkt_{tx} \\ EN_v &= N_{vel} * EN_{fly} \\ EN_{min} &= EN_{tx} + EN_v \end{aligned} \quad (4.5)$$

Com tais equações, se estabelece o cálculo da energia:

$$EN = \begin{cases} 0 & \text{se } EN = EN_{max} \\ \frac{1}{1+e^{-c(EN-EN/2)}} & \text{se } EN_{min} \leq EN < EN_{max} \\ -1 & \text{se } EN < EN_{min} \end{cases} \quad (4.6)$$

4.1.2.4 Índice de Conectividade

A mobilidade dos VANTs em um espaço 3D é outro tipo de informação de contexto muito importante em FANETs, já que ela agrava a comunicação entre os nós através da eminente possibilidade de quebra de links. Para isso, a proposta de (COSTA, 2014) foi considerada como um dos parâmetros que compõem o mecanismo de tomada de decisão de rotas neste trabalho. Seu funcionamento já foi explorado na Seção 3.3.2, de forma que iremos apenas discutir brevemente a vantagem da sua utilização como parâmetro nesta proposta e as adaptações realizadas.

O IC provê suporte às estratégias de encaminhamento para a tomada de decisão sobre o nó próximo salto. É composto por critérios que consideram os elementos presentes na mobilidade dos VANTs como a direção, a velocidade, a distância e o tempo de contato entre dois VANTs. Dessa forma, o IC é um dado que auxilia na seleção de um nó próximo salto com menor influência da mobilidade na transmissão multimídia, evitando problemas de comunicação, atraso e perdas de pacote durante a transmissão multimídia. Para isso,

cada nó candidato N_R computa seu IC com base na Equação 4.7, por meio dos critérios de tempo de expiração do enlace TEx , direção $DirI$ e progresso p . Considera-se os pesos Φ fixos para cada parâmetro como forma de destacar a importância de cada um, de forma que $\sum_{\Phi} = 1$.

$$IC = \Phi_1 \times TEx_{N_i, N_j} + \Phi_2 \times DirI_{N_i, D} + \Phi_3 \times p_{N_i, D} \quad (4.7)$$

Os critérios que compõem o IC apresentam características essenciais para assegurar uma seleção eficiente e robusta de nós próximos saltos. Mais especificamente, TEx estima a duração de um link no alcance de rádio r dos nós analisados com base nas suas variações de velocidade e direção, de modo que $\theta_i, \phi_i, \theta_j, \phi_j$ representam as direções de mobilidade. Valores altos de TEx_{N_i, N_j} indicam que os nós estão movendo-se em direções opostas ou com velocidades incompatíveis e, conseqüentemente, o link é mais suscetível a quebra devido a mobilidade, como apresentados anteriormente na Equação 3.7.

$DirI_{N_i, D}$ é computada baseada na Equação 3.9 e indica se um N_i está movendo-se em direção a D . Isto é porque a seleção de um nó movendo-se em direção oposta ao destino aumentaria o número de saltos, reduzindo a robustez e aumentando a probabilidade de perda de pacotes. Representa-se θ_1 como o ângulo existente entre o eixo x e os componentes de velocidade de um nó N . θ_2 é o ângulo entre o eixo x do nó N_i e a linha imaginária que o conecta com D . $angleTh$ representa o limiar utilizado para escolher um nó que está em uma área pré-definida, permitindo a seleção de nós com melhores direções em relação a D .

Utiliza-se o progresso para reduzir o número de saltos de um N_i para D já que rotas mais longas reduzem a taxa de entrega de pacotes. Por esta razão, é preferível a seleção de nós mais próximos ao destino. Neste trabalho, optou-se por utilizar o progresso ao invés da variável $DisI$ pois, durante os testes, verificou-se que a utilização de p trazia mais exatidão na escolha do nó encaminhador e, conseqüentemente, mais benefícios aos resultados. A Equação 4.8 apresenta a função de cálculo de p . Onde, assim que um dado nó N_R for capaz de atingir D , por apresentar distância menor que o seu raio de alcance, ele adiciona 0 à função e não impacta no cálculo do IC . Por outro lado, se a distância for maior que seu raio de alcance, é utilizada a função que calcula o impacto do progresso no IC de acordo com a distância do nó em relação ao destino. Desta maneira, é possível priorizar nós que tenham capacidade de efetuar transmissões diretas, buscando evitar a inserção de múltiplos saltos na rota.

$$p = \begin{cases} p_{N_i, D} = \frac{1}{1 + e^{(-c(dist(N_i, D) - r))}} & \text{se } dist(N_R, D) > r \\ 0 & \text{se } dist(N_R, D) < r \end{cases} \quad (4.8)$$

4.1.3 Grau de Importância dos Parâmetros de Contexto

Sabe-se que a maior parte dos trabalhos que considera múltiplos parâmetros para cálculo de tempo de contenção, o faz sem aplicar formalidades. Isso significa que a mensuração da importância e do impacto de cada parâmetro no resultado final é baseada somente no conhecimento dos projetistas do protocolo. Um determinado cientista pode supor, por exemplo, que a mobilidade é o fator que mais impacta no roteamento, aumentando seu valor de peso em relação aos demais com base no seu conhecimento teórico. Outro cientista pode crer, na verdade, que o *buffer* é o maior influenciador e, por isso, o torna prioridade aumentando seu valor de peso no cálculo do seu impacto no DFD.

Contudo, tais assertivas são meramente baseadas no conhecimento dos projetistas, não levando em consideração o seu valor lógico exato baseado em testes formais. Com o objetivo de mensurar o impacto real de cada parâmetro de contexto na qualidade final dos vídeos, uma RB foi utilizada para analisar os dados coletados em primeira instância já que não se tinha domínio completo da correlação destas variáveis. Foram realizadas 33 simulações prévias que transmitiam múltiplos fluxos de vídeos através do CABR, e foram coletados os valores dos parâmetros considerados para cálculo de DFD neste trabalho (*LQ*, *EN*, *BS*, *IC*), assim como o valor de SSIM atingido no destino em cada simulação. Tal estratégia teve como objetivo analisar o quanto cada parâmetro impactou no SSIM durante a transmissão, de acordo com seus valores durante a simulação, e, a partir destes dados, gerar um vetor peso capaz de mensurar numericamente o impacto e consequente importância de cada uma.

Após este processo, uma base de dados foi montada contendo estas informações. Os dados obtidos nas simulações foram tratados, de forma a extrair as medidas que fornecessem de forma clara o grau de confiança dos resultados obtidos, como suas médias e desvios padrões. A Tabela 7 apresenta os respectivos valores estatísticos de média e desvio padrão para cada critério avaliado.

Tabela 7: Média e desvio padrão para os parâmetros analisados

	LQ	IC	BS	EN	SSIM
Média	31,061	711,012	16,028	256,713	0,827
Desvio Padrão	4,733	4,269	0,316	12,916	0,002

Para o correto tratamento dos dados obtidos, é imperativa a realização do seu pré-processamento antes de submetê-los aos demais sistemas de operação. A extração direta de padrões a partir de grandes volumes de dados pode se tornar uma tarefa inviável. Grandes volumes de dados podem gerar um espaço de busca de padrões combinatoriamente explosivo. Além do mais, as limitações de tempo de processamento e de memória são fatores impeditivos para a submissão direta dos dados, sem o estabelecimento de qualquer filtro, aos algoritmos de mineração de dados (MD) (KASAHARA; CONCEIÇÃO, 2008).

A busca de conhecimento em grandes bases de dados pode ocasionar o aumento das chances de se encontrarem padrões pouco significativos e até mesmo espúrios. Uma

solução para esses problemas envolve a tentativa de selecionar uma amostra significativa da base de dados da aplicação, além de prover mecanismos de limpeza e transformação dos dados, de forma a melhorar a qualidade e adequá-los aos objetivos propostos para a aplicação (TAN; STEINBACH; KUMAR, 2006).

