



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA

Rede Oportunística com Múltiplos Veículos Aéreos não Tripulados para Apoio a
Comunicações em Cenários de Emergência

José Carlos de Albuquerque

Orientador

Prof. Sidney C. de Lucena

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
ABRIL DE 2019

Rede Oportunística com Múltiplos Veículos Aéreos não Tripulados para Apoio a
Comunicações em Cenários de Emergência

José Carlos de Albuquerque

TESE APRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO (UNIRIO). APROVADA PELA COMISSÃO EXAMINADORA ABAIXO ASSINADA.

Aprovada por:

DSc. Sidney Cunha de Lucena — UNIRIO

DSc. Adriana Cesário de Faria Alvim — UNIRIO

DSc. Carlos Eduardo Ribeiro de Mello — UNIRIO

DSc. Carlos Alberto Vieira Campos — UNIRIO

Dr. José Ferreira de Rezende — UFRJ

PhD. Ronaldo Moreira Salles — IME

DSc. Antônio Augusto de Aragão Rocha — UFF

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 2019.

Albuquerque, José Carlos de

A345 Rede Oportunística com Múltiplos Veículos Aéreos não Tripulados para Apoio a Comunicações em Cenários de Emergência

Jose Carlos de Albuquerque. – Rio de Janeiro, 2019.

144

Orientador: Sidney Cunha de Lucena.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Informática, 2019.

1. Redes de Emergência. 2. VANTs. 3. TSP. 4. Redes DTN.

I. Lucena, Sidney Cunha de, orient. II.

Título.

Dedico este trabalho à minha madrinha Vera Lúcia Rosoni, ao meu Tio Alvaro Cavallieri e aos amigos Janaina Borges e Pedro Guedes. Jamais serão esquecidos.

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador Sidney Cunha de Lucena que me acolheu neste ramo de pesquisa, sempre me incentivando e ajudando por todo esse caminho. Aos professores Carlos Alberto Vieira Campos, Jefferson Elbert Simões e Pedro Nuno de Souza Moura, os quais foram de suma importância para a elaboração deste trabalho, atentos aos diversos detalhes e demonstrando excelência e profundo conhecimento em diversos pontos tratados. Também aos colegas do PPGI pelo companheirismo e espírito colaborativo.

Aos meus colegas de trabalho de todo o departamento de informática do CEFET-RJ, em especial aqueles mais próximos: Elizabeth Castelo, Laurinete 'lauri' Bacelar, Luiz 'castelo' Valentim, Marcus Vinicius e Raphael Carvalho, sem os quais eu nunca teria o tempo necessário para me dedicar aos estudos, assumindo em diversas ocasiões uma carga maior de trabalho para me disponibilizarem algum tempo a mais de estudo.

Aos colegas aeromodelistas que em verdadeiro espírito de equipe tanto me auxiliaram e em especial ao amigo Jorge 'Bidu', sem o qual não conseguiria produzir os protótipos necessários para os ensaios iniciais.

Aos meus amigos "pinballeiros", Kleber 'titio urubu', Armanio '007' e João 'pirilampo', que tanto me ajudaram e apoiaram em momentos de verdadeiro esgotamento emocional e físico, com partidas divertidíssimas de pinball e muita paciência para me transmitirem tantos conhecimentos a respeito dessas máquinas.

À minha companheira e amiga Denise Sousa, sempre tão compreensiva, apoiadora e ouvinte assaz das idéias e dificuldades deste trabalho.

Em especial à minha família, a qual assumiu várias responsabilidades para desonerar meu tempo, tão necessário para me dedicar a este trabalho. Infelizmente alguns ficaram pelo caminho, mas tenho certeza de que estão orgulhosos, onde quer que estejam, de mais este projeto concluído.

Albuquerque, Jose Carlos de **Rede Oportunística com Múltiplos Veículos Aéreos não Tripulados para Apoio a Comunicações em Cenários de Emergência**. UNIRIO, 2019. 144 páginas. Tese de Doutorado. Departamento de Informática Aplicada, UNIRIO.

RESUMO

Veículos aéreos não tripulados (VANTs) ganharam mais destaque no mundo devido a sua grande versatilidade. Dadas as reduções de custo em sua fabricação e operação, especialmente quando comparadas a aeronaves convencionais, os VANTs encontraram grande aceitação tanto em aplicações militares quanto civis. Uma área importante em que os VANTs podem contribuir é a assistência para equipes de resgate em cenários de emergência. Esses cenários exigem veículos com grande capacidade de deslocamento, para que possam auxiliar nas comunicações e no monitoramento da região afetada, ou até mesmo para o transporte de suprimentos. O uso de VANTs como um nó móvel de uma rede tolerante a atrasos e desconexões é uma possível solução para ajudar o centro de comando e controle a se comunicar com as equipes de resgate espalhadas por toda a região. A fim de otimizar o deslocamento do VANT entre os nós em terra e, conseqüentemente, minimizar a latência de comunicação, neste trabalho modelamos o problema como uma variante do problema do caixeiro viajante (TSP) adaptado para múltiplos caixeiros. Avaliamos então o uso de múltiplos VANTs em cenários de emergência usando múltiplas trajetórias e comparamos com uma solução usando múltiplos VANTs em uma única trajetória. Para esta avaliação, além das métricas usuais de atraso, sobrecarga da rede e taxa de entrega de mensagens, avaliamos também, de forma inédita, uma métrica criada por nós, o AMeM, que mede o atraso médio entre mensagens que chegam a um determinado nó. No escopo deste trabalho, esta métrica foi utilizada para avaliar a frequência com que o centro de comando e controle recebe novas mensagens na rede. Os cenários de emergência usados nos experimentos foram baseados no desastre ocorrido na cidade de Nova Friburgo, em janeiro de 2011. Os resultados obtidos revelam significativas diferenças conforme as abordagens e os protocolos de roteamento empregados.

Palavras-chave: Redes de emergência, Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões, Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT), Problema do Caixeiro Viajante.

Abstract

Unmanned aerial vehicles (UAVs) have gained more prominence in the world due to their great versatility. Given cost reductions in their manufacturing and operation, especially when compared to conventional aircraft, UAVs have found great acceptance both in military and civilians applications. An important area in which UAVs can contribute is on the assistance to rescue teams in emergency scenarios. These scenarios require vehicles with large mobility capacity, so they can assist in communications and sensing of the affected region, or even to supplies transportation. Using UAVs as a mobile node of a network that tolerates delays and disconnections is a solution to assist the command and control center to communicate with the rescue teams scattered throughout the region. In order to optimize the trajectory of the UAVs between the ground nodes and consequently minimize communication latency, in this article we model the problem as a variant of the traveling salesman problem (TSP), adapted for the use of multiples UAVs. Thus, we evaluated the use of multiple UAVs in emergency scenarios using multiple trajectories and compared that to a solution using multiple UAVs in a single trajectory. For this evaluation, in addition to the usual metrics of delay, network overload and message delivery rate, we also evaluated, in an unprecedented way, a metric created by us, AMeM, which measures the delay between messages arriving at a given node. In the scope of this thesis, it was used to evaluate the frequency with which the command and control center received new messages from network. The emergency scenarios used in the experiments were based on the disaster that occurred in the city of Nova Friburgo in January 2011. Obtained results reveal significant differences according to the approaches and routing protocols that were employed.

Palavras-chave: Emergency Networks, Delay Tolerant Networks, Unmanned Aerial Vehicles (UAV), Travelling Salesman Problem (TSP).

Sumário

1	Introdução	2
1.1	Motivação	6
1.2	Descrição do problema	7
1.3	Objetivos do trabalho	8
1.4	Contribuições alcançadas	9
1.5	Estrutura do texto	10
2	Apoio a Operações de Salvamento em Emergências e Desastres Naturais	12
2.1	Caracterização dos cenários de emergência	12
2.2	Processo de gestão de emergências	15
2.2.1	Antes da emergência	15
2.2.2	Durante a emergência	16
2.2.3	Depois da emergência	17
2.3	Veículos Aéreos Não Tripulados, ou VANTs	18
2.3.1	Classificação dos VANTs	20
2.3.2	Sistema de controle de VANTs	22
2.4	Aplicações de VANTs em cenários de emergência	26
2.5	Trabalhos relacionados	29

3	Redes sem Fio para Cenários de Emergência	35
3.1	Redes celulares	35
3.2	Redes LPWANs	37
3.3	Redes sem fio padrão IEEE 802	38
3.3.1	O padrão IEEE 802.11	39
3.4	Redes <i>ad hoc</i>	41
3.5	MANETs	42
3.5.1	FANETs	44
3.6	Redes tolerantes a atrasos e interrupções (DTNs)	45
4	Planejamento das Rotas de Voo dos VANTs	51
4.1	O Problema do caixeiro viajante (TSP)	52
4.2	Algoritmos para solução do TSP	54
4.3	Modelando o cenário de emergência como um TSP	57
4.4	Clusterização do cenário para o m-TSP	58
5	Propostas de Solução	62
5.1	Visão geral da solução proposta	63
5.1.1	Vantagens no uso de VANTs	65
5.2	Premissas para o particionamento do problema	67
5.3	Abordagens de solução	68
5.3.1	Abordagem 1: ciclo de voo para cada região engloba o CC	68
5.3.2	Abordagem 2: CC faz parte de apenas uma região	70
5.3.3	Abordagem 3: abordagem “ <i>naive</i> ” de referência, sem clusterização	74
5.4	Análise comparativa de casos	77

6	Análise Experimental	89
6.1	Parâmetros de simulação	90
6.2	Métricas de avaliação	91
6.3	Avaliação de heurísticas de TSP	92
6.3.1	Validação das implementações usadas	93
6.3.2	Cenários de avaliação das heurísticas	93
6.3.3	Resultados obtidos com as heurísticas	93
6.4	Resultados para as abordagens propostas	97
6.4.1	Resultados para a Abordagem 1	98
6.4.2	Resultados para a Abordagem 2	105
6.4.3	Resultados para a Abordagem 3	111
6.5	Dicussão sobre os resultados	118
7	Conclusão	125
A	Implementação em Java para solução do TSP através de PLI utilizando a ferramenta Gurobi	130
	Referências	136

Lista de Figuras

2.1	VANTs conforme o tipo de voo	20
2.2	Transmissor de rádio controle	23
3.1	Pilha de protocolos	47
4.1	Grafo completo, ponderado, não direcionado e simétrico	53
4.2	Grafo com ciclo Hamiltoniano	54
4.3	Grafo completo representativo do cenário	58
5.1	Topologia da rede	64
5.2	Ciclos de VANTs passando pelo CC	68
5.3	Exemplo de representação da Abordagem 1 (M-TSP)	69
5.4	Fluxograma da Abordagem 1	71
5.5	Ciclos de VANTs passando sem retorno ao CC	72
5.6	Exemplo de representação da Abordagem 2	72
5.7	Fluxograma da Abordagem 2	75
5.8	Ciclo único de voo dos VANTs	76
5.9	Exemplo de representação da Abordagem 3	76
5.10	Topologia em estrela com CC no centro ($r < D$)	77

5.11 PoIs alinhados em reta	78
5.12 Ciclo de voo nas abordagens 1 (a), 2 (b) e 3 (c)	79
5.13 Latência no cenário pentagonal	83
5.14 Latência no cenário em linha	84
5.15 Sobrecarga no cenário pentagonal	84
5.16 Sobrecarga no cenário em linha	85
5.17 Taxa de entrega no cenário pentagonal	85
5.18 Taxa de entrega no cenário em linha	86
5.19 AMeM no cenário pentagonal	86
5.20 AMeM no cenário em linha	87
6.1 Mapas dos cenários de emergência usados na avaliação	94
6.2 Latência para Abordagem 1, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio ou imagens	99
6.3 Latência para Abordagem 1, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio, imagens ou vídeo	100
6.4 Taxa de entrega para Abordagem 1, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio ou imagens	101
6.5 Taxa de entrega para Abordagem 1, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio, imagens ou vídeo	101
6.6 AMeM para Abordagem 1, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio ou imagens	102
6.7 AMeM para Abordagem 1, cenário com 10 PoIs, mensagens com vídeo de um único PoI	102
6.8 Overhead para Abordagem 1, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio ou imagens	103
6.9 Overhead para Abordagem 1, cenário com 10 PoIs, mensagens com áu- dio, imagens ou vídeo	104

6.10	Latência para Abordagem 2, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio ou imagens	107
6.11	Latência para Abordagem 2, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio, imagens ou vídeo	107
6.12	Taxa de entrega para Abordagem 2, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio ou imagens	108
6.13	Taxa de entrega para Abordagem 2, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio, imagens ou vídeo	108
6.14	AMeM para Abordagem 2, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio e imagens	109
6.15	AMeM para Abordagem 2, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio, imagens ou vídeo	109
6.16	Overhead para Abordagem 2, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio e imagens	110
6.17	Overhead para Abordagem 2, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio, imagens ou vídeo	110
6.18	Latência para Abordagem 3, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio e imagens	113
6.19	Latência para Abordagem 3, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio, imagens ou vídeo	113
6.20	Taxa de entrega para Abordagem 3, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio e imagens	114
6.21	Taxa de entrega para Abordagem 3, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio, imagens ou vídeo	114
6.22	<i>Overhead</i> para Abordagem 3, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio e imagens	115
6.23	<i>Overhead</i> para Abordagem 3, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio, imagens ou vídeo	115
6.24	AMeM para Abordagem 3, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio e imagens	116

6.25	AMeM para Abordagem 3 no cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio, imagens ou vídeo	116
6.26	Comparativo dos valores de latência em função da abordagem e do número de VANTs	119
6.27	Comparativo dos valores do AMeM em função da abordagem e do número de VANTs	120
6.28	Comparativo dos valores de Latência em função da abordagem, do protocolo e do número de VANTs para 10 PoIs	121
6.29	Comparativo dos valores de Latência em função da abordagem, do protocolo e do número de VANTs para 20 PoIs	121
6.30	Comparativo dos valores de Sobrecarga em função da abordagem, do protocolo e do número de VANTs para 10 PoIs	122
6.31	Comparativo dos valores de Sobrecarga em função da abordagem, do protocolo e do número de VANTs para 20 PoIs	122
6.32	Comparativo dos valores de Taxa de entrega em função da abordagem, do protocolo e do número de VANTs para 10 PoIs	123
6.33	Comparativo dos valores de Taxa de entrega em função da abordagem, do protocolo e do número de VANTs para 20 PoIs	123
6.34	Comparativo dos valores de AMeM em função da abordagem, do protocolo e do número de VANTs para 10 PoIs	124
6.35	Comparativo dos valores de AMeM em função da abordagem, do protocolo e do número de VANTs para 20 PoIs	124

Lista de Tabelas

2.1	Tabela de emergências	13
2.2	Etapas do Processo de Gestão de Emergências	15
2.3	Classificação de VANTs quanto ao alcance	21
2.4	Características gerais dos VANTs	28
5.1	Comparativo dos tempos de entrega de mensagens (teórico vs simulado) nas três abordagens, mapa pentagonal	87
5.2	Comparativo do AMeM (teórico vs simulado) nas três abordagens, mapa pentagonal	87
5.3	Comparativo dos tempos de entrega de mensagens (teórico vs simulado) nas três abordagens, mapa linear	88
5.4	Comparativo do AMeM (teórico vs simulado) nas três abordagens, mapa linear	88
6.1	Instâncias de Referência	93
6.2	Número de PoIs para cada cenário de emergência	94
6.3	Distâncias de cada trajetória em metros	94
6.4	Tempo para percorrer cada trajetória em minutos	95
6.5	Tempo para calcular cada trajetória em milisegundos	95
6.6	Comparativo entre PLI e Christofides em milisegundos	96

6.7	Abordagem 1 no cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio ou imagens	98
6.8	Abordagem 1 no cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio, imagens ou vídeo	99
6.9	Abordagem 1 no cenário com 20 PoIs, mensagens com áudio ou imagens	104
6.10	Abordagem 1 no cenário com 20 PoIs, mensagens com áudio, imagens e vídeo	105
6.11	Abordagem 2 no cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio ou imagens	105
6.12	Abordagem 2 no cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio, imagens ou vídeo	106
6.13	Abordagem 2 no cenário com 20 PoIs, mensagens com áudio e imagens .	111
6.14	Abordagem 2 no cenário com 20 PoIs, mensagens com áudio, imagens e vídeo	111
6.15	Abordagem 3 no cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio ou imagens	112
6.16	Abordagem 3 no cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio, imagens ou vídeo	112
6.17	Abordagem 3 no cenário com 20 PoIs, mensagens com áudio ou imagens	117
6.18	Abordagem 3 no cenário com 20 PoIs, mensagens com áudio, imagens e vídeo	117

1. Introdução

Nas situações de emergência, como por exemplo na ocorrência de desastres naturais, é crucial para o atendimento às vítimas que o socorro seja prestado o mais rápido possível, haja visto que uma maior demora pode levar uma vítima com ferimentos mais graves ao óbito. Mesmo aqueles indivíduos que não estejam com suas vidas diretamente em risco podem ter esta situação deteriorada em curto espaço de tempo, por exemplo devido à escassez de alimentos e água potável. Dependendo da gravidade e proporções da emergência, boa parte ou toda a infraestrutura de um município ou cidade pode ficar comprometida, levando a um cenário de total colapso da região afetada (Turoff, 2015; Sakurai & Watson, 2015; Chenji, Zhang, Stoleru, & Arnett, 2013).