A realização do pré-processamento foi realizada na base de dados obtida a partir das seguintes técnicas:

- Limpeza dos dados, com objetivo de tratar os valores ausentes e ruídos nos dados, além de corrigir problemas relativos à inconsistência
- Integração e transformação dos dados, que é utilizada quando os dados que serão submetidos à ferramenta de mineração de dados são provenientes de múltiplas fontes, evitando redundância de dados, bem como a criação de novos atributos a partir de outros, normalização de valores, etc
- Redução dos Dados, eliminando atributos que não são relevantes para a tarefa de mineração de dados, além de prover mecanismos de discretização dos dados.

A próxima etapa foi a aplicação de RB de modo a correlacionar os dados obtidos para extração de conhecimento. A escolha de RB neste processo de extração de conhecimento foi motivada pelo fato de que a influência de uma variável sobre a outra considera suas correlações e relações de dependência através de cálculos probabilísticos utilizando o teorema de Bayes. Em conjunto com a RB, foi aplicada uma técnica de correlação de dados através de um método de decisão multicritério para obtenção do vetor peso, buscando unificar e representar a influência que cada variável possui sobre a outra de forma quantitativa.

O uso de RB em conjunto com técnicas de decisão de múltiplos critérios é utilizado de forma a eliminar as características pouco realistas destes métodos, em razão da subjetividade de definição de influências. Para encontrar a solução mais satisfatória entre muitas alternativas, tendo em conta vários critérios que podem ser conflitantes, especialistas são consultados e sugerem valores de importância para cada critério. Tais assertivas, porém, são baseadas na maioria das vezes apenas em conhecimento subjetivo, o que acaba tornando o sistema sujeito a falhas. Para contornar esta limitação, alguns autores utilizam uma estrutura especial de RB em conjunto com técnicas de decisão multicritério, como o AHP (FU; DELCROIX, 2011).

Gerou-se uma RB utilizando o algoritmo de busca e pontuação K2, bastante difundido na literatura (COOPER; HERSKOVITS, 1992). Para tal, foi utilizado o aplicativo Bayesware Discoverer Student 1.0. A Figura 18 mostra a rede que foi montada no aplicativo, contendo cinco nós e suas respectivas dependências condicionais.

O objetivo foi observar o comportamento dos critérios definidos e analisar a influência que um critério tem sobre o outro, quantificando o impacto que as variáveis geram sobre os estados de SSIM e traçando uma correlação de dados que é necessária no processo de tomada de decisão.

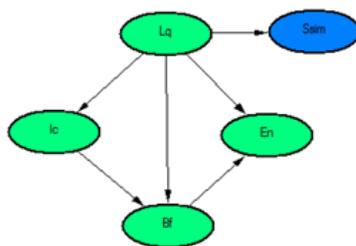


Figura 18: Rede Bayesiana

O Teorema de Bayes emprega o conceito de entropia condicional $H(Y|X)$. Define-se entropia condicional como a medida da incerteza que torna possível obter o valor de Y dado que só é conhecido o valor de X . Ao inferir o estado $X_i = 1$, por exemplo, verifica-se que o impacto que as alterações entre os estados da variável X causam nos estados da variável Y . Também é possível observar o quanto a inferência realizada em todos os estados da variável $SSIM$ está impactando nos estados das quatro variáveis as quais busca-se determinar o peso.

A Tabela 8 apresenta uma matriz de comparação montada a partir das inferências realizadas na RB. A distribuição de probabilidades foi discretizada por frequência em quatro faixas (extraída do aplicativo Bayesware Discoverer) para as variáveis LQ , IC , BS e EN e 6 faixas para $SSIM$. Neste caso $H(Y|X)$, onde $Y = (LQ, IC, BS, EN)$ e $X = SSIM$. As influências de cada estado entre o par X e Y são somadas entre si, de forma a obter um índice de carga correspondente a cada variável em relação ao $SSIM$.

Um exemplo deste processo é a correlação da variável $SSIM$ sobre LQ . A inferência do primeiro estado de LQ gerou quatro valores: 0.145, 0.843, 0.006 e 0.006. Estes valores representam o impacto que o primeiro estado de $SSIM$ gerou sobre os estados em LQ . O mesmo processo foi repetido para todos estados de $SSIM$. Para a segunda inferência em $SSIM$, os valores obtidos em LQ foram 0.128, 0.250, 0.495 e 0.128. E assim sucessivamente para os outros estados. Foi feito, então, um somatório entre a diferença de probabilidades (antes da inferência e após a inferência) de todos os valores obtidos nos estados da variável que está sendo observada, neste caso, LQ .

Exemplificando, em um dos casos, a probabilidade de LQ antes da inferência possuía o valor de 0.231. Após a inferência $SSIM$, a probabilidade passou para 0.145. Portanto, houve uma variação de 0.086. A probabilidade de LQ em um segundo estado, dada a inferência de $SSIM$, que antes era de 0.231, passou para 0.128, apresentando uma diferença de 0.103. O mesmo processo foi repetido para as 96 interações sobre a RB.

Após a obtenção da matriz de comparação entre critérios, desenvolveu-se um aplicativo para definição dos pesos de cada critério. Este aplicativo realizou a divisão dos elementos de cada coluna pela soma da coluna (normalização) e posteriormente soma os elementos em cada linha resultante, dividindo esta soma pelo número de elementos na linha, conforme estabelecido no método AHP para obtenção do vetor do somatório das interações de $SSIM$ com as variáveis do sistema $w = [0, 3990, 1280, 2690, 204]$.

Tabela 8: Matriz de Comparação a partir das Inferências Realizadas em RB

	Lq — SSIM (a)	Lq — SSIM (b)	Lq — SSIM (c)	Lq — SSIM (d)	Lq — SSIM (e)	Lq — SSIM (f)	Soma
Lq (a)	0,086	0,103	0,167	-0,73	-0,662	-0,259	2,007
Lq (b)	-0,612	-0,019	0,228	0,218	0,195	-0,019	1,291
Lq (c)	0,225	-0,264	-0,081	0,218	0,195	0,221	1,204
Lq (d)	0,3	0,178	-0,315	0,293	0,27	0,056	1,412
							5,914
Ic (a)	-0,264	-0,045	0,143	0,007	0,004	-0,019	0,482
Ic (b)	0,173	-0,138	0,002	-0,096	-0,088	0,059	0,556
Ic (c)	-0,067	0,034	-0,019	0,11	0,101	0,008	0,339
Ic (d)	0,157	0,148	-0,127	-0,022	-0,017	-0,05	0,521
							1,898
Bf (a)	-0,143	0,061	0,183	-0,403	-0,366	-0,174	1,33
Bf (b)	-0,355	-0,019	0,176	0,007	0,004	-0,045	0,606
Bf (c)	0,204	-0,131	-0,085	0,11	0,099	0,124	0,753
Bf (d)	0,293	0,088	-0,274	0,286	0,262	0,093	1,296
							3,985
En (a)	-0,083	0,031	0,025	0,008	0,007	-0,025	0,179
En (b)	-0,34	-0,059	0,149	0,109	0,097	0,007	0,761
En (c)	0,219	-0,085	-0,146	0,213	0,193	0,138	0,994
En (d)	0,202	0,111	-0,029	-0,331	-0,298	-0,121	1,092
							3,026

4.1.4 Esquema de Adaptação em Tempo de Execução

O grau de importância para cada informação de contexto deve mudar em tempo de execução, já que considerar pesos fixos para cada parâmetro é irrealista e torna difícil lidar com as mudanças frequentes de contexto sofridas pela rede durante a transmissão multimídia.

Desta maneira, o método AHP é novamente utilizado já que provê uma técnica estruturada de auxílio a problemas de tomada de decisão com múltiplos parâmetros envolvidos. Isto é possível através da comparação em pares entre os valores numéricos de cada parâmetro c e seus graus de importância relativos (Tabela 9), de forma a ajustar seus pesos em tempo de execução. Esta Tabela foi adaptada, através da utilização de um número menor de graus de importância pra simplificar a comparação, de forma que o número de graus apresentados comporta o número de parâmetros e o grau de detalhamento necessário para este caso.