É necessário, então, que exista uma forma de gerenciar com presteza a situação como um todo. Sem um gerenciamento eficaz, as entidades envolvidas no amparo e auxílio às vítimas podem não conseguir alocar os recursos de maneira otimizada, desperdiçando-os em um momento no qual são escassos, devido às condições da região em estado de emergência. Essa má alocação de recursos pode também ocorrer pelo desconhecimento do aparecimento de novas áreas de risco com um nível de criticidade maior.

Desta forma, um sistema de gerenciamento de emergências desempenha um papel de suma importância no auxílio não só à recomposição da infraestrutura básica de apoio aos sobreviventes, mas também aos órgãos que coordenam as operações e suas equipes envolvidas no processo. Dentre esses órgãos, podemos citar defesa civil, corpo de bombeiros e polícia, os quais precisam obter um panorama amplo e constantemente atualizado da situação.

Algumas formas de se conseguir informações quando da ocorrência de um desastre são as fornecidas pelas próprias vítimas, as provenientes de serviços de radioamador e até mesmo as fornecidas pelas equipes de apoio que já se encontrem no local. Entretanto, existem ainda situações nas quais as equipes não conseguem chegar a determinados lo-

cais e, em virtude disso, pessoas que estejam nessas localidades podem estar ilhadas e incomunicáveis. Sem que esse sistema de gerenciamento de emergências possa ser alimentado com informações úteis e confiáveis, ou ainda se essas informações não chegarem de forma rápida e dinâmica, o sistema pode apresentar um panorama que não corresponda ao cenário real, colocando mais vidas em risco.

Uma forma de auxiliar a coleta dessas informações pode ser obtida utilizando-se as infraestruturas de redes tradicionais, como telefonia celular, telefonia fixa ou redes de computadores, com e sem fio. Contudo, uma vez que em muitos casos a infraestrutura do local afetado fica comprometida, por terem sido destruídas ou mesmo congestionadas com um alto volume de utilização, as redes de comunicação preestabelecidas geralmente não conseguem ser utilizadas. Em virtude disso, uma nova estrutura de rede de comunicação pode ser elaborada com intuito exclusivo de auxiliar nestes cenários. Entretanto, devido às características de destruição que surgem nestes cenários de emergência, agravadas ainda por condições geográficas e de relevo, as redes convencionais infraestruturadas por cabo, seja metálico ou óptico, podem não ser as opções mais adequadas nestas situações. Uma rede de dados de computador do tipo sem fio, portanto, surge como opção para ser utilizada neste contexto.

As redes *ad-hoc* são um tipo de rede sem fio na qual não existem elementos centralizadores, ou seja, é um tipo de rede que não se utiliza de elementos de uma infraestrutura pré-existente para seu funcionamento, tais como roteadores e comutadores de uma rede infraestruturada. Desta forma, cada nó de uma rede *ad-hoc* necessariamente participa do processo de roteamento, encaminhando os dados para outros nós. Esse roteamento ocorre de forma dinâmica e leva em consideração a conectividade dos nós na rede (Kopp, 1999).

Uma variante das redes *ad-hoc* são as redes *ad-hoc* móveis, ou MANETS, que consistem de redes sem fio capazes de se auto organizar e são formadas por nós móveis, os quais dão origem a redes dinâmicas sem que haja qualquer elemento de infraestrutura em sua composição (Poor, 2000). A grande capacidade de mobilidade dos nós em uma MANET faz com que sua topologia mude constantemente com o tempo. Essas mudanças se traduzem em dificuldades para o funcionamento e eficiência dos protocolos de roteamento e, portanto, geram novos desafios no desenvolvimento desses protocolos (Li & Wang, 2007). Alguns exemplos de MANETs com características mais especializadas são as redes de sensores ou WSN (*Wireless Sensor Networks*) (Garcia-Macias & Gomez, 2007), as redes veiculares ou VANETs (*Vehicular ad-hoc Networks*) (Yousefi, Mousavi, & Fathy, 2006), as redes tolerantes a atrasos e desconexões ou DTNs (*Delay Tolerant Networks*) (Venkataraman, Acharya, Shah, & Lam, 2009) e as redes *ad-hoc* aéreas ou FANETs (*Flying ad-hoc Networks*) (Bekmezci, Sahingoz, & Temel, 2013a).

Devido às suas características de rápida e fácil implementação sem a necessidade prévia de toda uma infraestrutura para o seu funcionamento, as MANETS, de uma forma geral, encontram uma grande utilidade para prover conectividade em ambientes inerentemente hostis e dinâmicos, como os cenários de emergência e desastre.

Por definição, um desastre é qualquer situação natural ou causada pelo homem que coloca em perigo vidas, propriedades ou o meio ambiente, e na qual sua ocorrência devasta toda a infraestrutura local. Os órgãos encarregados de prestar apoio em situações de emergência e desastres subdividem a ocorrência como um todo em etapas bem definidas, cada uma com suas próprias características e formas de atuação, basicamente seguindo o modelo PDCA (*Plan, Do, Check, Act*) (Okada, 2004):

- **Mitigação:** Tem o objetivo de reduzir ou eliminar efetivamente a probabilidade de um desastre ocorrer. Esta fase também inclui ações que tendem a ser continuamente aplicadas ao longo do tempo para reduzir os efeitos de desastres que não podem ser evitados, como por exemplo criar canais de escoamento ou reservatórios subterrâneos para o escoamento da água das chuvas.
- **Preparação:** Neste ponto as organizações, os governos e as pessoas são efetivamente chamadas a se envolverem para que sejam desenvolvidos planos e estratégias para salvar vidas e minimizar os estragos causados pelo desastre. A cidade do Rio de Janeiro, por exemplo, criou o sistema de alerta por sirenes em áreas de risco de deslizamento com o objetivo de evacuar a população próxima a essas áreas na iminência de chuvas fortes que possam vir a causar instabilidades na região monitorada.
- **Resposta:** Nesta fase se executam as atividades de resposta durante o período de emergência ou imediatamente depois de ocorrido o evento. Estas atividades incluem a evacuação da área afetada, assistência, abrigo, busca e resgate. Também se iniciam ações com a finalidade de restaurar os serviços básicos e necessários à população e de reparar determinada infraestrutura vital à área afetada.
- **Recuperação:** As atividades de recuperação visam reparar a infraestrutura afetada e restaurar o sistema produtivo a um estado similar ao que se encontrava antes que a catástrofe ocorresse.

Invariavelmente, todo esse planejamento e conjunto de ações tem como diretrizes primárias os seguintes objetivos: proteger a vida, proteger a propriedade, proteger o ambiente, e recuperar o estado anterior ao desastre o mais rápido possível. Nesse sentido, as MANETS podem ser de grande auxílio para as equipes envolvidas em cada uma dessas

etapas. WSNs podem ser utilizadas para monitorar os níveis de rios ou efetuar sensoriamento de áreas de risco. VANETs podem ser utilizadas nas viaturas oficiais e mesmo nos veículos da população, auxiliando na informação de rotas alternativas e pontos de bloqueio. As FANETs, por sua vez, ao se utilizarem de veículos aéreos não tripulados, os VANTs (Sarris & ATLAS, 2001), contam com uma mobilidade ímpar se comparada com os outros tipos de redes móveis, possibilitando alcançar locais de difícil acesso senão pelo ar.

Entretanto, devido às características altamente dinâmicas que são frequentemente encontradas numa região de desastre, os nós podem ficar sem conexão uns com os outros durante intervalos aleatórios. Quando isso ocorre, os protocolos de roteamento utilizados nas redes *ad hoc* falham em estabelecer uma comunicação com os nós da rede, pois pode não existir um caminho para o envio das mensagens até seu destinatário. Esses protocolos não tratam o problema de longas desconexões entre os nós da rede.

Já as redes oportunísticas tolerantes a atrasos e desconexões, as DTNs, utilizam uma abordagem denominada armazena-transporta-encaminha, que permite contornar o problema da falta de conectividade fim-a-fim (Sivakumar & Tan, 2009, 2010; de Freitas et al., 2010). A premissa de funcionamento dessa abordagem é a de que um nó que receba uma mensagem endereçada a outro nó a manterá armazenada em caso de desconexão, transportando-a para outro nó após reconectado, seja ele destinatário da mensagem ou não. Caso o tempo de vida da mensagem expire, ela é descartada. O nó de destino, mesmo tendo estado desconectado da rede, poderá receber a mensagem tão logo consiga estabelecer uma conexão com um nó que esteja transportando a mensagem. Dessa forma, as redes oportunísticas, por não necessitarem de uma infraestrutura para seu funcionamento e por serem capazes de operar em cenários onde as desconexões dos nós ocorrem de forma frequente, apresentam-se como candidatas a uma solução de comunicação que consiga ser rapidamente instalada em cenários de desastres naturais.

Dentre as necessidades de comunicação que surgem nestas situações de ocorrência de desastres, é comum ser necessário estabelecer enlaces de comunicação que transponham estradas ou pontes destruídas. Tal tarefa não costuma ser trivial, principalmente quando precisa ser realizada rapidamente. Além disso, em algumas situações isso somente pode ser realizado por via aérea.

Em um cenário de emergência, podemos ter ainda, em um dado momento, diversas equipes realizando operações de busca, reconhecimento de área ou transportando pessoas e suprimentos. Nestas situações é imprescindível que essas equipes mantenham contato entre si e com a central de comando das operações. Porém, dependendo de alguns fatores

inerentes à região do desastre, tais como extensão da área atingida, topografia ou vegetação, pode acontecer de os grupos virem a ficar isolados e sem condições de manterem uma linha de comunicação entre si. Ademais, essas equipes podem obter informações valiosas a partir de imagens aéreas e dados de sensores instalados em pontos estratégicos.

O uso de helicópteros e aviões não é raro nessas ocasiões, porém existe uma logística bastante complexa para colocar essas aeronaves no ar, envolvendo, por exemplo, questões de tripulação e abastecimento, dentre outras. Além desses fatores, muitas vezes essas aeronaves estão ocupadas demais em missões de resgate para poderem ser empregadas em missões de busca de informações.

1.1 Motivação

Os veículos aéreos não tripulados (VANTs) que, como o próprio nome sugere, nada mais são do que aeronaves nas quais não existe uma tripulação a bordo e, portanto, são controladas à distância, podem ser utilizados para realizar missões de coleta de informações em cenários de emergência. Os VANTs têm as vantagens de poderem ser programados para realizar missões de forma automática, não exigirem tripulação e serem rapidamente reabastecidos, dentre tantas outras vantagens. Além disso, ao serem equipados com dispositivos de redes sem fio, os VANTs podem atuar como nós móveis de redes oportunísticas. Deste modo, essas aeronaves podem atuar como agentes de conexão entre os nós de uma rede desconexa, servindo de base para uma estrutura de rede que dê apoio às equipes de resgate e de busca de informação em cenários de emergência.

Os VANTs podem não apenas ser utilizados para o estabelecimento de uma rede de dados com características de roteamento oportunístico, mas também podem auxiliar no sensoriamento das áreas de desastre, capturando também fotos e vídeos, além de mensagens de socorro em texto para envio às equipes de apoio. Essas mensagens podem ser propagadas entre os VANTs e outros nós terrestres até que atinjam o centro de controle ou alguma equipe em terra (Sivakumar & Tan, 2009). Desta forma, os VANTs podem ser considerados como multiplicadores de força nas etapas mais intensas de interação entre as equipes, onde informações rápidas sobre a situação atual são de extrema importância (Constantinescu, 2013).

De fato, não só os VANTs podem fornecer informações importantes acerca das mudanças na situação de cenários de emergência, como também a população civil pode colaborar fornecendo informações valiosas de possíveis vítimas e sua localização. São exemplos dessas informações a observação de fenômenos ligados ao desastre, como chu-

vas voltando a cair forte em determinada região, por exemplo, informações de localização de áreas de risco iminente, pedidos de socorro e outras tantas informações úteis (Jiang, Bigham, & Bodanese, 2011; Gelenbe & Gorbil, 2012; Fall, Iannaccone, Kannan, Silveira, & Taft, 2010).

Assim sendo, os cenários de emergência e desastre tendem a ser críticos quanto ao tempo de resposta e, portanto, apresentam demandas específicas de comunicação, necessitando de redes de comunicação confiáveis e de baixa latência (tempo real) (Hayat, Yanmaz, & Muzaffar, 2016). Embora as redes DTN, dependendo do tipo de cenário no qual estejam sendo utilizadas, possam apresentar grandes atrasos e até mesmo perda de dados, em um ambiente desafiador como o de uma situação de emergência, onde devido a diversos fatores um caminho de roteamento fim-a-fim não possa ser estabelecido para o tráfego de dados, o roteamento oportunístico utilizado pelas redes DTN talvez seja a única maneira de estabelecer uma comunicação (Uchida, Kawamura, Williams, Takahata, & Shibata, 2013).

1.2 Descrição do problema

Mediante o que foi exposto na seção anterior, a solução que se apresenta como melhor opção, para o rápido estabelecimento de uma rede de comunicação em cenários de desastre, é o de uma rede com capacidade de roteamento oportunístico e que seja capaz de lidar com eventuais desconexões, dotada de VANTs que atuem como nós móveis para transporte de mensagens entre os elementos desconexos, ou seja, os nós terrestres que se encontrem ilhados.

Esta rede oportunística deverá, portanto, utilizar algoritmos de roteamento projetados para este tipo de rede. Entretanto, ainda que em (de Albuquerque, de Lucena, & Campos, 2014) um estudo formal tenha demonstrado como alguns algoritmos de roteamento clássicos se comportam no cenário descrito, talvez o simples emprego desses protocolos não seja a forma mais eficiente de prover um sistema de comunicação otimizado para esse tipo de cenário.

Supomos então que, a depender do padrão de mobilidade adotado pelos VANTs para sobrevoar os pontos de interesse da área afetada, podemos ter uma melhoria considerável da performance total da rede. Desta forma, propomos a modelagem da rota dos VANTs como uma variante do problema conhecido como *Problema do Caixeiro Viajante*, ou TSP (*Traveling Salesman Problem*), adaptado para o caso de múltiplos caixeiros viajantes (m-TSP).

1.3 Objetivos do trabalho

Neste trabalho, propomos uma arquitetura de rede de comunicação de dados do tipo DTN para apoio às equipes de emergência e resgate. Os nós são constituídos pelos próprios membros das equipes de busca e resgate, pelos veículos utilizados por essas equipes, pelo centro de comando e controle das operações de resgate, e, por fim, pelos VANTs que estejam auxiliando a prover conectividade entre esses nós. Portanto, este trabalho baseia-se na hipótese de se utilizar VANTs nas áreas de desastre e de acesso difícil para o estabelecimento de uma rede oportunística que sirva de comunicação entre o centro de controle e as equipes terrestres de apoio, ou ainda com as próprias vítimas, caso possuam os equipamentos necessários.

Embora o comportamento de alguns protocolos de roteamento em redes DTN tenham sido analisados quando utilizados da forma descrita, um dos objetivos deste trabalho é o de avaliar métodos para melhorar o comportamento e o desempenho de uma DTN quando aplicada aos cenários descritos, de forma que a rede proposta consiga melhor adaptar-se ao cenário a partir de uma adequada seleção de rotas de voo dos VANTs. Utilizando heurísticas de TSP para a elaboração dessas rotas, busca-se otimizar a comunicação estabelecida pela DTN. Além de auxiliar na comunicação em si, os VANTs podem ser aproveitados ainda para a coleta de dados de sensores em locais inóspitos ou com grandes restrições de mobilidade, assim como para fotografia e filmagem aérea, permitindo uma rápida compreensão da situação atual do cenário em questão por parte das equipes.

Para a arquitetura de rede proposta, foram selecionados e avaliados quatro protocolos de roteamento, específicos para DTNs, que melhor se ajustam a uma aplicação em cenários de emergência. São eles o *Epidemic*, o *Prophet*, o *Spray and Wait* e o *Maxprop*. O desempenho desses protocolos foi avaliado com base em um cenário de emergência realístico. Esse cenário contempla o caso de inundação e deslizamentos decorrentes de fortes chuvas que ocorreram no município de Nova Friburgo - RJ, em janeiro de 2011. Será utilizado um simulador de redes oportunísticas onde será possível avaliar o desempenho das DTNs formadas, usando VANTs como nós móveis. O trajeto desses VANTs será gerado utilizando uma estratégia de divisão do cenário em regiões menores, através do algoritmo *k-means*, e aplicando heurísticas para a solução do TSP clássico em cada uma dessas regiões.

1.4 Contribuições alcançadas

No decorrer deste trabalho, foi possível modelar o problema de planejamento de rotas para VANTs como um problema de caixeiro viajante. A partir dessa modelagem, foi possível aplicar as heurísticas existentes para esse problema no cálculo de rota para um único VANT. Para isso, algumas heurísticas foram escolhidas e seus desempenhos avaliados. Como resultado, o algoritmo de Christofides se apresentou como melhor opção.

Já para o cálculo de trajetórias para múltiplos VANTs, verificou-se que o problema se assemelha ao m-TSP, que é o TSP com múltiplos “caixeiros”. Foram então propostas duas abordagens de solução inspiradas nas soluções adotadas para o m-TSP, fazendo uso do algoritmo k-means para a partição da região do cenário original e subregiões que clustervizam os PoIs, podendo ou não incluir o centro de comando das operações (CC). Essas duas abordagens foram avaliadas e comparadas entre si e com uma terceira abordagem, de rota única, modelada e calculada através do TSP clássico.

Essas três abordagens foram então utilizadas para analisar o desempenho de alguns protocolos de rede DTN. Para essa análise, foram avaliadas as métricas mais comuns utilizadas em redes, que são ou atraso ou latência, a sobrecarga ou *overhead* e a taxa de entrega de mensagens. Além dessas, foi proposta e avaliada uma nova métrica no contexto do problema aqui tratado, relacionado às operações de salvamento num cenário de emergência: o atraso médio entre mensagens que chegam ao centro de comando das operações (CC). Esta métrica foi chamada de Atraso Médio entre Mensagens (AMeM).

Sendo assim, de forma sintética, podemos elencar como principais contribuições deste trabalho:

- (i) modelagem do problema de planejamento de rotas dos VANTs como um m-TSP, com o objetivo de otimizar as comunicações na DTN proposta;
- (ii) proposta e avaliação de duas abordagens inspiradas no m-TSP para o planejamento de rotas dos VANTs, usando o algoritmo k-means para subdividir o cenário em regiões menores interconectadas e aplicar uma solução de TSP em cada região;
- (iii) proposta de uma nova métrica de desempenho específica para operações em cenários de emergência (AMeM), que avalia a frequência das mensagens recebida pelo CC, conforme a abordagem e os protocolos usados.

Não obstante, contribuições secundárias, também relevantes, foram alcançadas por

consequência direta dos resultados primários ou em função desses, e são elencadas a seguir:

- (i) proposta e avaliação de uma arquitetura DTN com o uso de VANTs para o estabelecimento de uma rede de comunicação entre equipes de resgate e o centro de comando e controle de operações num cenário de emergência;
- (ii) estudo de quais tipos de VANTs e tecnologias de rede sem fio são mais adequadas para uso na DTN proposta, resultando na proposta de se usar VANTs do tipo asa voadora, ou Zagi, equipados com interfaces de rede padrão 802.11;
- (iii) avaliação de qual a melhor heurística a ser usada para resolver o TSP para uma dada região, resultando na escolha do algoritmo de Christofides;
- (iv) proposta e avaliação de uma abordagem que espacia os múltiplos VANTs sobre uma única rota calculada para o respectivo TSP, levando em consideração o cenário de emergência como um todo, de maneira a otimizar a métrica de desempenho proposta (AMeM);
- (v) avaliação das abordagens propostas em cenário realista, baseado no desastre ocorrido no município de Nova Friburgo em 2011, com tamanhos de mensagem que emulam a troca de conteúdos de áudio, imagens e de vídeos de curta duração;
- (vi) avaliação de qual protocolo de roteamento DTN baseado em disseminação, dentre os mais conhecidos e usados, é mais adequado para os casos avaliados em geral.

1.5 Estrutura do texto

Dando prosseguimento a este documento, no Capítulo 2 são apresentadas as características dos cenários de emergência, os principais tipos de VANTs, as vantagens e desvantagens desses modelos para cenários de emergência, e trabalhos relacionados a este tema. No capítulo 3 são apresentadas as tecnologias de rede sem fio que podem ser empregadas pelas equipes de resposta a emergência em cenários correlatos, incluindo as que são adotadas neste trabalho. No Capítulo 4 o planejamento de rotas de voo de VANTs é discutido, apresentando e modelando o problema como o problema do caixeiro viajante. No Capítulo 5, a arquitetura DTN formada por VANTs e nós terrestres, incluindo o centro de controle de operações, é apresentada. São fornecidos detalhes a respeito de seu funcionamento e três diferentes abordagens para a distribuição dos VANTs e seleção das

respectivas rotas são propostas e estudadas. No Capítulo 6 é descrita a forma pela qual a arquitetura foi avaliada, os resultados obtidos e uma análise comparativa a respeito das diferentes abordagens propostas. Por fim, no Capítulo 7 são apresentadas as conclusões sobre o trabalho e direcionamentos para trabalhos futuros.

2. Apoio a Operações de Salvamento em Emergências e Desastres Naturais

O termo emergência significa ocorrência de perigo, situação crítica, incidente, imprevisto (Griffin, 2009). Devido a tantos sinônimos, os termos utilizados pelas diversas organizações de resposta a emergência variam bastante ao descrever acontecimentos críticos e, portanto, termos como incidente, acidente, emergência, desastre e catástrofe são empregados por tais organismos (Ferreira, 2011).

Desastre natural é o termo normalmente empregado pelos organismos de defesa e auxílio para definir as situações de emergência nas quais fenômenos naturais, tais como terremotos, furacões, chuvas fortes, dentre outros, atingem áreas ou regiões habitadas pelo ser humano, causando danos pessoais ou materiais. No Brasil, a maioria dos desastres naturais são originados por condições atmosféricas adversas. Porém, a ação humana também contribui significativamente na intensidade e frequência desses desastres, como, por exemplo, com desmatamentos, grandes queimadas e até mesmo a urbanização de grandes áreas de terra (REIS, Madruga, & SAUSEN, 2011).

2.1 Caracterização dos cenários de emergência

Os cenários de emergência podem ser caracterizados de forma genérica como sendo regiões afetadas por uma catástrofe ou desastre, seja ela natural ou não, que colocam vidas em risco e causam perdas materiais. Portanto, esses cenários basicamente demandam equipes capacitadas a atenderem as eventuais vítimas, seja resgatando-as ou prestando-lhes os primeiros socorros. Profissionais habilitados a conter ou restaurar, à sua integridade, elementos que possam vir a causar perdas materiais, tais como árvores prestes a cair ou prédios estruturalmente abalados. Além, é claro, de necessitarem também de um controle central que possa coordenar toda a operação.

No entanto, a depender de alguns fatores como o tamanho da área afetada, quantidade de vítimas, necessidade de atendimento a desabrigados e da natureza do desastre em si, até mesmo sua definição pode mudar em função desses fatores, como visto na Tabela 2.1. Podemos então agrupar os desastres em função dessas características de modo a facilitar a compreensão das demandas de cada um desses cenários (de Araujo, 2009). Com base nessas informações, podemos definir alguns parâmetros para o dimensionamento da emergência e sua consequente classificação, a saber: (i) sua intensidade, (ii) o intervalo entre ocorrências e (iii) causa geradora.

Tabela 2.1: Tabela com definições de tipos de emergências.

Acidente	<ul style="list-style-type: none"> • Um ou mais órgãos de função específica, como bombeiros, policia e serviços médicos, são acionados. • Não ocorre nenhuma ascendência de comando de uma organização sobre as demais envolvidas. • Não há necessidade de coordenação externa com o objetivo de gerenciar a ocorrência do acidente.
Desastre	<ul style="list-style-type: none"> • Geralmente afeta grandes áreas causando dificuldade de acesso às áreas impactadas, podendo ocorrer o colapso de vias de acesso importantes, incluindo as redes de comunicação. • A velocidade do impacto, associada aos problemas em redor e aos problemas de comunicação, geram dificuldade de conhecimento do cenário global. • A situação excede a capacidade de resposta e exige coordenação externa para o seu gerenciamento. • A resposta inicial não é dada pelos órgãos governamentais de socorro e sim pelos sobreviventes do desastre. • Não se caracterizam por grandes acidentes, mas por diferentes tipos de eventos associados.
Catástrofe	<ul style="list-style-type: none"> • Afeta não apenas a comunidade local, mas gera o caos afetando todos os órgãos de resposta, destruindo toda a sua estrutura física e lógica de intervenção.

De acordo com (REIS et al., 2011), as emergências podem ser classificadas como sendo de baixa, média ou de alta intensidade:

- **Baixa intensidade:** Causam alguns danos e prejuízos, os quais podem ser recuperados pelas comunidades afetadas. A defesa civil as classifica como desastres de níveis I e II, diferenciando-se um do outro pela facilidade da comunidade voltar à normalidade após o fato.
- **Média intensidade:** Causam danos e prejuízos mais graves, sendo necessária a decretação de situação de emergência. A defesa civil as classifica como desastres de nível III.
- **Alta intensidade:** Os danos e prejuízos causados são muito mais graves, ultrapassando a capacidade de recuperação da região afetada por meios próprios, fazendo com que seja decretado estado de calamidade pública. A defesa civil as classifica como desastres de nível IV.

As emergências, de acordo com sua ocorrência, podem ser súbitas ou cíclicas. As ocorrências súbitas são aquelas que se manifestam de forma inesperada, não havendo, portanto, tempo suficiente para o preparo contra o impacto de seus efeitos. As ocorrências cíclicas são aquelas que se manifestam com periodicidade e/ou sazonalidade, desta forma havendo tempo para que atitudes preventivas sejam tomadas.

Quanto às causas, as emergências podem ser classificadas como naturais ou humanas. As emergências naturais, ou seja, causadas por desastres naturais, caracterizam-se por fazer parte de um ciclo que se associa à evolução do planeta ao longo do tempo, manifestando-se sob a forma de erupções vulcânicas, terremotos, maremotos, ciclones, enchentes, secas etc. Já as emergências humanas são provocadas pela própria evolução humana, devido ao abuso e mal uso de seu conhecimento. As emergências humanas subdividindo-se em:

- **Tecnológicas:** São aquelas geradas pelo desrespeito às normas e princípios que envolvem o uso da tecnologia em equilíbrio com o meio ambiente, podendo ocasionar incêndios, explosões, desabamentos, vazamentos químicos ou rompimento de barreiras, por exemplo.
- **Sociais:** São originadas pela incapacidade do ser humano de conviver em harmonia com seus semelhantes dentro dos princípios de liberdade, igualdade e fraternidade. Podem se manifestar na forma de greves, guerras, violência, fome ou sabotagem.
- **Biológicas:** São resultantes do desequilíbrio entre o ser humano e a natureza, com isso ocasionando pragas animais e vegetais, epidemias e pandemias.

Uma vez classificados e caracterizados os cenários de emergência, eles precisam ser sistematicamente trabalhados de forma a devolver a região afetada para o seu estado normal, ou o mais próximo possível daquele que havia antes da ocorrência do desastre. Para levar a termo essa tarefa, existe todo um processo de gestão de emergências adotado por órgãos de defesa civil do mundo inteiro.

2.2 Processo de gestão de emergências

A gestão de emergências baseia-se em uma sequência cíclica de etapas que se relacionam entre si e são agrupadas de forma básica em antes, durante e depois. De acordo com a ESRI (*Environmental Systems Research Institute*), uma empresa americana especializada na produção de soluções para a área de informações geográficas, essas etapas se subdividem em outras cinco: planejamento, mitigação, preparação, resposta e recuperação (Sivakumar & Tan, 2010).

A secretaria de defesa civil brasileira acrescenta mais duas etapas: a de alerta, inserida antes da etapa de resposta, e a de reabilitação, que compreende a restauração dos serviços. A etapa de reabilitação é acionada antes da fase de recuperação, como pode ser visto na tabela 2.2.

Antes	Durante	Depois
Planejamento	Resposta	Restauração
Mitigação		
Preparação		Recuperação
Alerta		

Tabela 2.2: Etapas do Processo de Gestão de Emergências

2.2.1 Antes da emergência

É a fase antes do desastre que engloba as atividades de prevenção, mitigação, preparo e alerta. O objetivo aqui é: prevenir, para evitar que ocorram danos maiores no impacto do desastre; mitigar, para diminuir o impacto do desastre; preparar, para organizar e planejar as ações de resposta; e alertar, para notificar formalmente a presença iminente de um perigo.

As etapas relacionadas a esta fase são as seguintes:

- Etapa de planejamento ou prevenção, onde se realizam as atividades necessárias

para documentar e analisar a probabilidade de que um desastre ocorra e suas prováveis conseqüências, com relação a perdas de vidas e a danos a propriedades e ao ambiente.

- Etapa de mitigação, que visa reduzir ou eliminar efetivamente a probabilidade de um desastre ocorrer. Esta fase também inclui ações que tendem a ser continuamente aplicadas ao longo do tempo para reduzir os efeitos de desastres que não podem ser evitados. Por exemplo, criar canais de escoamento ou reservatórios subterrâneos para o escoamento da água das chuvas.
- Etapa de preparação, o que envolve as organizações, os governos e as pessoas para que sejam desenvolvidos planos e estratégias para salvar vidas e minimizar os estragos causados pelo desastre. A cidade do Rio de Janeiro, por exemplo, criou o sistema de alerta por sirenes em áreas de risco de deslizamento com o objetivo de evacuar a população próxima a essas áreas.
- Etapa de alerta, que ocorre num momento anterior à ocorrência de um desastre e existe com a finalidade de tomar precauções específicas dada a provável ocorrência de um evento de desastre. A Defesa Civil do Rio de Janeiro tem um serviço de mensagens para alertar a população sobre a ocorrência de chuvas fortes e o atual estágio de atenção da cidade.