Tabela 9: Importância Contextual entre Pares CABR

c_{ij}	Grau de Importância
3	i é muito mais importante que j
2	i é mais importante que j
1	i é tão importante quanto j
1/2	i é menos importante que j
1/3	i é muito menos importante que j

Então, cada nó N_R constrói sua própria matriz para comparação de parâmetros de acordo com seus valores instantâneos. A matriz é representada conforme a Equação 4.9 onde o valor de $c_{i,j}$ representa a importância do elemento i em relação ao elemento j na célula da matriz.

$$C_{4,4} = \begin{matrix} \text{critério} & c_1 & c_2 & c_3 & c_4 \\ c_1 & \left(\begin{matrix} c_{1,1} & c_{1,2} & c_{1,3} & c_{1,4} \\ c_{2,1} & c_{2,2} & c_{2,3} & c_{2,4} \\ c_{3,1} & c_{3,2} & c_{3,3} & c_{3,4} \\ c_{4,1} & c_{4,2} & c_{4,3} & c_{4,4} \end{matrix} \right) \end{matrix} \quad (4.9)$$

Foram definidos *thresholds* para cada parâmetro de contexto conforme simulações anteriores e trabalhos relacionados, dividindo-os em três categorias: ruim, médio e bom (Tabela 10). Consideram-se os valores de contexto em tempo real de forma a compará-los com os *thresholds* definidos e aplicar o AHP para estimar suas importâncias em relação aos seus pares. Uma determinada métrica i é mais importante que uma métrica j se seu valor está em um limiar mais crítico que o valor da métrica j , de forma a evitar a escolha de nós que estejam com valores de parâmetro críticos.

Tabela 10: Thresholds CABR

Parâmetro	Limiares
Qualidade do Link (LQ)	$(0, LQ_{ruim}), (LQ_{ruim}, LQ_{bom}), (LQ_{bom}, LQ_{max})$
Índice de Conectividade (IC)	$(\infty, IC_{ruim}), (IC_{ruim}, IC_{bom}), (IC_{bom}, IC \approx 0)$
Energia Residual (EN)	$(EN \approx 0, EN_{min}), (EN_{min}, EN_{bom}), (EN_{bom}, E_{max})$
Estado do Buffer (BS)	$(BS \approx_{max}, BS_{med}), (BS_{med}, BS_{bom}), (BS_{bom}, BS \approx_{vazio})$

Após a aplicação do AHP, é possível obter os pesos relativos através da normalização de cada elemento na matriz, dividindo-o pela soma de cada coluna. A importância de cada critério é então representada por um vetor peso w (Equação 4.10), que contém os coeficientes de multiplicação correspondentes a cada parâmetro considerado no DFD. Em casos onde todos os parâmetros coincidem no mesmo limiar, o AHP utilizará o vetor peso obtido através da RB.

$$w = \Phi_{LQ}, \Phi_{EN}, \Phi_{BS}, \Phi_{IC} \quad (4.10)$$

4.1.5 Modo de Rota Persistente

O CABR evita os inconvenientes das transmissões em *broadcast* através da utilização de um modo de rota persistente, onde os nós transmitem os pacotes subsequentes em modo *unicast*. Os fluxos de vídeo devem ser entregues mesmo com mudanças constantes de topologia, como existente em FANETs. De maneira similar ao XLinGO, o CABR conta com um mecanismo capaz de detectar e reagir a falhas de rota. Porém, o CABR emprega o mecanismo de predição de posicionamento utilizado em (COSTA, 2014) para monitorar a distância entre um dado nó e o seu próximo salto de forma a detectar possíveis falhas de rota.

O CABR considera que cada nó que compõe a rota deve estar ciente se a rota continua confiável ou válida de forma que os pacotes subsequentes possam continuar sendo

transmitidos por ela. Isto é feito através de uma mensagem do nó encaminhador N_F para o seu nó anterior N_S que contém informações como a qualidade do link calculadas sobre os últimos k pacotes recebidos, suas coordenadas geográficas x , y e z , sua velocidade N_{vel} e suas coordenadas de direção θ_j e ϕ_j . Desta maneira, N_S deve retornar ao modo de contenção assim que perceber queda na qualidade do link ou possível desconexão.

A predição de posicionamento permite que um nó N_S estime a localização do seu nó $N_F(x_{pred}, y_{pred}, z_{pred})$ com base na Equação 4.11. Denota-se Δt como a diferença entre o *timestamp* atual t_c e o *timestamp* t_l da última mensagem recebida por N_S do nó N_F . Em FANETs, um nó N_F pode sair da área de alcance de um nó N_S . Dessa forma, a predição de mobilidade permite que o CABR monitore a distância entre os nós e escolha outro nó antes de haver uma desconexão.

$$\begin{aligned} x_{pred} &= x'_j + \Delta t(v_j \sin\theta_j \times \cos\phi_j) \\ y_{pred} &= y'_j + \Delta t(v_j \sin\theta_j \times \sin\phi_j) \\ z_{pred} &= z'_j + \Delta t(v_j \cos\phi_j) \end{aligned} \quad (4.11)$$

4.2 Conclusões do capítulo

Este capítulo teve o objetivo de apresentar o protocolo CABR, para distribuição de múltiplos fluxos de vídeo em FANETs. Em comparação aos trabalhos descritos no Capítulo 3, o CABR é um protocolo que busca adicionar realismo na decisão dos nós que farão parte de suas rotas, sempre considerando o contexto da rede e do nó em tempo real para obter mais confiabilidade no roteamento.

Neste capítulo foi apresentada a visão geral do protocolo e dos módulos que o compõem, bem como sua funcionalidade. Também foram descritos os parâmetros considerados para a escolha do nó encaminhador e de que forma o protocolo os utiliza para tomar suas decisões em tempo de execução.

CAPÍTULO 5

Avaliação de desempenho

Este capítulo é responsável por descrever o processo de avaliação de desempenho. Para isso, ele apresenta a metodologia utilizada para as simulações, incluindo o ambiente e o cenário de avaliação. Além disso, os impactos e benefícios do uso do protocolo na qualidade final do vídeo foram avaliados por meio de gráficos. Foram utilizadas métricas de avaliação de QoE, sendo estas descritas na Seção 2.

5.1 Descrição da simulação

Utilizou-se um framework do OMNeT++, o M3WSN (ROSÁRIO et al., 2013) executando em uma nuvem Microsoft Azure. Os resultados foram obtidos através da média sobre 33 simulações que executam com diferentes seeds randômicas para prover um intervalo de confiança de 95%. As simulações executam durante 200 segundos com um modelo de perdas log-normal. Os parâmetros de simulação foram configurados de forma a permitir variações no canal sem fio no decorrer do tempo, assimetria de link, e raios de alcance irregulares, como esperado em um cenário FANET real.

Cada conjunto de 33 simulações simulava um cenário diferente. Isto é: um entre os 5 protocolos, um número x de nós transmissores, uma quantidade y de nós na rede e uma velocidade de movimentação. Isso significa que, para cada protocolo, existiam inicialmente 72 cenários de simulação que seriam repetidos, cada um, 33 vezes.

A Figura 19 ilustra a estrutura dessas simulações, onde cada protocolo era simulado para 1 a 4 nós fontes; 20, 30 ou 40 nós na rede; e com velocidades variando de 5 a 30 m/s. Cada simulação levava em média 90 segundos para ser executada. Multiplicando este tempo pelo número de repetições (33) e cenários totais (72), chegou-se a um total de, em média, 59 horas de simulação.