2.2.2 Durante a emergência

Nesta fase se executam as atividades de resposta durante o período de emergência ou imediatamente depois de ocorrido o evento. Estas atividades incluem a evacuação da área afetada, assistência, abrigo, busca e resgate. Também se iniciam ações com a finalidade de restaurar os serviços básicos e necessários à população e de reparar determinada infraestrutura vital à área afetada.

De acordo com (de Araujo, 2009), as atividades de resposta englobam:

- Busca e resgate de pessoas afetadas.
- Assistência médica para a população afetada.
- Evacuação da população afetada em zonas de perigo.
- Alojamento temporário, distribuição de alimentos e abrigo para a população mais afetada.

- Segurança e proteção de bens e pessoas.
- Avaliação preliminar de danos.
- Apoio logístico, com a organização de abrigos e instalações provisórias de apoio médico, alimentação e transporte.
- Sistemas de comunicação e aviso, visando integrar as equipes de emergência e manter a população local informada.

2.2.3 Depois da emergência

Esta fase divide-se em reabilitação e reconstrução. O objetivo das atividades de reabilitação, como o nome sugere, é restabelecer os serviços vitais indispensáveis e o sistema de abastecimento da área afetada. As atividades de recuperação visam reparar a infraestrutura afetada e restaurar o sistema produtivo a um estado similar ao que se encontrava antes que a catástrofe ocorresse.

Em cenários de desastre, diversos órgãos e instituições podem participar das atividades de resposta e reabilitação. No processo de gestão de emergências, é necessário portanto o estabelecimento de um centro de controle e operação. De acordo com o manual de gerenciamento de desastres, nessas situações o centro de controle e operação tem a função de comandar, controlar e coordenar as operações de resposta (Junior, Carlos Alberto de Araujo, & Luiz, 2010). Ou seja, o centro de controle e operação, também chamado de Centro de Comando (CC), tem a responsabilidade de coordenar a operação como um todo, desenvolvendo um plano de ação e definindo objetivos e prioridades. Dessa forma, todas as informações que forem coletadas devem ser concentradas no CC, para que este possa analisá-las, segundo seus critérios, e então decidir sobre as estratégias de ação e sobre como alocar os recursos disponíveis.

Já que a região onde ocorre a emergência pode ser instável, normalmente o CC localiza-se afastado do local da ocorrência. Por conseguinte, a percepção da situação atual da região afetada é obtida pelo CC em função das informações que são recebidas das equipes em operação.

Em agosto de 2005, por exemplo, o furacão Katrina devastou a costa dos Estados Unidos, causando danos catastróficos a toda a infraestrutura de telecomunicações e energia elétrica. Tamaña destruição impediu uma pronta resposta das equipes de socorro, dificultando enormemente o atendimento a determinadas áreas ou até tornando inviável o atendimento a áreas mais afetadas (Miller, 2006),(Foster, 2017).

Fica claro, portanto, que a infraestrutura de telecomunicações de uma região pode ser diretamente afetada por um evento de desastre, inutilizando-a. Face a essa situação, a instalação emergencial de uma rede de comunicações precisa ser realizada da forma mais rápida possível. Assim sendo, este trabalho propõe a utilização de veículos aéreos não tripulados, ou VANTs, equipados com dispositivos de rádio, para fins de estabelecimento dessa rede de comunicação emergencial. Pretende-se, assim, que seja possível prover um auxílio primário aos sistemas de comunicação existentes e fora de operação, facilitando a troca de informações entre o CC e as equipes em campo.

2.3 Veículos Aéreos Não Tripulados, ou VANTs

Desde sua invenção, o avião permitiu que o homem, ao ganhar a capacidade de voar, pudesse realizar tarefas que antes eram impossíveis. Antes mesmo do avião, balões, dirigíveis ou não, já eram utilizados com o intuito de voar transportando passageiros de forma mais rápida e alcançando lugares antes inacessíveis. Em ambos os casos, essas aeronaves sempre precisaram de alguém que as comandasse controlando sua trajetória e altitude. Dependendo do porte e complexidade das aeronaves, além do piloto são necessárias outras pessoas para auxiliar no manejo dessas máquinas. Essas pessoas são a tripulação da aeronave, as quais auxiliam o piloto fornecendo-lhe basicamente informações de aeronavegação e situação geral da aeronave, como uma pane em um motor ou a iminente falta de combustível, por exemplo.

Inúmeros avanços tecnológicos simplificaram os procedimentos necessários à pilotagem. A instalação, a bordo das aeronaves, de computadores capazes de sintetizar em poucas telas diversas informações cruciais ao voo, teve como consequência a diminuição do tamanho da tripulação necessária a bordo das aeronaves. Tornaram também os voos em si mais seguros, ao implantar diversos mecanismos de segurança, informando ao piloto eventos críticos que comprometam de alguma forma a integridade da aeronave e seus passageiros.

Mesmo assim, existem situações nas quais a tripulação de uma aeronave estará em risco independente do nível de tecnologia empregada para mantê-la em segurança. Por exemplo, em um cenário de guerra, um avião pode ser atingido pelo inimigo e ser derubado. Em ambientes de condições climáticas adversas, os computadores a bordo da aeronave podem entrar em pane, fornecendo informações errôneas ao piloto e levando perigo para a aeronavegação. Ou ainda, em um ambiente que contenha elementos nocivos à saúde humana, como a radiação, a qual pode afetar tanto os equipamentos a bordo como

as pessoas, que poderão sofrer seus efeitos a médio e longo prazo.

Há diversos casos de emprego de aviação em que não há transporte de passageiros e onde, além da necessidade de um piloto para efetivamente pilotar a aeronave, nenhuma outra ação se faz necessária por parte desse profissional. Nesses casos, missões envolvendo situações de risco poderiam ser realizadas sem que fossem colocadas vidas humanas em perigo, caso as aeronaves pudessem ser remotamente pilotadas.

Desta forma, aproveitando os grandes avanços tecnológicos, principalmente nas áreas das telecomunicações e da microeletrônica, uma nova classe de aeronaves foi criada, retirando-se o piloto e qualquer tripulação da cabine de comando dessas aeronaves, criando para tal, mecanismos através dos quais essas aeronaves pudessem ser controladas remotamente: os Veículos Aéreos Não Tripulados, ou VANTs (*Unmanned Aerial Vehicles*, ou UAVs em inglês).

Os VANTs podem ser controlados de forma remota por um operador ou terem seu percurso pré-programado. Podem ser classificados em cinco categorias básicas (Sarris & ATLAS, 2001) que englobam tanto as aeronaves de asa fixa (aviões, planadores etc.), as de asas rotativas (helicópteros e girocópteros) e as que não se enquadram em nenhuma categoria específica convencional (multirotóres, foguetes, balões ou pipas, dentre outros).

Uma vez que os projetistas não precisam se preocupar com o fator humano a bordo dessas aeronaves, os VANTs se beneficiam de uma significativa redução de peso. São eliminadas a cabine do piloto, demais acomodações para a tripulação e sistemas de suporte de vida. Essa redução também permite à aeronave sustentar altitudes de voo onde a força da gravidade é aumentada em muitas vezes, o que seria extremamente perigoso e prejudicial para uma tripulação humana.

Ainda no que diz respeito a peso, uma das características mais importantes dos VANTs é a carga útil que podem carregar, denominada tecnicamente de *payload*. Essa carga útil pode conter uma câmera de vídeo, equipamentos de reconhecimento diurno e noturno e, em geral, qualquer equipamento que seja necessário para que o VANT complete sua missão.

Com os avanços tecnológicos dos últimos anos na área da microeletrônica, melhorias significativas foram possíveis originando, por exemplo, giroscópios de estado sólido e sensores inerciais mais sofisticados, permitindo a construção de VANTs cada vez mais confiáveis em termo de controle de voo. A tecnologia moderna de telecomunicação, por exemplo, já permite o envio de comandos de voo e missões para essas aeronaves a altas taxas de transferência de dados e longas distâncias.

2.3.1 Classificação dos VANTs

De acordo com (Longhitano, 2010), os VANTs apresentam uma grande variação quanto a sua forma, modo de propulsão e alcance. Mas, em geral, é um sistema composto por três blocos principais: o operador, a estação de controle em solo e a aeronave em si.

O operador tem a função de programar as missões de voo que serão executadas pelo VANT, alterá-las ou atualizá-las durante o decorrer da missão ou, em situações específicas, assumir o controle manual do VANT. A estação de controle fica encarregada, então, de enviar as informações inseridas pelo operador ao VANT, assim como receber informações de telemetria do VANT, como altitude, velocidade e coordenadas GPS. A aeronave é, por fim, o elemento de todo esse conjunto que efetivamente realiza as missões programadas e é classificada quanto ao seu alcance e tipo de voo realizado (Sarris & ATLAS, 2001). A Tabela 2.3 apresenta a classificação dos VANTs quanto ao alcance.

Outro quesito que deve ser considerado para a classificação dos VANTs é a forma como realizam seu voo. A Figura 2.1 ilustra alguns modelos de VANT quanto ao seu tipo de voo. Alguns VANTs são capazes de decolagem e aterrissagem verticais (figuras 2.1(a),(b) e (c)) e são denominados VTOL (*Vertical Take-Off and Landing*). Outros, entretanto, podem necessitar de pistas de determinadas dimensões (figuras 2.1(d),(e) e (f)) (Sarris & ATLAS, 2001; Longhitano, 2010).

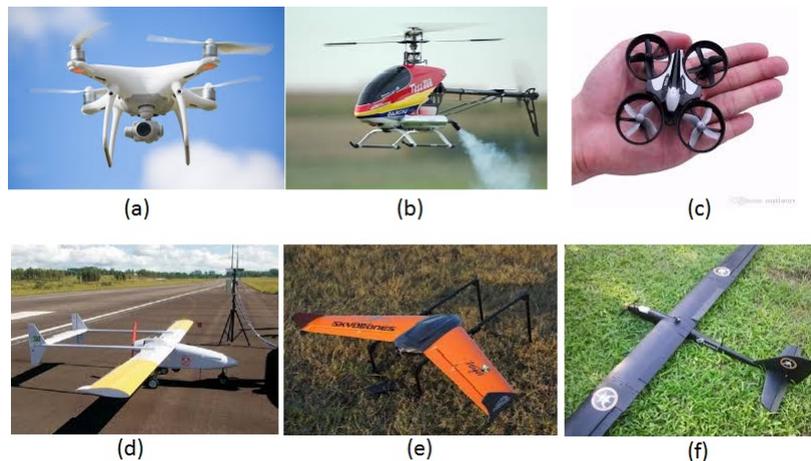


Figura 2.1: VANTs conforme o tipo de voo
Fontes: Collie(a), Souza(b),DHgate(c),
Kawaguti(d),Skydrones(e),Governo(f)

Os VANTS com capacidade de VTOL podem pairar no ar indefinidamente e voar em qualquer direção (para frente, para trás e para os lados). Esse tipo de voo denomina-se *hover*. Um grande problema dos VANTs VTOL é que eles gastam grande parte da

Tabela 2.3: Classificação de VANTs quanto ao alcance.

Curtíssimo alcance	<ul style="list-style-type: none"> • Aeronaves que têm um alcance operacional de menos de 25 km. Normalmente essas aeronaves são bastante leves e podem ser lançadas manualmente.
Curto alcance	<ul style="list-style-type: none"> • Esta categoria de aeronave tem um alcance entre 25 e 100 km.
Alcance médio	<ul style="list-style-type: none"> • Nesta categoria as aeronaves têm um alcance entre 100 e 200 km. Possuem sistemas com uma aerodinâmica mais aprimorada e sistemas de controle mais avançados, devido a seu desempenho.
Alcance longo	<ul style="list-style-type: none"> • Aeronaves capazes de alcançar distâncias entre 200 e 500 km. De forma idêntica à categoria anterior, essas aeronaves precisam de sistemas bastante complexos e sofisticados, até mesmo fazendo uso de <i>links</i> de satélite e/ou estações de retransmissão para minimizar os problemas de comunicação com o CC, devido à curvatura da terra.
Alcance extra-longo	<ul style="list-style-type: none"> • Sistemas capazes de alcançar distâncias maiores que 500 km ou permanecerem no ar por mais de 20 horas. São considerados como sendo os sistemas mais sofisticados dentre os usados por VANTs, devido a sua grande capacidade e versatilidade para executar missões.

energia de voo mantendo sua sustentação no ar. Devido a esse motivo, esse tipo de VANT tem uma autonomia baixa, sendo utilizado, portanto, em missões de curto alcance ou que não exijam tempos de voo prolongados. Nessa categoria enquadram-se as aeronaves multirotores, também conhecidas como *drones* (Figura 2.1(a)), e os helicópteros (Figura 2.1(b)).

Existe também uma categoria de VANTs chamada micro VANTs, que são aeronaves com tamanho menor que 15 cm de comprimento (Figura 2.1(c)). O desenvolvimento desse tipo de VANT está associado a idéias revolucionárias e ao atual estado da arte das tecnologias nos campos da navegação, controle de voo, microeletrônica, telecomunicação e propulsão. Esse tipo de sistema se destaca em aplicações de vigilância, detecção de derramamento químico e situações de emergência dentro de cidades, e até mesmo dentro de prédios, pois sua dimensão bastante reduzida permite seu deslocamento sem maiores embaraços em espaços mais restritos.

Com o surgimento de baterias de alta capacidade de descarga, dispositivos de rádio de longa distância, microprocessadores e motores mais poderosos, uma classe um pouco maior de VANTs surgiu, a dos mini VANTs. Esses VANTs estão se tornando facilmente utilizáveis para interesses civis, como sensoriamento remoto, mapeamento, monitoria de trânsito, busca e resgate. Os mini VANTs não têm um tamanho tão pequeno quanto os micro VANTs, mas ainda assim apresentam um tamanho total relativamente pequeno. São também bem leves e podem ser descartados, pois alguns modelos são bem fáceis e baratos de construir e operar. A maioria deles pode ser operada por uma ou duas pessoas e/ou ainda serem lançados e recuperados manualmente, não necessitando portanto de longas pistas para pouso e decolagem. A Figura 2.1(e) ilustra uma asa voadora Zagi, normalmente construída de isopor e que pode ser lançada por uma catapulta ou manualmente.

2.3.2 Sistema de controle de VANTs

Uma aeronave pode rotacionar em torno de 3 eixos a partir de seu centro de gravidade: rolagem lateral, ou *roll*, controle de atitude, ou *pitch*, e controle de proa, ou *yaw*.

5

Alguns micro ou mini VANTs podem não ter todas essas superfícies de comando. As asas voadoras, por exemplo, têm somente um controle de motor *throttle* e duas superfícies de controle, (*aileron* esquerdo e *aileron* direito). Porém, os *ailerons* podem trabalhar em conjunto para funcionarem como *elevators*. Os *ailerons* assim configurados são chamados *elevons*, pois possuem as funções de *aileron* e *elevator* nas mesmas superfícies de

comando.

Esses tipos de VANTs normalmente possuem dois modos de controle: por controle remoto e por piloto automático. O modo por controle remoto requer um piloto humano controlando o VANT através de sinais de rádio, enquanto que no modo de piloto automático a aeronave pode manter-se automaticamente em um determinado estado estável de voo. Um terceiro modo também pode existir, onde por exemplo o sistema de piloto automático mantém a altitude do VANT enquanto o piloto humano controla o percurso de voo.