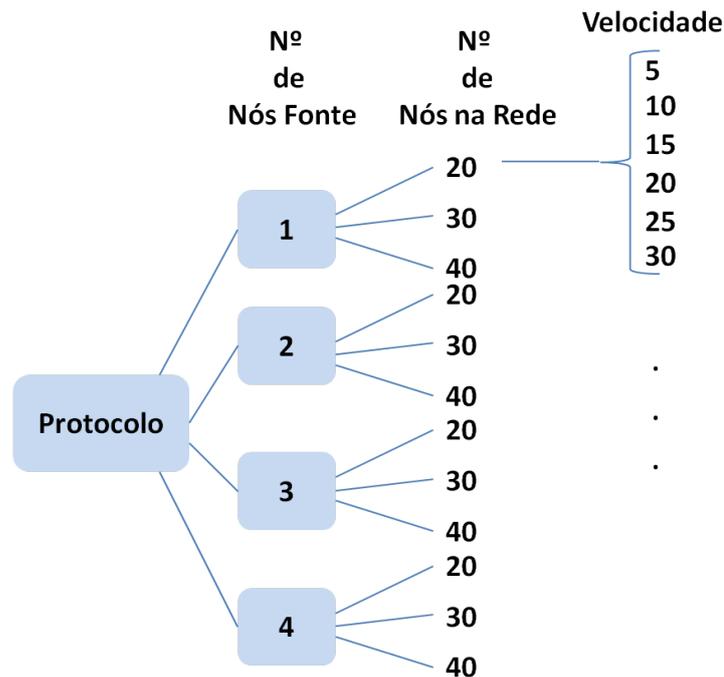


Figura 19: Estrutura de formação de cenários para simulação

Para montagem dos cenários, conjuntos de 30 e 40 nós foram dispostos em um plano com o destino localizado nas coordenadas (75, 0, 0) e alguns nós fonte movendo-se e transmitindo fluxos de vídeo simultâneos. Todos os nós utilizaram o modelo de mobilidade de Gauss-Markov gerado através da ferramenta BonnMotion (ASCHEBRUCK et al., 2010), por ser o comportamento de mobilidade que mais se aproxima dos nós em uma FANET (BEKMEZCI; SAHINGOZ; TEMEL, 2013) no mundo real.

A velocidade mínima dos nós era de 1m/s e as máximas variavam entre os valores de 5, 10, 15 e 20m/s. Além disso, foram considerados cenários com 1, 2 e 3 nós fonte transmitindo fluxos de vídeos simultâneos². Os nós estão equipados com rádios IEEE 802.11 com potência de transmissão de 12dBm, resultando em um raio de transmissão de 15m. O protocolo MAC utilizado foi o CSMA/CA sem mensagens RTS/CTS e retransmissões, com um mecanismo de descarte de pacotes *drop tail* que elimina os pacotes no fim da fila, em caso de estouro de buffer. Também utilizou um mecanismo de redundância *QoE-aware* (ROSÁRIO et al., 2014b) para adicionar pacotes redundantes somente a frames prioritários na camada de aplicação.

As simulações avaliaram o comportamento do CABR quando comparado a outros protocolos oportunistas *beaconless*, quanto ao desempenho da rede e da qualidade do vídeo entregue aos usuários. O mecanismo ECORA foi implementado nos protocolos XLinGO e BLR para evidenciar a importância da característica adaptativa do CABR, como maneira de comprovar através de testes que somente a implementação do ECORA

²Os resultados obtidos das simulações com as velocidades de 25 e 30m/s, 20 nós na rede e com 4 nós fontes não foram apresentadas nesta avaliação por terem apresentado resultados de desempenho e QoE muito baixo

não é suficiente para melhorar o desempenho da proposta do trabalho. Desta forma, o CABR é comparado aos seguintes protocolos: BLR, XLinGO, BLR-E (BLR + ECORA), XLinGO-E (XLinGO + ECORA).

Os nós fonte transmitiram as sequências de vídeo Hall, Container, UAV1 e UAV3, que possuem diferentes características visuais e estruturais. Os vídeos foram retirados da biblioteca online de vídeos YUV e do YouTube. As sequências Hall e Container têm características similares às capturadas por um VANT parado em uma determinada área e as sequências UAV1 e UAV3 tem níveis de complexidade e movimentação comparadas às de um vídeo capturado por um VANT em voo.

A codificação dos vídeos utilizou o codec H.264 a 300 kbps, 30 frames por segundo, tamanho de GoP de 18 frames, e formato de 352 x 288. O decodificador utilizou o método *Frame-Copy* para substituir cada frame perdido com o último recebido para reduzir a perda de frames e manter a qualidade do vídeo. Em termos de avaliação de qualidade do vídeo, esquemas de QoS não são suficientes para avaliar a qualidade de aplicações multimídia, já que falham em capturar aspectos subjetivos do conteúdo de vídeo que são relacionados a experiência humana. Neste contexto, métricas de QoE superaram tais limitações e, por isso, foram consideradas as métricas SSIM e VQM para avaliação das sequências de vídeo transmitidas pelas simulações neste trabalho.

Os VANTs se comunicaram por meio do padrão IEEE 802.11b com uma taxa de transmissão de 11 Mbps, com capacidade de capturar fluxos de vídeo em tempo real, e transmití-los por meio de extensões do framework *EvalVid - A Video Quality Evaluation Tool-Set* no simulador.

Tabela 11: Parâmetros de Simulação

Parâmetros	Valores
Tamanho da Área	150x150m
Número de VANTs	30, 40
Número de Nós Fonte	1, 2, 3
Velocidades	5, 10, 15, 20 m/s
Codificação dos Vídeos	H.264
Vídeos	Hall, Container, UAV1, UAV3
Número de Frames	30fps
Potência de Transmissão	12dBm
Raio de Transmissão	15m

5.2 Análise dos resultados

As Figuras 20, 21 e 22 mostram o desempenho do CABR quando comparado aos outros protocolos, através da métrica SSIM. Desta maneira, é possível analisar o impacto da mobilidade e do número de nós fontes na qualidade final do vídeo. Analisando os

resultados das Figuras é possível verificar que o CABR provê disseminação de vídeo com qualidade superior em comparação às outras propostas, apesar das consequências de mobilidade e das múltiplas transmissões de vídeo.

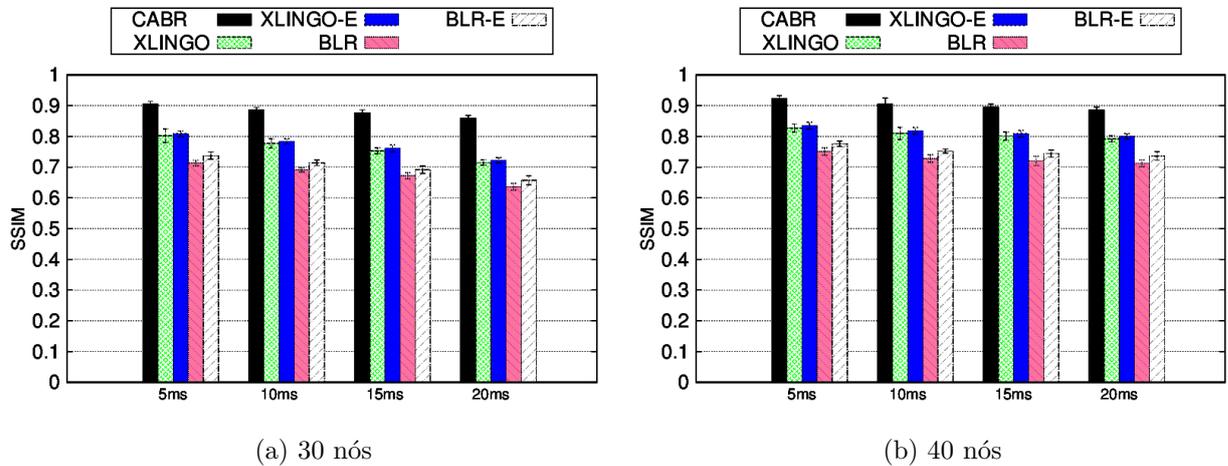


Figura 20: Nível de Qualidade de Vídeo para 1 nó fonte, em cenários de 30 e 40 nós