Os micro VANTs rádio controlados também são conhecidos como aeromodelos de rádio controle, os quais são normalmente controlados por um piloto de aeromodelo experiente, através de um transmissor de rádio controle portátil, como pode ser visto na Figura 2.2. Nesse sistema básico de rádio, a alavanca da esquerda, quando acionada no sentido longitudinal do rádio, controla o motor do VANT, enquanto a alavanca da direita, sendo acionada no sentido longitudinal, controla o ângulo de *pitch*, fazendo o VANT ganhar ou perder altitude. Essa mesma alavanca, sendo movimentada no sentido das laterais do rádio, controla o ângulo de *roll* do VANT, levando-o a fazer curvas para a esquerda ou direita de acordo com o comando aplicado. Esse sistema opera na faixa ISM de 2,4 GHz.



Figura 2.2: Transmissor de rádio controle
Fonte: FutabaRC

Os micro VANTs são projetados para voar a baixas altitudes, geralmente abaixo de mil metros. Um dos problemas desse voo a baixa altitude é a maior probabilidade de ocorrência de colisões desses VANTs com obstáculos naturais ou até mesmo casas e pré-

dios. Desta forma, um sistema robusto e preciso de piloto automático é indispensável para que esses pequenos VANTs cumpram com sucesso missões como as de vigilância a baixa altitude.

Os sistemas de piloto automático são sistemas que basicamente guiam o VANT durante o voo, sem a assistência de operadores humanos. Os pilotos automáticos foram inicialmente desenvolvidos para o controle de mísseis e posteriormente sua aplicação foi estendida aos aviões e navios. Um sistema mínimo de piloto automático inclui sensores de atitude e sistema de processamento embarcado para o processamento das informações dos sensores e acionamento das superfícies de comando da aeronave. Ou seja, um piloto automático é um sistema eletromecânico utilizado para pilotar o VANT sem assistência de um operador humano, consistindo de *hardware* e seu respectivo *software* com o objetivo de guiar os VANTs através de um determinado caminho, ou para que atinja determinados pontos de interesse pré-programados. Um sistema de piloto automático sofisticado pode ser capaz, inclusive, de controlar um VANT em todos os seus estágios de voo, incluindo decolagem, subida, cumprir uma missão de acordo com a trajetória estabelecida, descida e pouso.

Um sistema básico de piloto automático inclui uma série de sensores para determinar o estado atual do VANT e processadores embarcados para estimativas e controle de circuitos periféricos. Servem para comunicação com os servo mecanismos de controle das superfícies de comando, além de estabelecer um enlace de rádio para a comunicação e envio de dados de telemetria para a estação em solo. Devido às limitações de tamanho e capacidade de carga útil dos micro VANTs, esses pilotos automáticos precisam ser pequenos, leves e consumir pouca energia.

O sistema de piloto automático basicamente funciona em *loop* fechado, compreendendo duas partes: a observação do estado atual da aeronave, através de seus diversos sensores, e o controle das superfícies de comando para manter a aeronave voando de acordo com os parâmetros programados. Os sensores mais utilizados para observar o estado atual da aeronave são o giroscópio, para manter a estabilidade do VANT, os acelerômetros, para perceber mudanças sutis de atitude (posição de voo) da aeronave, e a bússola eletrônica, para orientação geográfica básica.

Existem também outros dispositivos capazes de determinar a atitude da aeronave, tais como os baseados em infravermelho e os baseados em visão robótica. Os dados lidos por esses sensores, juntamente com as informações de GPS, são combinadas em um filtro para gerar estimativas do estado atual da aeronave. Normalmente, por serem mais fáceis de serem implementados, os algoritmos utilizados para converter essas estimativas em

controles para o VANT baseiam-se em uma abordagem proporcional-integral-derivativa (PID). A abordagem PID basicamente emprega um controle proporcional ao VANT, de acordo com a intensidade do desvio observado nos sensores, enquanto o controle integral procura limitar a atuação proporcional, de modo que essa resposta seja proporcional à intensidade e duração do desvio observado. O controle derivativo completa o mecanismo de controle proporcionando uma atuação proporcional-integral de acordo com a velocidade de variação dos desvios observados.

Conforme anteriormente comentado, diversos sensores inerciais podem ser utilizados para medir a posição de aeronaves relativa à latitude, longitude, altitude e informações de atitude. A tecnologia atual de microprocessamento permite a utilização de sensores pequenos e leves, dentre eles:

1. Receptor de GPS, para medir a posição absoluta e velocidade do VANT em relação ao solo;
2. Giroscópio, para medir deslocamentos angulares;
3. Acelerômetro, para medir a aceleração;
4. Bússola eletrônica, utilizada para fazer correções de curso;
5. Sensor de pressão, para medir a velocidade no ar e altitude barométrica;
6. Sensor ultrassônico, para medir a altitude relativa ao solo;
7. Sensor infra vermelho, para medir a atitude;
8. Câmeras RGB ou sensores de imagem capazes de substituir alguns dos outros sensores;
9. Unidade de medida inercial (ou *Inertial Measurement Unit - IMU*), que engloba sensores giroscópicos e inerciais para três ou mais eixos em um único dispositivo, medindo a atitude do VANT e possibilitando a percepção de seu repouso relativo em voo (Hover).

De todos esses sensores, um dos mais importante é o GPS, pois fornece uma medida absoluta de posicionamento da aeronave com dados precisos de altitude, posicionamento global e velocidade. Porém, os sistemas de GPS são suscetíveis a falhas em condições adversas de clima, como por exemplo durante tempestades ou fortes chuvas.

2.4 Aplicações de VANTs em cenários de emergência

Conforme já mencionado, uma vez que os VANTs não necessitam de pilotos em seu interior, essas aeronaves passam a apresentar uma grande vantagem sobre as aeronaves convencionais, já que durante o voo nenhuma vida humana estará em risco direto a bordo da aeronave. Essa vantagem permite aos VANTs realizarem missões que nenhuma outra aeronave tripulada poderia realizar em situações de alto risco, como por exemplo, inspeção de reatores nucleares, vazamentos químicos, vulcões em atividade, furacões e missões de resgate sob más condições climáticas. Por essas razões e outras de ordem econômica, os VANTs estão se tornando parte integral das forças militares modernas em todo o mundo e também estão ganhando terreno na utilização civil, tais como patrulhamento de fronteira, inspeção de plataformas e coletas de dados oceanográficos e meteorológicos.

Os VANTs, portanto, são normalmente utilizados em tarefas perigosas demais para serem realizadas por aeronaves tripuladas. Além de requererem menos recursos para cumprirem missões, as quais normalmente iriam necessitar de grande mobilização de pessoal e equipamento, podem ainda prover serviços de vigilância, reconhecimento e comunicações para os comandantes no campo de batalha. Na utilização civil, dentre outros exemplos, eles podem se tornar uma plataforma de sensores valiosa para pesquisa ambiental. Algumas aplicações de exemplo são:

1. Patrulhamento de fronteiras;
2. Busca e resgate de sobreviventes de naufrágios e acidentes aéreos;
3. Combate a incêndios florestais onde VANTs equipados com sensores de infravermelho podem detectar focos de incêndios e avisar as brigadas de combate a incêndios;
4. Em telecomunicações, VANTs de grande altitude e longa autonomia podem ser utilizados para cobrir uma área limitada, substituindo o emprego de satélites;
5. VANTs do tipo VTOL podem substituir helicópteros policiais de forma mais econômica, auxiliando a polícia;
6. No gerenciamento de desastre e emergência, VANTs equipados com câmeras podem fornecer informações em tempo real de situações calamitosas, como por exemplo enchentes;
7. Pesquisas científicas de natureza ambiental, atmosférica e arqueológica, dentre outras, podem ser auxiliadas por VANTs equipados com os sensores apropriados;

8. Uso em aplicações industriais, tais como aplicação de agrotóxicos em lavouras, inspeção de usinas nucleares e inspeção de queimadores de plataforma de petróleo.

Os VANTs já provaram que são capazes e confiáveis o suficiente para realizar complicadas e desafiadoras missões com sucesso e vêm se tornando cada vez mais sofisticados, com o mercado mundial de fabricantes de VANTs podendo ser capaz de prover uma ampla variedade de sistemas. Como exemplo, podemos citar o projeto da empresa Google denominado *loon*, que utiliza VANTs do tipo balão que voam na região da estratosfera, a cerca de 20 km acima da superfície terrestre. São equipados com painéis solares e equipamentos de rádio, operando na banda de ISM, com o objetivo de prover conectividade a áreas remotas e rurais, além de auxiliar na conectividade de certas regiões após a ocorrência de desastres (Google, 2013). Em outro exemplo, em 1998, o VANT Aerosonda recebeu a missão de sobrevoar o ciclone tropical Typhoon localizado a oeste da costa da Austrália. A missão foi completada com sucesso e foi a primeira vez na história que meteorologistas tiveram a oportunidade de colher dados de uma plataforma aérea sobrevoando tão próximo a área de um ciclone (senator h i. mackdonald, 1998).

No Brasil, algumas instituições já utilizam VANTs para a realização de missões de inspeção, aerofotografia, aeromapeamento e treinamento de tropas (Arlindo Bastos de Miranda, 2009), sendo que diversas empresas já vêm se dedicando a algum tempo ao desenvolvimento e comercialização de VANTs (Longhitano, 2010).

As forças armadas brasileiras, assim como algumas forças policiais e de defesa civil, têm investido em equipamentos do tipo avião. Nesse contexto, podemos citar o VANT carcará, fornecido ao exército brasileiro, e o planador desenvolvido em conjunto com o Instituto Militar de Engenharia (IME) para utilização pelo Batalhão de Operações Especiais do Rio de Janeiro (BOPE), ambos desenvolvidos por empresas nacionais.

A inspeção de altas torres de transmissão de energia, queimadores em plataformas de petróleo, dentre outros, é outro exemplo de uso de VANT por empresas no Brasil. Nestes casos, os VANTs do tipo helicóptero têm sido utilizados com sucesso, reduzindo drasticamente o custo e o risco das rotinas de inspeção. A empresa Petrobras realizou, em um passado recente, um programa para avaliar a viabilidade da utilização de VANTs do tipo helicóptero em suas plataformas de extração de petróleo. Em um estudo inicial, a empresa contratou três equipes com seus respectivos VANTs para a análise dos queimadores da plataforma e constataram que esses equipamentos podem ser empregados com grande vantagem. Isso porque, em uma inspeção normal, a plataforma teria suas atividades paralisadas e os queimadores desativados, para então ser iniciado o processo de inspeção. Com a utilização de VANTs, esse procedimento não se faz necessário e a plataforma pode

prosseguir operando normalmente durante a inspeção.

A aerofotografia e o aeromapeamento, dependendo da área a ser abrangida, demandam um tipo de VANT que possa voar com boa autonomia e estabilidade. Nesse caso, os VANTs do tipo avião são mais indicados. No cenário de desastre ocorrido na região de Xerém, na baixada fluminense, em janeiro de 2013, o exército brasileiro contou com o auxílio de um VANT do tipo avião capaz de realizar missões por período de duas a quatro horas ininterruptas, com raio de alcance de cerca de dez quilômetros. Naquela ocasião, o VANT foi utilizado para prover o CC estabelecido na região, e por conseguinte as equipes de resgate, com informações visuais em tempo real, captadas pela câmera embarcada naquele VANT.

As áreas de desastre por possuírem características peculiares, podem apresentar severas restrições para as equipes envolvidas nas ações de busca e resgate. Em um ambiente desses, muitas vezes pode ser difícil ou até mesmo impossível ter à disposição espaço suficiente para a instalação, mesmo que de forma precária, de uma pista para pousos e decolagens. As áreas atingidas e, portanto, de interesse para atuação das equipes, podem se estender por alguns quilômetros além do ponto onde o CC está montado.

Conforme visto nas seções 2.3.1 e 2.3.2, os VANTs apresentam diversas características e limitações que podem ser determinantes na escolha de um modelo ou outro em função do uso pretendido. A Figura 2.4 apresenta, de forma sumarizada, as características apresentadas nessas seções para uma rápida referência.

Tabela 2.4: Características gerais dos VANTs.

Tipo Vant	Autonomia	Modo de voo	Decolagem	Velocidade	Resist.	Custo
Avião	2hs	Contínuo	Pista	30 a 50km	Média	Médio
Zagi			Pista/Manual	30 a 300km	Alta	Baixo
Planador	8hs		Pista	18 a 50km	Média	
Helicóptero	40 min.	Parado/Contínuo	Pista/VTOL	0 a 40km	Baixa	Alto
Multirotor						

Tomando como base essas informações, os VANTs que assemelham suas características de voo com a dos aviões convencionais, pelas suas especificações de grande autonomia, facilidade de manuseio e velocidade de voo, dentre outras, são os mais indicados para uso em cenários de desastre, onde um tempo de voo mais prolongado pode ser essencial. Além disso, sua construção e manutenção é mais simples (Beard et al., 2005).

Nesse sentido, as asas voadoras, ou Zagis, além de serem extremamente robustas, praticamente não necessitam de pista para sua decolagem e aterrissagem, podendo ser

lançadas e recuperadas manualmente. Tornam-se extremamente versáteis e práticas para serem utilizadas em ambientes com pouco espaço e/ou que não disponham de uma pista. Já os VANTs do tipo VTOL, mais especificamente os multirotores, podem ser utilizados como elementos de apoio, embora apresentem um padrão de consumo de energia maior se comparados com as Zagis.

Por exemplo, VANTs de maior autonomia podem realizar as operações de busca e localização, sobrevoando por mais tempo as localidades, além de poderem explorar uma área mais extensa. Uma vez identificada uma área necessitando de apoio ou recursos, um VANT de menor autonomia, mas com capacidade de decolar e pousar verticalmente, e portanto podendo ter acesso a regiões bastante restritivas, pode ser enviado para entrega de suprimentos.

Em cenários de desastres, VANTs podem também servir como auxiliares nas atividades de busca e resgate, auxiliando as equipes a localizar sobreviventes em locais ermos e de difícil acesso. Podem também auxiliar na avaliação de preliminar de danos, registrando imagens das áreas afetadas e enviando-as para o CC. Este monitoramento pode também servir ao apoio logístico, auxiliando na identificação de rotas viáveis em face de interdições causadas pelo desastre.

2.5 Trabalhos relacionados

Historicamente, a comunicação entre equipes e das equipes com o CC se dá pela utilização de rádios na faixa de VHF/UHF que operam no sistema *half-duplex*, ou seja, apenas um fala de cada vez enquanto o(s) outro(s) escuta(m). No entanto, novas tecnologias de comunicação para auxiliar nesses cenários vêm sendo propostas.

Em (Dilmaghani & Rao, 2008), uma infraestrutura de comunicação baseada em redes *mesh* é proposta para ser implementada nesse tipo de cenário. Essa abordagem utiliza *tiers* ou níveis para separar os diversos tipos de conexões dos dispositivos. Em um primeiro nível temos clientes utilizando PDAs, *notebooks* e iTAGs. Em outro nível temos nós *mesh* e, em um terceiro nível, enlaces provendo conexão à Internet. Embora essa solução também precise de nós infraestruturados no segundo nível, uma vez que a solução é separada em níveis existe a possibilidade de substituir a tecnologia utilizada neste nível por uma solução mais adequada para um ambiente de desastre restritivo a uma solução infraestruturada.

Em (Braunstein et al., 2006) é proposta uma arquitetura de rede sem fio híbrida e dis-

tribuída para auxiliar as equipes de emergência de forma escalável. Baseia-se em uma estrutura do tipo *mesh* para prover conectividade entre os nós e dos nós para o mundo (Internet). Um dos problemas dessa solução é a necessidade de instalação de pontos infraestruturados, o que nem sempre é possível em virtude das limitações da área do desastre. Já o trabalho de (Yarali, Ahsant, & Rahman, 2009) propõe redes *mesh* como solução de conectividade em cenários de emergência. No entanto, se os roteadores e *gateways* não puderem contar com fontes de energia capazes de fornecer energia por longos períodos, eventualmente algum desses equipamentos poderá ficar inoperante, comprometendo a conectividade, assim como ocorre com as redes *ad hoc*.