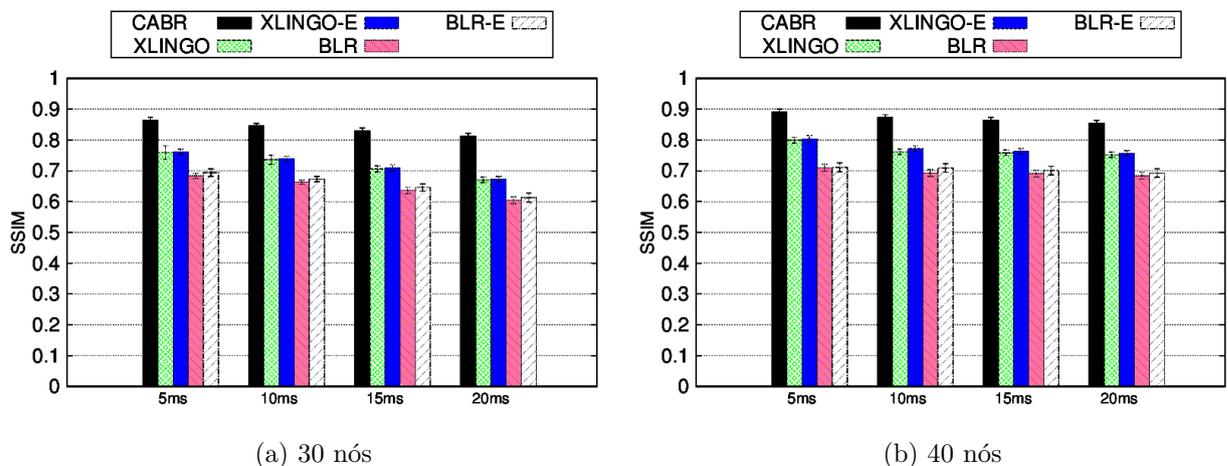


Figura 21: Nível de Qualidade de Vídeo para 2 nós fonte, em cenários de 30 e 40 nós

Vídeos transmitidos via BLR tiveram um nível de qualidade baixo já que considera somente a informação geográfica para computar o DFD. O BLR-E apresenta uma performance melhorada pois considera influências maiores da mobilidade baseando-se nas informações geográficas 3D como métrica para computar o DFD e por isso provê a seleção de nós com variações menores nas suas velocidades e direções.

Contudo, vídeos transmitidos via BLR-E têm qualidade mais baixa que os vídeos transmitidos via XLinGO e XLinGO-E, já que estes computam o DFD baseados em múltiplas informações de contexto e não somente na localização geográfica. Pode-se observar que o XLinGO-E provê a disseminação com melhor qualidade que o XLinGO graças à

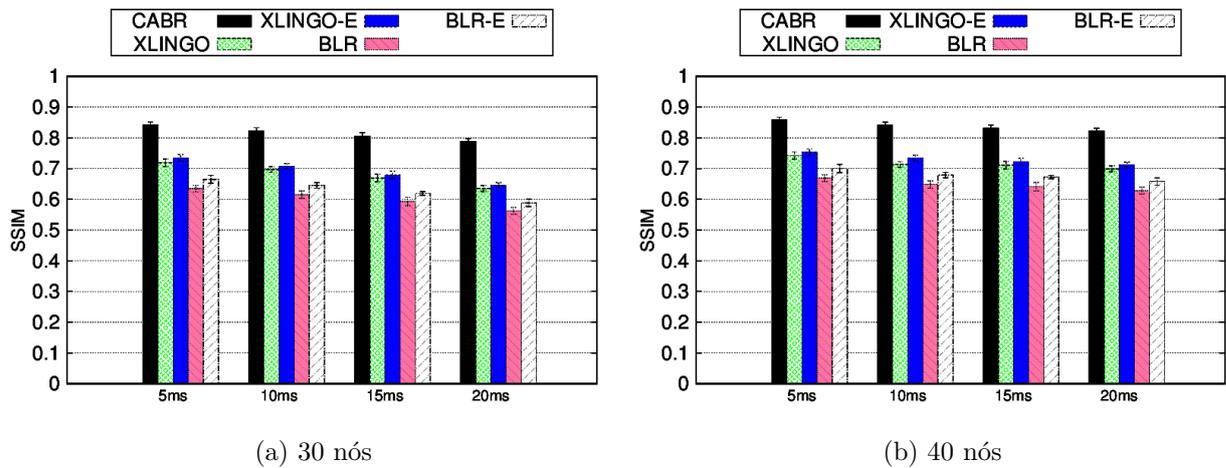


Figura 22: Nível de Qualidade de Vídeo para 3 nós fonte, em cenários de 30 e 40 nós

consideração da conectividade na seleção dos nós, salientando mais uma vez a importância e o impacto que este parâmetro tem na escolha de nós e caminhos e entrega de melhores vídeos.

As transmissões de vídeo via CABR são aproximadamente 15% superiores em qualidade do que as transmissões efetuadas via XLinGO e XLinGO-E, com variações de quantidade de nós fontes e velocidades de movimentação dos nós. Isto é porque o CABR inclui previsão de mobilidade para monitorar a distância entre um nó e o encaminhador de forma a detectar falhas de rota; considera graus de importância formais obtidos através da análise por uma RB, de modo a analisar o real impacto dos parâmetros na qualidade final do vídeo; e utiliza o AHP para adaptar as decisões baseadas no estado da rede em tempo real.

Deste modo, pode-se concluir, também, que o CABR transmite vídeos com uma perda de frames reduzida mesmo em momentos de congestionamento, através da seleção de melhores nós encaminhadores. Tal perda é reduzida em 20% quando comparada ao XLinGO-E no caso de dois nós fonte transmitindo simultaneamente e nós movendo-se a 5m/s. Também reduz em 10% os pacotes perdidos por baixa sensibilidade que o XLinGO e o XLinGO-E, o que significa que CABR reduz as falhas de rota. O nível de qualidade de vídeo reduz quando a densidade dos nós diminui (o que pode ser constatado observando a diferença na variação de densidade entre os pares nas Figuras 20, 21 e 22. Isto é em razão do número de possíveis vizinhos, que diminui e minimiza a possibilidade de estabelecer/reestabelecer rotas confiáveis e persistentes entre um nó fonte e o destino.

As Figuras 23 e 24 apresentam os valores de SSIM e VQM, respectivamente, frame a frame. Desta forma, é possível visualizar a qualidade de vídeo atingida durante a transmissão em cada momento do vídeo. Para obtenção de resultados coerentes, foram analisadas sequências de vídeo transmitidas por um mesmo nó transmissor através do mesmo canal. Nos dois gráficos, é possível constatar que o CABR apresenta valores de SSIM e VQM superiores e mais constantes quando comparados aos demais protocolos,

que apresentam maiores oscilações em qualidade ao longo do vídeo. Estes valores mais constantes obtidos pelo CABR demonstram a adaptabilidade do protocolo e, consequentemente, maior confiabilidade na transmissão.

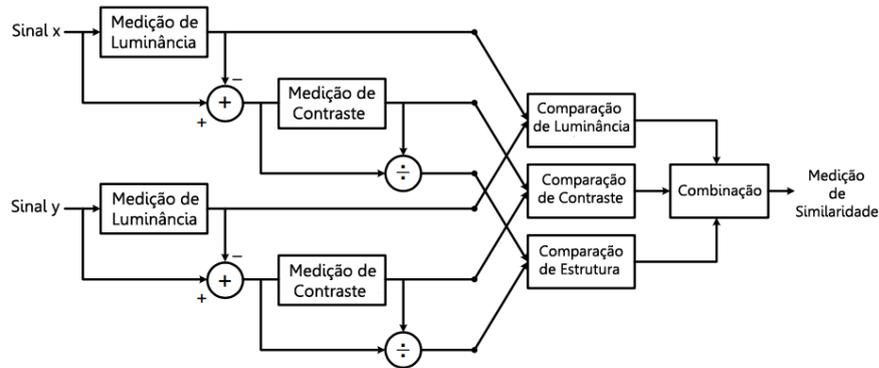


Figura 23: SSIM atingido por frame durante a transmissão do vídeo

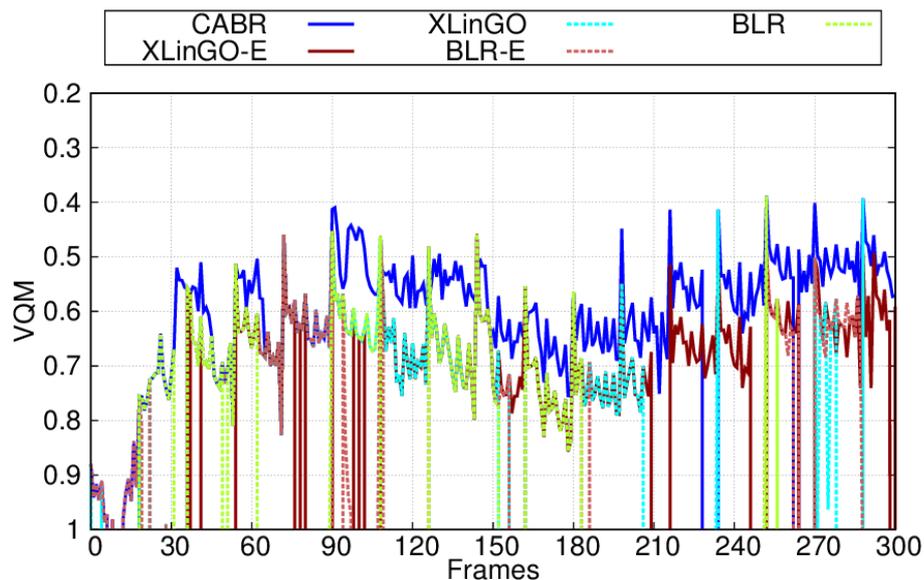


Figura 24: VQM atingido por frame durante a transmissão do vídeo

A Figura 25 exibe o frame 245 retirado das sequências transmitidas por cada protocolo, onde é possível visualizar o desempenho de cada protocolo na qualidade do vídeo em um determinado momento no tempo e compará-los ao frame original (Figura 25a). O frame foi escolhido por ilustrar um ponto na transmissão onde houve queda na qualidade de vídeo em todos os protocolos. As sequências de vídeo completas estão hospedadas em <https://www.youtube.com/watch?v=o7Qjnx9BFqE> para visualização.

A Figura 26 exibe a porcentagem total dos frames perdidos por protocolo para 1, 2 e 3 nós transmissores. Para isso, foram analisados os frames totais recebidos e a quantidade de frames perdidos por cada protocolo. Nota-se que o CABR apresenta a menor porcentagem entre todos os protocolos apesar do aumento de transmissores e consequente sobrecarga na rede. A escolha mais “minuciosa” dos nós encaminhadores



(a) Frame Original



(b) Frame CABR



(c) Frame XLinGO + Ecora



(d) Frame XLinGO



(e) Frame BLR + Ecora



(f) Frame BLR

Figura 25: Frames do vídeo UAV1 retirados das sequências de vídeo transmitidas por cada protocolo

resulta em uma maior confiabilidade na rota e menor perda de frames por eventuais desconexões. É importante ressaltar que CABR entrega vídeos com SSIM acima de 0.8 independentemente da velocidade dos nós, densidade e número de transmissões de vídeo o que não havia sido atingido por protocolos oportunistas *beaconless* existentes.

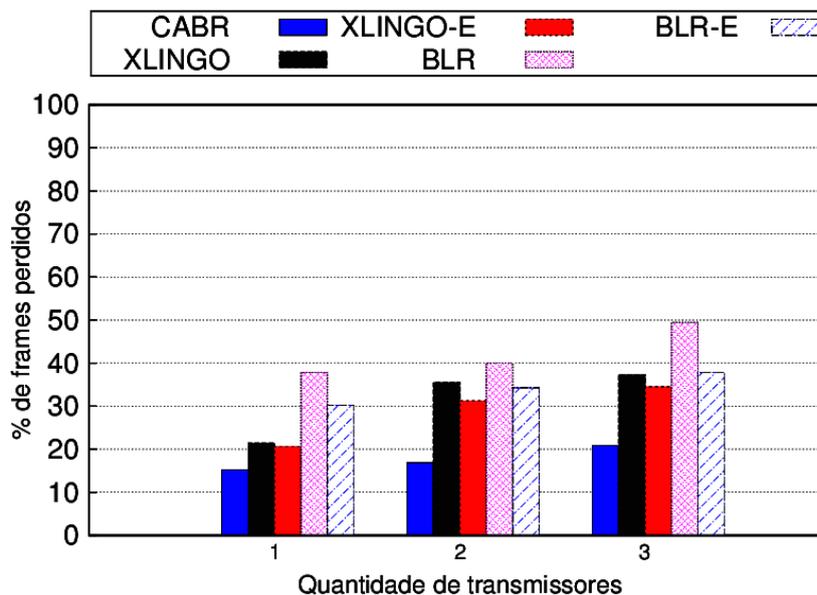


Figura 26: Porcentagem de Frames Perdidos por Protocolo

5.3 Conclusões do Capítulo

Analisando o desempenho dos protocolos avaliados neste trabalho, foi possível comprovar que a inclusão de conectividade calculada com base em informações 3D provê a seleção de nós com variações menores de velocidade e direção. Além disso, XLinGO, XLinGO-E, BLR e BLR-E tiveram pior performance quando comparados ao CABR em cenários como os aqui representados com nós móveis, transmissões simultâneas, e vídeos com diferentes características e níveis de complexidade. Isto é possível, em razão de o CABR construir rotas confiáveis através da combinação de múltiplas informações de contexto e sua posterior adaptação em tempo real. Também inclui o mecanismo de predição de mobilidade para detectar falhas de rota. Tais características não são providas pelos outros protocolos e são necessárias para as aplicações multimídia aqui abordadas.

CAPÍTULO 6

Conclusão

A entrega de múltiplos fluxos de vídeo com QoE aos usuários sobre FANETs é uma tarefa desafiadora. A alta mobilidade dos veículos e a alta carga de pacotes são fatores que tornam o ambiente altamente dinâmico e alteram o estado da rede continuamente.

Em relação a mobilidade, por exemplo, esses dispositivos podem assumir comportamentos distintos, como a variação brusca na altura ou na direção, bem como podem permanecer estáticos ou móveis no ambiente. Tal comportamento pode causar elevados números de desconexões durante o encaminhamento dos dados na rede, se tal característica comportamental não for eficientemente considerada. Além disso, considerar que os parâmetros de análise para escolha de nós de uma rede tão dinâmica têm a mesma importância durante toda a transmissão é uma asserção errônea visto que o contexto muda constantemente durante o tempo.

Grande parte dos pacotes de dados podem ser descartados ou entregues ao destino com um atraso significativo por conta de falhas de rotas que resultaram da má escolha de nós encaminhadores. Ademais, essa ineficiência é prejudicial à transmissão de dados multimídia, pois este tipo de dado é sensível a perdas e atrasos nos pacotes. Uma forma de melhorar este roteamento é considerar a conectividade em um ambiente 3D na tomada de decisões, além de outros atributos.

Para preencher tal necessidade, este trabalho apresentou o CABR, um protocolo de roteamento beaconless oportunístico e adaptativo para distribuição de múltiplos fluxos de vídeo em FANETs com garantia de QoE. Através deste protocolo, os vídeos podem ser entregues ao destino para processamento e análise com maior confiabilidade e qualidade.