Tentando lidar com o problema de possíveis desconexões em cenários de desastre, (Mota, Silva, & Nogueira, 2009) propõe um algoritmo hierárquico para redes oportunísticas do tipo *Delay Tolerant Network*, ou DTN. Essas redes tolerantes a atrasos e desconexões serão abordadas no Capítulo 3 e, como o próprio nome diz, toleram eventuais carências de infraestrutura de rede de comunicação. Esse algoritmo tem por objetivo aumentar a taxa de entrega de dados em redes intermitentes, sem contudo afetar o *overhead* de comunicação da rede. Também em (Jiang et al., 2011) é proposta uma forma de utilizar estas redes para auxiliar as vítimas em uma situação de emergência. A proposta é a de que os celulares das vítimas sejam utilizados como nós em uma rede oportunística, utilizando-se um protocolo do tipo *epidêmico* modificado para este fim. Já (Martin Campillo, Crowcroft, Yoneki, & Marti, 2012) apresenta um estudo do desempenho de alguns protocolos de redes do tipo DTN para cenários de emergência. O estudo leva em consideração apenas que os nós estarão se deslocando da área do incidente para a área onde será feita a triagem das vítimas, trocando mensagens entre si nessas regiões e no caminho de uma região para outra.

Durante um desastre, a percepção da situação ou o entendimento da gravidade e extensão da situação de emergência é um fator crítico para minimizar o número de feridos, mortos e danos às propriedades. Assim, Fall et al. (Fall et al., 2010) propõem uma arquitetura tolerante a desconexões em que as pessoas comuns, envolvidas diretamente com a situação de desastre ou não, possam fornecer informações como texto, imagens etc às equipes de apoio e resgate, bastando para isso que essas pessoas estejam próximas de um outro nó da rede capaz de encaminhar as mensagens, o que nem sempre pode ser viável em dado cenário. Indo de encontro a esse problema, em (Sivakumar & Tan, 2010) é proposto um mecanismo para permitir o voo em formação de vários VANTs com o objetivo de utilizar esses VANTs como *backbone* para conectar eventuais nós móveis em terra ao redor de uma área específica, onde hajam equipes de resgate ou sobreviventes. Por outro lado, em (Merwaday, Tuncer, Kumbhar, & Guvenc, 2016) é proposta uma arquitetura

de VANTs que atuam como estações base em uma rede de dados baseada na tecnologia celular de quarta geração 4G (*Long-Term Evolution*, ou LTE), em substituição ou auxílio a torres de comunicação dessa rede que tenham seu funcionamento comprometido de alguma forma devido ao desastre ou emergência em curso. Já em (Lagkas, Argyriou, Bibi, & Sarigiannidis, 2018) é apresentado um *framework* no qual os VANTs fazem parte de uma rede maior, mais conectada, baseada no conceito de Internet das coisas, diretamente relacionada a cidades inteligentes e utilizando tecnologias de redes celulares 4G/5G.

Em um cenário de emergência, podemos ter, em um dado momento, diversas equipes realizando operações de busca, reconhecimento de área ou transportando pessoas e suprimentos. Nessas situações é imprescindível que essas equipes mantenham contato entre si e com a central de comando das operações (CC). No entanto, dependendo de alguns fatores inerentes à região do desastre, tais como extensão da área atingida, topografia ou vegetação, pode acontecer de os grupos virem a ficar isolados e sem condições de trocar informações entre si. Ademais, essas equipes podem obter informações valiosas a partir de imagens aéreas e informações de sensores instalados em pontos estratégicos. Além disso, desastres de grandes proporções, como terremotos e inundações, normalmente destroem toda a infraestrutura de comunicação local e, ainda que não destrua, devido ao enorme aumento de demanda por comunicação, essa infraestrutura pode entrar em colapso em função de uma súbita elevação do tráfego de rede (Jiang et al., 2011).

Em (Morgenthaler, Braun, Zhao, Staub, & Anwander, 2012) é apresentada a UAVnet, a implementação de uma arquitetura de rede autônoma baseada em nós aéreos. Seu foco é permitir que uma rede completa de comunicação seja montada de forma rápida e fácil em cenários de desastre, na etapa de recuperação pós-desastre. Para os nós aéreos são utilizados VANTs multi-rotor (quadricópteros) equipados com rádios leves para conexão com redes do tipo *mesh*. Esses rádios são conectados diretamente à eletrônica responsável pelo voo dos VANTs, controlando de forma autônoma a implantação da rede. O sistema conta com uma aplicação para o IOS da Apple e, portanto, pode ser utilizado em iPads ou iPhones. Essa aplicação permite a configuração e implantação de toda a rede de forma autônoma, além de permitir seu monitoramento em um mapa interativo, tudo realizado por apenas um único operador.

A UAVnet utiliza um protocolo de comunicação único para a troca de dados entre a eletrônica embarcada, responsável por manter o voo dos VANTs, a rede sem fio *mesh* e os dispositivos conectados à rede sem fio, oferecendo uma rede de alta mobilidade e performance utilizando o padrão IEEE 802.11s (Hiertz et al., 2010). Os nós aéreos são colocados em voo de forma automática, conforme dito anteriormente, e se mantêm a uma distância pré-definida automaticamente, de forma que estejam próximos o suficiente para

que consigam se comunicar entre si com uma intensidade suficiente de sinal de rádio, sem contudo estarem afastados demais causando interferências e perdas de sinal. Dessa forma, a rede é otimizada, aumentando sua área de cobertura o máximo possível sem que haja grandes perdas.

Em (Chenji et al., 2013) é apresentado o projeto, implementação e avaliação da DistressNet. A DistressNet é fruto de um esforço acadêmico e foi avaliada em cenários realísticos. Trata-se de um sistema que pretende prover serviços para aplicativos de resposta a emergências. A DistressNET integra uma série de dispositivos alimentados por bateria e que, portanto, podem ser rapidamente colocados em operação em um *framework* seguro. A proposta é a de uma arquitetura completa, englobando um conjunto de protocolos e as aplicações necessárias para auxiliar equipes de apoio e resgate em cenários de desastre. Foi desenvolvida especificamente como uma alternativa aos sistemas esparsos e congestionados, tipicamente encontrados em situações de emergência, onde a infraestrutura convencional normalmente não está em condições de operação. Essa rede incorpora melhorias com vistas a maximizar sua cobertura e minimizar as comunicações, tornando-a mais eficiente quanto ao consumo de energia. Um protocolo multicanal adiciona outro elemento de eficiência energética ao minimizar o congestionamento de canais através do uso inteligente das frequências disponíveis. O uso de protocolos de roteamento sob demanda e de roteamento oportunístico permite que, tanto os segmentos de rede diretamente conectados quanto os segmentos que não tenham conectividade fim a fim, possam se comunicar. Desta forma, serviços externos de nuvem, como o Amazon S3 e o Twitter, podem ser disponibilizados às equipes de apoio e resgate através de uma DTN usando um subsistema denominado FogNet. A análise situacional do cenário de desastre pode ser melhorada aumentando a capacidade da rede através da simples adição de mais equipamentos em determinadas áreas. Ou seja, o sistema é facilmente escalável. Complementando a solução, existe um aplicativo que recebe os dados de sensores de vibração que, segundo seus autores, conseguem distinguir entre vítimas presas em escombros e outros ruídos, mesmo em um ambiente com alto nível de ruído, com uma precisão de 73%. Embora sua implementação inicial contemple somente veículos terrestres e dispositivos em terra, é possível adicionar VANTs a esta estrutura de forma a aumentar sua área de abrangência e melhorar a performance da rede reduzindo a latência, visto que os VANTs podem se deslocar de forma mais rápida e direta pelo cenário.

Apesar dessas propostas serem escaláveis e até utilizarem VANTs em suas estruturas, a otimização de seu uso no cenário de desastre é primordial. Dependendo de como se apresente o cenário de emergência a ser atendido, em função de suas esparsabilidade e até mesmo da disponibilidade de recursos em dado momento, como no caso de um número

limitado de VANTs, otimizar o desempenho da arquitetura de rede para apoio às buscas e resgates pode ser crucial para o sucesso das operações.

Uma das formas mais intuitivas e eficazes de otimizar o desempenho de uma arquitetura de apoio a buscas e resgates, que faça uso de qualquer tipo de VANT em um cenário qualquer, é pela otimização das rotas de voo dos VANTs. Essa otimização resulta numa diminuição no tempo para a troca de dados na rede, uma vez que os VANTs estarão carregando as mensagens trocadas pela rede. Em (Agatz, Bouman, & Schmidt, 2018) é sugerida uma abordagem específica denominada TSP-D, ou TSP com drones, onde é aplicado um algoritmo para solução do problema do caixeiro viajante (*Travelling Salesman Problem* em inglês, ou TSP) para calcular de qual veículo um drone possa decolar e retornar após concluir sua missão. O TSP é usado para calcular uma trajetória para o VANT em função da rota do veículo.

Embora o problema de cálculo de trajetórias com VANTs possa implicar em variações do TSP, algoritmos clássicos para a solução do TSP, como o algoritmo genético e de colônia de formigas (Sonmez, Kocyigit, & Kugu, 2015; Roberge, Tarbouchi, & Labonté, 2018; Qian, Wang, Wang, & Shi, 2015), podem ser utilizados com a função de otimizar o planejamento da rota de voo dessas aeronaves. Uma abordagem utilizando colônia de formigas para o planejamento de rotas em função da formação de voo dos VANTs é apresentada em (S. Uriti & kumar, 2017), a qual leva em conta, em virtude da necessidade de manter os VANTs em formação, dados de altitude, longitude e velocidade de todos os VANTs. De forma análoga, () utiliza um algoritmo genético para o planejamento de rota de VANTs de médio e grande porte para missões múltiplas, levando em conta o tempo de voo total e o consumo de combustível de cada VANT.

Em (Yoon, Jin, Batsoyol, & Lee, 2017) é apresentada uma proposta para o planejamento de rotas de vários VANTs com o objetivo de entregar informações dentro de uma determinada janela de tempo de forma colaborativa. Os próprios VANTs, ao receberem a localização do nós que devem ser atendidos, calculam suas próprias rotas utilizando um algoritmo genético para o m-TSP, que é uma variação do TSP com múltiplos caixeiros viajantes. Caso os VANTs se encontrem durante o percurso, trocam informações entre si e recalculam toda a trajetória. O capítulo 4 abordará o TSP, o m-TSP e suas soluções.

Neste trabalho propomos a criação de uma rede de comunicações de dados utilizando protocolos para redes oportunísticas do tipo DTN, baseada em VANTs, para auxílio nas comunicações entre o centro de comando (CC) e as equipes. Para otimizar o desempenho dessa rede, o planejamento das trajetórias dos VANTs é modelado como um m-TSP, subdividindo-se o cenário em regiões menores (clusters), através de um algoritmo de clus-

terização, e modelando cada região como um TSP clássico. Uma vez que o CC tem a todo instante a localização de cada PoI conhecido, ou que venha a surgir no cenário, o cálculo das trajetórias dos VANTs é centralizado no CC, permitindo que elas sejam recalculadas rapidamente sempre que ocorrerem mudanças no cenário.

3. Redes sem Fio para Cenários de Emergência

As equipes de emergência, quando em atuação em locais de desastres, têm como equipamento primário de comunicação rádios que operam na faixa de VHF/UHF. Embora sejam equipamentos de fácil manuseio e operação, são utilizados para enviar e receber somente comandos verbais, o que em um ambiente caótico, como o cenário de um desastre, pode induzir a erros de interpretação ou ainda uma saturação do canal de comunicação com várias equipes tentando falar ao mesmo tempo (Dilmaghani, Manoj, & Rao, 2006; Manoj & Baker, 2007).

Tendo-se como objetivo a integração de equipes das diversas instituições envolvidas nas operações de resgate, como por exemplo, bombeiros, policiais e defesa civil, outras abordagens de comunicação sem fio vêm sendo estudadas para serem utilizadas pelas equipes (Santos & Ochoa, 2011). Neste capítulo, serão tratados alguns tipos de redes sem fio que têm sido estudadas em cenários de emergência para possibilitar a troca de informações, dados e imagens que irão auxiliar na tomada de decisão por parte dos gestores das operações de emergência.

3.1 Redes celulares

As redes celulares, ou ainda, redes de telefonia móvel, são um tipo de rede de telecomunicações projetada de tal forma que seja possível a comunicação entre uma ou mais estações móveis - os telefones celulares - mesmo que estas se encontrem a distâncias maiores do que aquelas dentro das quais seria possível uma comunicação direta, em virtude de sua limitada potência de transmissão. A forma engenhosa encontrada para permitir essa comunicação foi a divisão da área a ser atendida pelo serviço em pequenas células, onde cada célula é controlada por uma estação base. Essas estações permitem a conexão do terminal móvel dentro do seu raio de alcance à rede de telefonia convencional e a outros terminais móveis.

A tecnologia celular requer, para seu funcionamento adequado, uma quantidade de estações base suficiente para cobrir toda a região de operação. Além disso, cada estação base tem uma capacidade limitada de canais para acesso dos telefones móveis em sua área de cobertura. Um crescimento deste número demandará um aumento de estações base, para tal redividindo-se a célula. As taxas de transmissão de dados nas redes celulares variam em função da qualidade da comunicação entre a estação base e o terminal móvel, ou seja, da intensidade do sinal captado, e principalmente da tecnologia utilizada. Dentre as tecnologias mais recentes de telefonia celular que permitem um acesso de qualidade à Internet, temos o 3G, o HPSA, o 4G e o 5G.

A terceira geração de redes celulares, o 3G, possibilitou uma maneira mais eficiente de se conectar à internet, permitindo um melhor uso dos terminais móveis para, por exemplo, acesso a redes sociais, comunicação VoIP, video chamadas, mensagens de e-mail e mensagens instantâneas. O 3G utiliza a tecnologia UMTS, sigla para Sistema Móvel de Telecomunicações Universal (*Universal Mobile Telecommunications System*), com capacidade de fornecer taxas de transmissão entre 384 kbps e 56 Mbps, dependendo da técnica de modulação adotada. Uma dessas técnicas é o HPSA/HPSA+, que pode ser considerada uma rede 3.5G. Ela melhora o desempenho das redes 3G convencionais através do uso conjunto dos protocolos HSDPA e HSUPA.

A tecnologia 4G, também conhecida como LTE (*Long Term Evolution*), é o padrão mais recente e ainda em implantação pelo mundo, que promete transmissões de dados em bandas ultra largas. O foco das redes 4G é integralmente para o tráfego de dados, em contraste com os sistemas anteriores que se alternavam entre redes de pacotes ou de circuitos, dependendo da demanda de dados ou voz. O LTE ainda mantém compatibilidade com sistemas legados, contudo, enquanto as redes 3.5G e 3G atingem tipicamente velocidades máximas de 14 Mbps, em condições ideais podem ser conseguidas velocidades tão altas quanto 120 Mbps nas redes LTE. Teoricamente, o 4G tem potencial ainda para atingir velocidades de até 300 Mbps.

As redes 5G encontram-se em fase final de testes, mas já se prevê que utilizarão um agrupamento mais denso de antenas menores, devendo oferecer taxas de transmissão até cem vezes maiores do que as fornecidas pelas atuais redes 4G. A mudança para essas novas redes promete permitir novos serviços móveis, pois os padrões 5G deverão fornecer não apenas dados mais rápidos, mas também deverão auxiliar na disseminação da Internet das coisas, conectando carros, máquinas, cargas e demais dispositivos.

As redes celulares em geral, principalmente as 5G, que já têm previsão de serem embarcadas em VANTs, podem ser de grande auxílio em cenários de emergência de-

vido ao seu grande alcance e ampla disseminação. Contudo, a infraestrutura na qual se apoiam para seu funcionamento pode colapsar em função da ocorrência de uma determinada emergência. Além disso, as rede 5G ainda apresentam funcionamento inconstante e pouco confiável ao serem usadas em dispositivos com mobilidade tão dinâmica quanto os VANTs, conforme (Lin et al., 2018) e (Stanczak et al., 2018).