Mais especificamente, o CABR leva em consideração múltiplas informações de contexto para computar o valor do DFD, sendo elas: energia, estado do buffer, localização 3D do nó, qualidade do link e informações de mobilidade do veículo. Características elen-

cadadas a partir de minuciosa análise do estado-da-arte, de forma a eleger as que trouxessem melhores benefícios. Também considera o grau de importância real de cada métrica na tomada de decisões, assim como busca adaptá-las em tempo de execução. Aliado a isso, o módulo de predição de mobilidade implementado neste trabalho com base em um dos trabalhos correlatos, possibilita o monitoramento de possíveis quebras de enlace pelo distanciamento entre pares de VANTs durante a transmissão multimídia e agrega vantagens ao protocolo, mas mostra não ser suficiente.

Os resultados de simulação ressaltaram a confiabilidade, robustez e o suporte a QoE do CABR na presença de mobilidade e transmissões de vídeo simultâneas em comparação aos protocolos XLinGO, XLinGO-E, BLR e BLR-E. Isto é alcançado em cenários dinâmicos e compostos por nós movendo-se em diferentes velocidades e com a transmissão de vídeos com diferentes tipos de complexidade.

Como dificuldades encontradas, é importante ressaltar a dificuldade inicial de adaptar-se às ferramentas utilizadas para implementação e simulação. Também é importante citar a necessidade de implementar os trabalhos relacionados utilizados, adaptando-os ao framework de simulação e também de adaptar o Ecora para uso no BLR e XLinGO. Muitos testes tiveram de ser realizados, em um número incontável de vezes, para verificar se os resultados obtidos eram consistentes. Muitas vezes não eram, e a fase de implementação recomeçava, seguida pelos testes. Todo este processo foi repetido para os 5 protocolos utilizados neste trabalho.

Além disso, as simulações foram um caso à parte. Na Seção 5.1, foi dito que houve uma média de 59 horas de simulação. Este valor é para um caso ótimo, onde não houveram erros durante as execuções ou erros de implementação nos códigos de simulação. O processo todo de simular, encontrar erros, corrigí-los, adaptar códigos e refazer todo o processo, tomou um tempo bem maior. Tudo isto, no entanto, resultou em um *know-how* sobre o trabalho, necessário em toda pesquisa científica.

Os trabalhos futuros têm o objetivo de expandir a avaliação do protocolo, de modo a considerar mais métricas (tanto objetivas, quanto subjetivas). Também podem ser considerados outros parâmetros para a manutenção da conectividade das rotas, como por exemplo a medição de QoE durante o modo persistente.

Referências

- AeroVironment, Inc. *Dragon Eye*. 2015. Access date: 08 mar. 2015. Disponível em: <<https://www.avinc.com/uas/adc/dragoneye/>>.
- AeroVironment, Inc. *Helios*. 2015. Access date: 08 mar. 2015. Disponível em: <<https://www.avinc.com/uas/adc/helios/>>.
- Aeryon Labs, Inc. *Considerations in Selecting a Small UAV for Police Operations*. 2014. Access date: 8 feb. 2015. Disponível em: <<http://www.aeryon.com/applications/whitepapers/224-whitepaperpolice.html>>.
- AL-OTAIBI, M.; SOLIMAN, H.; ZHENG, J. A multipath routeless routing protocol with an efficient location update mechanism. *International Journal of Internet Protocol Technology*, Inderscience, v. 6, n. 1, p. 75–82, 2011.
- Amazon.com, Inc. *Amazon PrimeAir*. 2014. Access date: 2 feb. 2015. Disponível em: <<http://www.amazon.com/b?node=8037720011>>.
- ASCHENBRUCK, N. et al. Bonnmotion: a mobility scenario generation and analysis tool. In: ICST (INSTITUTE FOR COMPUTER SCIENCES, SOCIAL-INFORMATICS AND TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING). *Proceedings of the 3rd International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques*. [S.l.], 2010. p. 51.
- ASSOCIATION, I. S. *IEEE Standard for Information Technology-Telecommunications and Information Exchange Between Systems-Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements: Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*. [S.l.]: IEEE, 2001.
- BACCOUR, N. et al. Radio link quality estimation in wireless sensor networks: a survey. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, ACM, v. 8, n. 4, p. 34, 2012.
- BEKMEZCI, I.; SAHINGOZ, O. K.; TEMEL, Ş. Flying ad-hoc networks (fanets): a survey. *Ad Hoc Networks*, Elsevier, v. 11, n. 3, p. 1254–1270, 2013.
- BENI, G.; WANG, J. Swarm intelligence in cellular robotic systems. In: *Robots and Biological Systems: Towards a New Bionics?* [S.l.]: Springer, 1993. p. 703–712.

- BITTENCOURT, G. *Inteligência artificial: ferramentas e teorias*. [S.l.: s.n.], 1998.
- BROOKS, R. Intelligence without reason. *The artificial life route to artificial intelligence: Building embodied, situated agents*, Lawrence Erlbaum Associates Hillsdale, NJ, p. 25–81, 1995.
- BÜRKLE, A.; SEGOR, F.; KOLLMANN, M. Towards autonomous micro uav swarms. *Journal of intelligent & robotic systems*, Springer, v. 61, n. 1-4, p. 339–353, 2011.
- CAMBONE, S. *Unmanned aircraft systems roadmap 2005-2030*. [S.l.]: Defense Technical Information Center, 2005.
- CHAKCHOUK, N. A survey on opportunistic routing in wireless communication networks. IEEE, 2015.
- CLAPPER, J. et al. Unmanned systems roadmap 2007-2032. *Office of the Secretary of Defense*, p. 188, 2007.
- COOPER, G. F.; HERSKOVITS, E. A bayesian method for the induction of probabilistic networks from data. *Machine learning*, Springer, v. 9, n. 4, p. 309–347, 1992.
- COSTA, R. *Um mecanismo para realizar a conectividade de roteamento geográfico na transmissão multimídia em VANTs*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.
- COSTA, R. et al. Enhanced connectivity for robust multimedia transmission in uav networks. In: IEEE. *Wireless Days (WD), 2014 IFIP*. [S.l.], 2014. p. 1–6.
- DARWICHE, A. *Modeling and reasoning with Bayesian networks*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2009.
- Drone Central. *DJI Phantom: Diferenças entre o Phantom 1 e 2*. 2015. Access date: 15 jun. 2015. Disponível em: <<http://dronecentral.com.br/dji-phantom-diferencas-entre-o-phantom-1-e-2/>>.
- DUDEK, G. et al. A taxonomy for multi-agent robotics. *Autonomous Robots*, Springer, v. 3, n. 4, p. 375–397, 1996.
- EHSAN, S.; HAMD AOUI, B. A survey on energy-efficient routing techniques with qos assurances for wireless multimedia sensor networks. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, IEEE, v. 14, n. 2, p. 265–278, 2012.
- EZEQUIEL, C. et al. Uav aerial imaging applications for post-disaster assessment, environmental management and infrastructure development. In: IEEE. *Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2014 International Conference on*. [S.l.], 2014. p. 274–283.
- FIGUEIRA, J.; GRECO, S.; EHRGOTT, M. *Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2005. v. 78.
- FREW, E. W.; BROWN, T. X. Networking issues for small unmanned aircraft systems. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Springer, v. 54, n. 1-3, p. 21–37, 2009.