3.2 Redes LPWANs

As redes de baixa potência e longo alcance, ou LPWANs (*Low Power Wide Area Networks*), são um tipo de rede relativamente novo e que surgiu em função das demandas específicas da Internet das coisas. Normalmente possuem baixa taxa de transmissão compensada por uma grande área de cobertura. Uma das tecnologias LPWAN mais conhecidas e disseminadas ultimamente, em grande parte devido à facilidade com que se encontram dispositivos para desenvolvimento no mercado, é a LoRa (*Long Range Radio*).

Uma das características principais do LoRa é o longo alcance, estimado em cerca de 3 km para condições de uso urbano. Em área aberta, foi sido registrado um recorde de 700 km utilizando apenas 25 mW de potência. O baixo consumo de energia desses dispositivos é, portanto, outro fator relevante. De fato, estima-se que as baterias possam ter vida útil de até 10 anos.

Essa tecnologia foi patenteada pela empresa norte americana Semtech, porém a IBM e outras empresas, como Cisco, Orange e Flashnet, são patrocinadoras da LoRa Alliance. Trata-se de uma associação sem fins lucrativos que tem como missão padronizar a tecnologia LoRa por meio da especificação LoRaWAN (Lora, 2019).

O protocolo LoRaWAN fornece requisitos básicos para seu uso em IoT, tais como comunicação bidirecional segura, mobilidade e serviços de localização, reduzindo bastante a complexidade para a implementação de uma rede desta natureza. A topologia de uma rede LoRa é formada basicamente por um ou mais sensores conectados a um dispositivo LoRa para transmissão dos dados capturados pelos sensores. Esses dados são recebidos por um gateway LoRa, que os envia a outros gateways similares até que eles cheguem a um servidor central. Esse servidor gerencia toda a rede e se comunica com a Internet através de uma rede convencional.

De um modo geral, devem ser consideradas a taxa de transmissão de dados, o tamanho das mensagens a serem transmitidas e a área de cobertura pretendida quando do uso dessas

redes. Ou seja, as redes LoRa podem ser uma alternativa para atender regiões onde as redes celulares não têm alcance, ou até mesmo cobrir áreas densamente povoadas, tudo dependendo da aplicação pretendida.

Em cenários de emergência, podem se apresentar como solução de baixo custo e rápida implementação para sinalização e sensoriamento de áreas críticas, ou localização de equipes ou vítimas, principalmente quando o cenário se apresenta bastante esparso. Embora sua taxa de transmissão seja baixa, uma mensagem contendo informações de localização não demanda mais do que uma dezena de bytes. Contudo, esta tecnologia pode ser um limitante para aplicações envolvendo transmissão de vídeos, por exemplo.

3.3 Redes sem fio padrão IEEE 802

O Padrão 802 representa um grupo de normas definido pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos, IEEE, criado com o objetivo de padronizar as redes locais e metropolitanas nas camadas física e de enlace do modelo OSI. Dentre os diversos padrões criados, são de interesse para este trabalho aqueles destinados para redes sem fio, mais conhecidos pelas normas 802.11, 802.15 e 802.16. Dentre esses, o padrão mais utilizado é o 802.11, popularmente conhecido como WiFi e destinadas às chamadas WLANs (*Wireless Local Area Networks*), ou redes locais sem fio.

Com relação ao padrão IEEE 802.15, seu foco é na padronização das camadas inferiores das chamadas WPANs (*Wireless Personal Area Networks*), ou seja, redes sem fio voltadas para a interconexão de dispositivos “pessoais”. Como exemplos, temos o 802.12.1, conhecido como Bluetooth, e o 802.15.4, conhecido como ZigBee. Ambos focam no baixo custo e na comunicação de baixa velocidade entre dispositivos de menor valor agregado e baixa taxa de troca de mensagens. A ênfase, portanto, está na comunicação de custo muito baixo de dispositivos próximos, com pouca ou nenhuma infraestrutura adicional, objetivando diminuir ao máximo o consumo de energia. Os dispositivos Zigbee básicos, por exemplo, apresentam alcances da ordem de 10 metros com uma taxa de transmissão de até 250 kbps. Algumas melhorias podem ser feitas, como por exemplo o uso de antenas maiores ou até direcionais, em detrimento de antenas impressas nas próprias placas dos dispositivos, possibilitando alcances maiores, da ordem de 100 m e até 1 km.

O padrão IEEE 802.16, popularmente conhecido como WiMAX, foi finalizado em outubro de 2001 e publicado em abril de 2002. Esse padrão especifica uma interface sem fio para redes metropolitanas, as chamadas WMANs (*Wireless Metropolitan Area Networks*). O nome WiMAX vem de *Worldwide Interoperability for Microwave Access* e seu obje-

tivo é promover a compatibilidade e interoperabilidade entre equipamentos baseados no padrão IEEE 802.16. Trata-se de um padrão muito similar ao padrão IEEE 802.11, já bastante difundido, porém agregando novos recursos que visam melhorar o desempenho da comunicação, permitindo velocidades maiores que 1 Gbps. Tem como objetivo estabelecer a parte final da infraestrutura de conexão de dados de banda larga, oferecendo conectividade para uso doméstico, empresarial e em *hotspots*. O WiMAX, para atender áreas metropolitanas, demanda uma infraestrutura similar a de uma rede celular, com um equipamento central ligado a uma infraestrutura de rede cabeada, cuja antena é geralmente formada por uma combinação de antenas setoriais para permitir um acesso do tipo ponto-multiponto.

Dadas as diversas características dos padrões IEEE 802 para redes sem fio, aquele que se mostra mais promissor para uso nos VANTs que vão atuar como nós móveis em uma rede de apoio a cenários de emergência é o 802.11, conforme (Hayat, Yanmaz, & Bettstetter, 2015), (Hayat et al., 2016) e (Shi et al., 2018).

3.3.1 O padrão IEEE 802.11

A tecnologia conhecida por WiFi é normatizada pelo padrão IEEE 802.11, que descreve as características dos protocolos envolvidos para o estabelecimento de uma WLAN, indo desde a parte física até os mecanismos de segurança do padrão. Geralmente, seu uso se dá no chamado “modo infraestruturado”. Esse modo consiste de um roteador sem fio, ligado a infraestrutura cabeada, e funcionando de ponto de acesso para os demais dispositivos sem fio. Entretanto, é muito comum também esse padrão ser usado no chamado “modo ad-hoc”, no qual os dispositivos sem fio se conectam uns com os outros sem a necessidade de um ponto de acesso. As interligações sem fio no modo ad-hoc são abordadas na Seção 3.4.

A seguir, tem-se uma breve descrição dos principais subpadrões relativos às camadas física e de enlace do IEEE 802.11:

IEEE 802.11a – Este padrão, lançado em 1999, utiliza a técnica de modulação *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* (OFDM) como mecanismo de transmissão na camada física e opera na faixa de 5 GHz. Sua taxa de transmissão pode chegar a 54 Mbps. Como principal vantagem desse padrão, podemos citar a menor probabilidade de interferência, uma vez que essa faixa de frequência é bem menos congestionada do que a faixa de 2,4 GHz, normalmente usada pelos demais subpadrões do 802.11. Ambas as faixas (2,4 e 5 GHz) são conhecidas pela denominação ISM, ou *Industrial, Scientific, Medical*. Não há interoperabilidade do 802.11a com equipamentos dos padrões 802.11b e 802.11g devido

às diferentes faixas de frequência de 2,4GHz e à incompatibilidade entre suas técnicas de modulação.

IEEE 802.11b – Padrão que utiliza a técnica de modulação *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS) e opera na faixa de frequência de 2,4 GHz, que também faz parte das faixas ISM. Pode atingir taxas de transmissão de até 11 Mbps, podendo diminuir essa velocidade para 5,5, 2 e 1 Mbps, em caso de dificuldades de conexão nas velocidades mais altas. A faixa ISM tem a grande vantagem de não necessitar de licença para sua utilização, barateando assim o uso de equipamentos que utilizem esta faixa. Em contrapartida, essa vantagem torna-se também uma desvantagem, pois diversos aparelhos utilizam essas faixas, em especial a de 2,4 GHz (por exemplo, telefones sem fio e fornos de microondas), contribuindo para o aumento de ruído e poluição dessa parte do espectro eletromagnético.

IEEE 802.11g – Lançado em 2003, este padrão tornou-se rapidamente o substituto do padrão IEEE 802.11b por possuir taxas de transmissão muito maiores. Permite uma interoperabilidade com equipamentos dos subpadrões mais antigos, possibilitando uma migração gradativa para o novo padrão. O IEEE 802.11g utiliza a técnica de modulação OFDM operando a taxas de que podem variar de 54 para 48, 36, 24, 18, 12, 9 e 6 Mbps, caso seja necessário. Para compatibilidade com dispositivos do padrão IEEE 802.11b, trabalha também com a técnica de modulação DSSS, passando a atuar nesse modo como um dispositivo IEEE 802.11b com taxa de transmissão máxima de 11 Mbps.

IEEE 802.11n – Padrão finalizado em outubro de 2009 que permite taxas de transmissão de até 600 Mbps com a utilização de MIMO (*Multiple-Input and Multiple-output*) e canais com largura de 40 MHz. MIMO é uma tecnologia que usa múltiplas antenas para enviar mais informação do que seria possível utilizando apenas uma antena, utilizando para tal uma técnica de multiplexação por divisão espacial. Esta técnica aproveita-se das características de reflexão dos sinais de rádio frequência (RF), os quais, saindo de antenas diferentes, percorrem caminhos diferentes do transmissor até o receptor ao refletirem em diversos obstáculos.

IEEE 802.11p – Este padrão é um adendo ao padrão 802.11 que visa permitir o acesso a redes sem fio veiculares, para isso definindo adequações ao padrão original. Essa norma de comunicação sem fio para ambientes veiculares foi desenvolvida baseada na norma IEEE 802.11a, utilizando inclusive a mesma faixa de frequência ISM de 5 GHz. Contudo, uma vez que os ambientes veiculares são mais complexos e degradam mais a qualidade do sinal em virtude de diversos fatores, tais como alta mobilidade, fontes de interferência e obstáculos para o sinal de rádio, a quantidade de bits por pacote que pode ser transmitida se torna muito menor para esta norma.

IEEE 802.11s - É especificado para conectar dispositivos sem fio no modo *mesh*. Nessa arquitetura, encontramos roteadores sem fio que, ao se comunicarem uns com os outros, formam um *backbone* sem fio para prover conectividade aos dispositivos conectados a esses roteadores. Uma vez que não existe mobilidade constante dos roteadores neste tipo de rede, eles podem contar com melhores recursos de fornecimento de energia. Desta forma, o *backbone* da rede assim estabelecida pode manter-se fornecendo conectividade aos nós clientes de forma constante (Abelem et al., 2007). Suas características permitem que *backbones* sem fio sejam criados muito rapidamente para prover conectividade, como sugere o projeto reMESH (Saade et al., 2007), onde roteadores sem fio são instalados nos topos de prédios formando uma malha sem fio para conexão à internet.

IEEE 802.11ac/802.11ad - Estes subpadrões, a exemplo do padrão 802.11a, opera na faixa de 5 GHz, onde existe menos interferência, e conseguem atingir taxas nominais maiores que 1 Gbps. Uma grande vantagem dos subpadrões ac/ad é a possibilidade de diversos aparelhos conectados ao roteador trocarem dados de forma simultânea, sem qualquer interrupção por disputa de canal, algo que não ocorria nos demais subpadrões.

3.4 Redes *ad hoc*

As redes *ad hoc* são um tipo de rede sem fio que não precisa de uma infraestrutura para seu funcionamento. Desta forma, os nós comunicam-se diretamente entre si. Uma vez que não existe um elemento central controlando o acesso ao meio, os nós precisam estar ao alcance um do outro para que possam se comunicar, ou ainda, que exista um nó intermediário que possa encaminhar a mensagem entre um nó e outro (Hoebeke, Moerman, Dhoedt, & Demeester, 2006).

Sendo assim, as mensagens na rede trafegam de nó em nó até que chegue ao nó de destino. Porém, devido à natureza dinâmica com que os nós se apresentam nessa rede, imprimindo mudanças súbitas e rápidas na topologia desse tipo de rede, existem problemas de roteamento que dificultam a entrega de mensagens, em alguns casos. Por exemplo, se o nó de destino sair do alcance do nó intermediário e não existir nenhum outro nó intermediário que possa encaminhar a mensagem, esta mensagem provavelmente será perdida e jamais será entregue a seu destinatário (dos Santos, Mota, & Neto, 2008).

Portanto, protocolos de roteamento poderão ter dificuldades para entregar mensagens numa rede ad-hoc devido à mobilidade dos nós que causam mudanças na topologia da rede. Além disso, a conexão sem fio entre os nós, mesmo que estejam ao alcance um do outro, também pode causar problemas ao roteamento de mensagens. Isso porque,

embora a mensagem possa ser recebida diretamente de um nó, não existem garantias de que este nó irá receber, sem maiores problemas, uma mensagem a ele enviada caso existam obstáculos ou interferências no caminho.

Um outro problema refere-se a rotas ou caminhos alternativos. Em uma rede cabeada, essas rotas contam com alguma previsibilidade, visto que, de uma forma geral, ao serem estabelecidas, estas rotas passam a fazer parte da rede como um todo e raramente são alteradas. Nas redes *ad hoc* a alteração dessas rotas alternativas ocorre de forma mais dinâmica, devido principalmente à mobilidade dos nós e de suas limitações de energia. Redes *ad hoc* com suporte a mobilidade são denominadas redes móveis *ad hoc* (*Mobile Ad hoc Networks*), ou simplesmente MANETs. Devido a esses desafios, protocolos de roteamento com características específicas, como por exemplo, a capacidade de lidar rapidamente com uma mudança na topologia da rede, são necessários para que as MANETs operem de forma satisfatória.

3.5 MANETs

Conforme visto anteriormente, as redes *ad hoc* móveis, ou MANETs, são um tipo de rede de comunicação de dados na qual os nós que a compõem possuem mobilidade e comunicam-se entre si através de enlaces de conexão sem fio, independentemente de qualquer ponto infraestruturado para conectá-los (Agrawal & Zeng, 2015). Nas MANETs cada dispositivo ou nó da rede atua como dispositivo terminal, capaz de enviar e receber dados da rede, além de atuar também como um roteador que encaminha as mensagens de dados para outros dispositivos que estejam dentro do raio de alcance de seu rádio. Uma vez que elementos de infraestrutura não são necessários para seu funcionamento, as MANETs podem ser uma ótima alternativa onde e quando elementos de infraestrutura não possam ser instalados, como ocorre em cenários de emergência.

A ausência de infraestrutura, no entanto, traz alguns problemas para as MANETs, que por isso necessitam de protocolos de roteamento mais adequados ao seu modo de funcionamento. Por outro lado, ao permitir uma maior mobilidade dos nós, as MANETs apresentam uma série de vantagens difíceis de serem conseguidas por redes que necessitam de toda uma infraestrutura para operar. Podemos então elencar algumas dessas vantagens:

- **Organização autônoma:** Uma vez que essas redes não precisam de elementos infraestruturados para funcionar, elas podem ser implementadas de forma bastante

rápida. Para que isso seja possível, a rede deve ser capaz de adotar certas configurações, tais como endereçamento dos nós, roteamento e controle de energia de forma automática.

- **Robustez:** Cada nó da rede age como receptor, emissor ou intermediário de uma mensagem. Desta forma, em um cenário de desastre onde a infraestrutura convencional possa ter sido comprometida, a rede continuaria operando enquanto existirem nós aptos a desempenhar suas funções na rede.
- **Topologia dinâmica:** Uma vez que os nós desse tipo de rede são móveis, a topologia da rede pode ser alterada de forma bastante dinâmica, inclusive com nós entrando e saindo da rede a qualquer momento.