- FU, Z.; DELCROIX, V. Bayesian network based on the method of ahp for making decision. In: IEEE. *Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC), 2011 6th IEEE Joint International*. [S.l.], 2011. v. 1, p. 223–227.
- GAO, X. et al. Image quality assessment based on multiscale geometric analysis. *Image Processing, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 18, n. 7, p. 1409–1423, 2009.
- GERLA, M. Ad hoc networks. In: *Ad Hoc Networks*. [S.l.]: Springer, 2005. p. 1–22.
- GORBIL, G.; GELENBE, E. Resilient emergency evacuation using opportunistic communications. In: *Computer and Information Sciences III*. [S.l.]: Springer, 2013. p. 249–257.
- HECKERMAN, D. Bayesian networks for data mining. *Data mining and knowledge discovery*, Springer, v. 1, n. 1, p. 79–119, 1997.
- HEISSENBÜTTEL, M. et al. Blr: beacon-less routing algorithm for mobile ad hoc networks. *Computer communications*, Elsevier, v. 27, n. 11, p. 1076–1086, 2004.
- HSU, C.-J.; LIU, H.-I.; SEAH, W. Opportunistic routing—a review and the challenges ahead. *Computer Networks*, Elsevier, v. 55, n. 15, p. 3592–3603, 2011.
- KARP, B.; KUNG, H.-T. Gpsr: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks. In: ACM. *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking*. [S.l.], 2000. p. 243–254.
- KASAHARA, C. N.; CONCEIÇÃO, F. W. S. Análise de ferramentas de mineração de dados. *Universidade Federal do Pará*, 2008.
- LOHIER, S.; RACHEDI, A.; GHAMRI-DOUDANE, Y. A cost function for qos-aware routing in multi-tier wireless multimedia sensor networks. In: *Wired-Wireless Multimedia Networks and Services Management*. [S.l.]: Springer, 2009. p. 81–93.
- LU, M.-H.; STEENKISTE, P.; CHEN, T. Video transmission over wireless multihop networks using opportunistic routing. In: IEEE. *Packet Video 2007*. [S.l.], 2007. p. 52–61.
- MA, K. J.; BARTOŠ, R.; BHATIA, S. A survey of schemes for internet-based video delivery. *Journal of Network and Computer Applications*, Elsevier, v. 34, n. 5, p. 1572–1586, 2011.
- MAO, X. et al. Energy-efficient opportunistic routing in wireless sensor networks. *Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 22, n. 11, p. 1934–1942, 2011.
- MORSE, B. S.; ENGH, C. H.; GOODRICH, M. A. Uav video coverage quality maps and prioritized indexing for wilderness search and rescue. In: IEEE PRESS. *Proceedings of the 5th ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction*. [S.l.], 2010. p. 227–234.
- Northrop Grumman. *Global Hawk*. 2015. Access date: 08 mar. 2015. Disponível em: <<http://www.northropgrumman.com/capabilities/globalhawk/Pages/default.aspx>>.
- NORVIG, P.; RUSSELL, S. *Inteligência Artificial, 3ª Edição*. [S.l.]: Elsevier Brasil, 2014. v. 1.

- PARK, J.-S.; LEE, U.; GERLA, M. Vehicular communications: emergency video streams and network coding. *Journal of Internet Services and Applications*, Springer, v. 1, n. 1, p. 57–68, 2010.
- PARKER, L. E. The effect of action recognition and robot awareness in cooperative robotic teams. In: IEEE. *Intelligent Robots and Systems 95. 'Human Robot Interaction and Cooperative Robots', Proceedings. 1995 IEEE/RSJ International Conference on*. [S.l.], 1995. v. 1, p. 212–219.
- PEARL, J. Bayesian networks. *Department of Statistics, UCLA*, 2011.
- PENTLAND, A.; FLETCHER, R.; HASSON, A. Daknet: Rethinking connectivity in developing nations. *Computer*, IEEE, v. 37, n. 1, p. 78–83, 2004.
- PINSON, M. H.; WOLF, S. A new standardized method for objectively measuring video quality. *Broadcasting, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 50, n. 3, p. 312–322, 2004.
- PUROHIT, A.; MOKAYA, F.; ZHANG, P. Collaborative indoor sensing with the sensorfly aerial sensor network. In: ACM. *Proceedings of the 11th international conference on Information Processing in Sensor Networks*. [S.l.], 2012. p. 145–146.
- QUARITSCH, M. et al. Networked uavs as aerial sensor network for disaster management applications. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, Springer, v. 127, n. 3, p. 56–63, 2010.
- REZENDE, S. O. *Sistemas inteligentes: fundamentos e aplicações*. [S.l.]: Editora Manole Ltda, 2005.
- ROSÁRIO, D. et al. Opportunistic routing for multi-flow video dissemination over flying ad-hoc networks. In: IEEE. *A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), 2014 IEEE 15th International Symposium on*. [S.l.], 2014. p. 1–6.
- ROSÁRIO, D. et al. A beaconless opportunistic routing based on a cross-layer approach for efficient video dissemination in mobile multimedia iot applications. *Computer Communications*, Elsevier, v. 45, p. 21–31, 2014.
- ROSÁRIO, D. et al. An omnet++ framework to evaluate video transmission in mobile wireless multimedia sensor networks. In: ICST (INSTITUTE FOR COMPUTER SCIENCES, SOCIAL-INFORMATICS AND TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING). *Proceedings of the 6th International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques*. [S.l.], 2013. p. 277–284.
- SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. *International journal of services sciences*, Inderscience, v. 1, n. 1, p. 83–98, 2008.
- SAHINGOZ, O. K. Mobile networking with uavs: opportunities and challenges. In: IEEE. *Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2013 International Conference on*. [S.l.], 2013. p. 933–941.
- SAHINGOZ, O. K. Networking models in flying ad-hoc networks (fanets): Concepts and challenges. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Springer, v. 74, n. 1-2, p. 513–527, 2014.

- SANCHEZ, J. A.; MARIN-PEREZ, R.; RUIZ, P. M. Boss: Beacon-less on demand strategy for geographic routing in wireless sensor networks. In: IEEE. *Mobile Adhoc and Sensor Systems, 2007. MASS 2007. IEEE International Conference on*. [S.l.], 2007. p. 1–10.
- SEFEROGLU, H.; MARKOPOULOU, A. Video-aware opportunistic network coding over wireless networks. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, IEEE, v. 27, n. 5, p. 713–728, 2009.
- SERUFFO, M. C. d. R. *Estratégias baseadas em análise multicritério para seleção de tecnologia de acesso de primeira milha em padrão ISDB-T*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.
- SHU, L. et al. Tpgf: geographic routing in wireless multimedia sensor networks. *Telecommunication Systems*, Springer, v. 44, n. 1-2, p. 79–95, 2010.
- TAN, P.-N.; STEINBACH, M.; KUMAR, V. e. o. *Introduction to data mining*. [S.l.]: Pearson Addison Wesley Boston, 2006. v. 1.
- TOH, C. K. *Ad hoc mobile wireless networks: protocols and systems*. [S.l.]: Pearson Education, 2001.
- U.S. Air Force. *MQ-1B Predator*. 2010. Access date: 09 jun. 2015. Disponível em: <<http://www.af.mil/AboutUs/FactSheets/Display/tabid/224/Article/104469/mq-1b-predator.aspx>>.
- U.S. Air Force. *MQ-1B Predator*. 2010. Access date: 15 feb. 2015. Disponível em: <<http://www.af.mil/AboutUs/FactSheets/Display/tabid/224/Article/104469/mq-1b-predator.aspx>>.
- VALAVANIS, K. P. *Advances in unmanned aerial vehicles: state of the art and the road to autonomy*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2008. v. 33.
- WANG, Z. et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *Image Processing, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 13, n. 4, p. 600–612, 2004.
- YANMAZ, E. et al. A discrete stochastic process for coverage analysis of autonomous uav networks. In: IEEE. *GLOBECOM Workshops, 2010 IEEE*. [S.l.], 2010. p. 1777–1782.
- YANMAZ, E.; KUSCHNIG, R.; BETTSTETTER, C. Channel measurements over 802.11 a-based uav-to-ground links. In: IEEE. *GLOBECOM Workshops (GC Wkshps), 2011 IEEE*. [S.l.], 2011. p. 1280–1284.
- YOON, S.-G. et al. Opportunistic routing for smart grid with power line communication access networks. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 5, n. 1, p. 303–311, 2014.
- ZHAO, Z. et al. Caor: Context-aware adaptive opportunistic routing in mobile ad-hoc networks. In: IEEE. *Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC), 2014 7th IFIP*. [S.l.], 2014. p. 1–8.