Como desvantagens das MANETs, podemos citar:

- **Consumo de energia:** Em sua maioria os nós de uma MANETs são nós móveis e, portanto, fazem uso de alguma fonte de energia limitada, como baterias. Um dos problemas, portanto, é justamente gerir de forma adequada o consumo de energia.
- **Problemas de roteamento:** Os protocolos de roteamento de MANETs assumem que a rede possui conectividade fim-a-fim. Porém, devido aos padrões de mobilidade dos nós, pode ocorrer o particionamento da rede. Isto significa que parte da rede pode ficar desconectada por períodos de tempo indeterminados e variáveis, o que pode causar problemas para o roteamento de mensagens até o destino.
- **Segurança:** As MANETs sofrem dos mesmos problemas de segurança das redes sem fio em geral, pois como as mensagens trafegam sem qualquer confinamento, diferentemente das redes cabeadas, qualquer nó que esteja ao alcance de outro pode interceptar as mensagens transmitidas por este.

Um tipo especial de MANET são as redes *ad hoc* veiculares, ou VANETS (*Vehicular Ad hoc Networks*), onde os nós que formam a estrutura da rede representam veículos em movimento num cenário urbano ou de rodovia (Yousefi et al., 2006; Zeadally, Hunt, Chen, Irwin, & Hassan, 2012). As VANETS, apesar de terem características semelhantes às MANETS, possuem seus próprios desafios e limitações para operação. Seus nós, em grande parte, são representados por veículos que podem ter um padrão de mobilidade definido pelas estradas e vias pelas quais transitam. No entanto, sua velocidade de deslocamento pode variar, o que traz alguns desafios aos protocolos de roteamento utilizados.

Similar às VANETs, temos uma outra classe de redes *ad hoc* veiculares móveis que apresentam uma mobilidade maior ainda, representada pelas redes *ad hoc* aéreas, ou FANETs (*Flying Ad hoc Networks*), onde seus nós representam VANTs. A extrema mobilidade dos VANTs, por se deslocarem pelo ar, trazem ainda mais desafios para o funcionamento desse tipo de rede (Bekmezci, Sahingoz, & Temel, 2013b; Sahingoz, 2014).

3.5.1 FANETs

A utilização de vários VANTs conectados de modo a formarem uma rede do tipo *ad hoc* surge como uma nova classe de rede, capaz de lidar com o desafio de manter conectados esses nós de alta mobilidade. Essa nova classe pode ser considerada uma subclasse das VANETs e estaria situada em uma outra subclasse, a das redes aéreas.

As FANETS são, então, um tipo de rede *ad-hoc* onde os principais nós da rede são constituídos por veículos aéreos. A maioria dessas redes utilizam VANTs, tais como balões, aviões e helicópteros (Austin, 2011), devido ao seu menor custo total de operação e facilidade de manuseio. Existem também algumas propostas que utilizam essas aeronaves como elementos de uma camada secundária, recebendo e enviando dados para outras aeronaves tripuladas ou satélites (Palazzi et al., 2004).

Embora as FANETS sejam uma variação das MANETS, em seu contexto mais amplo, essas redes possuem algumas vantagens quando comparadas com outros tipo de MANETS, como as VANETS. Dentre elas:

- A liberdade de movimentos conseguida pelos nós de uma FANET é muito maior do que a de outras MANETs. Via de regra, os nós das FANETs têm o céu inteiro para se moverem enquanto os nós de outras MANETS estão presos ao solo e, em muitos casos, a caminhos e trilhas pré-determinadas.
- Devido à sua peculiar característica de ser formada por nós voadores, distâncias maiores podem ser alcançadas por esses nós em menos tempo, possibilitando a cobertura de grandes áreas onde não haja caminhos por terra ou que estejam bloqueados.
- O uso de VANTs de dimensões reduzidas e baixo custo permite a rápida criação de uma rede de emergência, além de reduzir drasticamente os custos envolvidos (Bürkle, Segor, & Kollmann, 2011).

Embora as FANETs apresentem-se como redes bastante versáteis, essa versatilidade e flexibilidade trazida por sua grande mobilidade traz também alguns desafios. Dentre eles:

- Alguns tipos de VANTs alcançam velocidades entre 30 e 400 km/h, e essa grande velocidade de deslocamento de nós acarreta em grandes desafios para os protocolos de roteamento, que precisam adequar-se muito rapidamente às rápidas alterações topológicas que ocorrem na rede.
- As grandes distâncias alcançadas pelos nós apresentam outro desafio às comunicações, necessitando assim de métodos para aumentar o alcance das comunicações sem contudo aumentar em demasiado o consumo de energia. Em VANTs menores, essa gerência de energia é ainda mais crítica (Chakrabarty & Langelaan, 2009).
- A carga máxima que um VANT pode transportar, seu *payload*, é outro fator crítico e determinará o tipo e a quantidade de sensores e equipamentos que poderão ser utilizados.

De acordo com as características aqui apresentadas, é correto supor que as FANETs podem ser uma boa opção de escolha como tipo de arquitetura de rede sem fio para utilização em cenários de emergência. Elas podem ser rapidamente disponibilizadas e, como os nós que a compõem tendem a possuir grande mobilidade, elas podem acompanhar as constantes mudanças que ocorrem em cenários de desastre. Porém, em um cenário de catástrofe ou de desastre, os nós podem entrar e sair da rede muito rapidamente, podendo chegar a ficar horas fora de alcance. Por conta disso, devido aos protocolos de roteamento e entrega de mensagens usados nas FANETs, esse nós podem nunca receber as mensagens a eles endereçadas em caso de desconectividades intermitentes ou por períodos relativamente grandes. Em um cenário de emergência onde as informações podem representar a diferença entre a vida e a morte de uma ou várias pessoas, não é interessante que essas informações sejam perdidas, mesmo que necessitem de um tempo maior para serem entregues. Sendo assim, pode ser que as FANETs, por si só, não sejam a escolha mais adequada para determinados cenários de emergência.

3.6 Redes tolerantes a atrasos e interrupções (DTNs)

A partir do momento que a rede como um todo não se utiliza de qualquer infraestrutura, todos os nós na rede passam a depender mutuamente uns dos outros para que as mensagens possam fluir de sua origem até o seu destinatário final. Caso essa rede seja constituída por nós móveis, em um dado momento pode ocorrer que uma mensagem seja encaminhada com destino a um nó que esteja fora do alcance de qualquer outro nó na rede. Situação similar também pode ocorrer quando um nó **A**, que por qualquer motivo

não pode mais ser alcançado por outros nós da rede, é o único capaz de alcançar um determinado subconjunto **S** de nós da rede. Assim, o subconjunto **S** estará desconectado do restante da rede até que o nó **A** volte a um estado que possa novamente servir de caminho entre essas duas partes. Nesses dois casos, a rede encontra-se particionada ou dividida em regiões, inviabilizando um caminho fim-a-fim entre os nós de uma região com os da outra. A ausência dessa conectividade fim-a-fim entre a origem e o destino de uma determinada mensagem inviabiliza o uso de protocolos voltados para MANETs ou FANETs.

Numa situação geral de alta mobilidade de nós, é impraticável prever quando haverá ou não interrupção da conectividade de parte desses nós, problema para o qual as redes convencionais, ou mesmo as *ad hocs*, não possuem mecanismos que consigam tratar. Essa mesma mobilidade, no entanto, pode promover contatos oportunistas entre nós de regiões diferentes que podem ser explorados, conforme forem ocorrendo, para o encaminhamento de mensagens.

Para essas situações, as redes oportunísticas, ou redes tolerantes a atraso e interrupções (*Delay* ou *Disruption Tolerant Network*), surgem como um tipo de rede que não necessita que exista um caminho ou rota fim-a-fim para a entrega de mensagens. Essas redes aproveitam-se de contatos oportunistas para tentar prover conectividade, mesmo que com atrasos ou interrupções, a outros nós que, de outra forma, estariam completamente isolados ou desconectados do restante da rede. As DTN utilizam-se de uma técnica denominada armazena-transporta-encaminha (*store-carry-forward*) onde os nós da rede podem armazenar a mensagem, transportando-a até que esta possa ser entregue ao seu destinatário ou encaminhada para outro nó intermediário com o mesmo objetivo.

Para implementar esse mecanismo de armazena-transporta-encaminha nos nós, uma nova camada na pilha de protocolos denominada *bundle* é prevista. Como pode ser visto na Figura 3.1, esta nova camada se situa acima da camada de transporte e abaixo da camada de aplicação. Ou seja, ela atua diretamente no modo como os pacotes de dados são transportados de um nó para outro, e especialmente entre nós que estejam em diferentes regiões DTN. Considera-se uma região DTN como sendo aquela na qual seus nós conseguem se comunicar diretamente uns com os outros, por meio sem fio, sem a necessidade de um elemento fazendo *store-carry-forward* entre eles.

Nas DTNs, cada nó pode agir como um *host*, um roteador ou um *gateway*. Quando o nó se comporta como um roteador, a camada *bundle* pode armazenar, carregar e encaminhar pacotes inteiros de dados ou fragmentos destes entre nós de uma mesma região. Entretanto, quando o nó se comporta como um *gateway*, a mesma camada *bundle* pode transferir pacotes ou fragmentos de pacotes de uma região para outra.

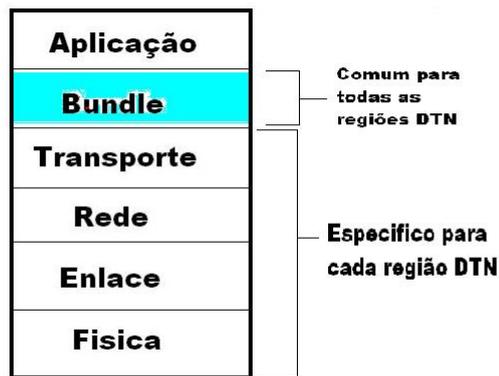


Figura 3.1: Pilha de protocolos.

Um nó que receba uma mensagem para ser entregue a outro nó, manterá esta mensagem armazenada até que esta possa ser entregue ao nó de destino ou a outro nó intermediário. Esses nós intermediários são também chamados de nós custodiantes, pois mantêm a custódia da mensagem até que esta possa ser encaminhada a outro nó. Após um determinado período de tempo, as mensagens obsoletas que tenham conseguido ser entregues, ou não, podem ser descartadas pelos nós custodiantes.

Os protocolos convencionais de redes *ad hoc*, focados em situações onde os nós agem como roteadores, falham ao estabelecer rotas em redes DTN. Isso acontece principalmente porque os protocolos de roteamento padrão trabalham selecionando caminhos que levem ao nó de destino, dentre várias opções conhecidas. Já nas redes DTN, esses protocolos buscam a maior eficiência possível no encaminhamento de mensagens a nós de destinos para os quais sequer se conhece caminho. Portanto, as redes DTN precisam de protocolos específicos para o seu modo de funcionamento.

Os protocolos para rede DTN podem ser classificados de acordo com a metodologia utilizada para encontrar os destinos das mensagens. Uma dessas metodologias é a baseada em réplicas. Protocolos baseados em réplica possuem melhor taxa de entrega de mensagens do que protocolos baseados em encaminhamento. Eles funcionam criando várias réplicas dos pacotes na rede, com cada nó mantendo uma cópia de cada mensagem e as retransmitindo quando há conectividade com certos nós. Esses protocolos também são conhecidos como baseados em *flooding*.

Protocolos baseados em encaminhamento, em contraste com os de réplica, se valem de escolhas para o envio ou não das mensagens. A cada encaminhamento, o nó que recebe a mensagem a armazena e decide se deve encaminhá-la para um nó vizinho ou aguardar que um outro nó mais adequado esteja novamente ao alcance. Essas decisões costumam ser baseadas em uma série de parâmetros que buscam descrever as sequências

de encaminhamentos de uma mensagem até seu destino e o histórico de conectividade dos nós. Exemplos desse tipo de protocolo são o DTLSR e o SABR (Demmer & Fall, 2007) e (Ali, Qadir, & Baig, 2010).

A utilização da metodologia baseada em réplicas aumenta a probabilidade de entrega das mensagens ao destino, o que é desejável numa aplicação voltada para cenários de emergência. Entretanto, essa é uma abordagem que consome muitos recursos da rede. Neste trabalho serão usados protocolos que se valem dessa técnica, descritos abaixo:

- ***Epidemic*** (Vahdat & Becker, 2000):

Este protocolo dissemina cópias das mensagens por toda a rede, ou seja, um nó que carregue uma mensagem a transmite para todos os nós que encontrar no caminho até que o tempo de vida da mensagem se expire ou até que ela seja diretamente entregue ao nó de destino final. Portanto, todos os nós da rede podem estar transportando a mensagem. Cada nó, ao encontrar com o outro nó da rede, apenas troca as mensagens que esse outro nó não possui em seu *buffer* de memória. Trata-se, portanto, de uma técnica que possui alta sobrecarga de mensagens na rede.

- ***Maxprop*** (Burgess, Gallagher, Jensen, & Levine, 2006):

Este protocolo foi desenvolvido na universidade de Massachusetts e define uma ordem de prioridade na fila dos pacotes. Os pacotes que precisam ser descartados e aqueles que precisam ser transmitidos são então classificados de acordo com essa prioridade. A prioridade dos pacotes é baseada na probabilidade de entrega ao nó de destino, obtida conforme dados históricos e outros mecanismos auxiliares, tais como uma lista de nós intermediários. Notificações de recebimento e novos pacotes são priorizados em detrimento de pacotes mais antigos.

Diversos métodos podem ser utilizados para definir essa prioridade, incluindo a taxa de sucesso em definir um determinado nó intermediário como caminho para um nó de destino, ou a quantidade de tentativas bem sucedidas de entrega de mensagem de um determinado nó para outro. Essa técnica melhora, de maneira geral, a taxa de entrega de mensagens e diminui o número de réplicas na rede.

- ***Spray and Wait*** (Spyropoulos, Psounis, & Raghavendra, 2005):

Este protocolo combina a rapidez do roteamento *Epidemic* com a simplicidade da entrega direta. De forma a utilizar eficientemente os recursos da rede, este protocolo define um limite N para o número de cópias das mensagens sendo duplicadas na rede. Opera em duas fases distintas: a fase disseminar (*spray*) e a fase de espera (*wait*). Junto com cada mensagem transmitida, é enviado o indicador do número

máximo de cópias desta mensagem. Durante a fase disseminar, N cópias são disseminadas na rede de forma epidêmica. N é escolhido de maneira a representar um número suficiente de cópias a serem disseminadas na rede para garantir que pelo menos uma delas irá chegar ao destino de forma rápida. Após encerrada essa fase, os nós que receberem uma cópia da mensagem a mantêm armazenada e passam para a fase de espera, na qual cada nó carregando uma cópia da mensagem só a entregará de forma direta.

Limitando-se o número de cópias das mensagens, a sobrecarga na rede tende a ser bastante reduzida. No entanto, uma restrição excessiva do número de réplicas na rede pode resultar na redução da probabilidade de entrega de uma mensagem, caso esse número restrito de cópias sejam entregues a nós que nunca irão encontrar o nó de destino.

- ***Prophet*** (Lindgren, Doria, & Schelen, 2003):

Este protocolo parte da premissa de que o encontro dos nós de uma rede raramente são totalmente aleatórios. Operando de forma probabilística, este protocolo estima uma métrica probabilística chamada previsão de entrega. Essa métrica indica a probabilidade de sucesso em entregar uma mensagem a um determinado nó de destino a partir de um outro nó de origem.

No protocolo *Prophet*, quando dois nós se encontram, eles trocam um vetor de informação contendo uma previsão probabilística de entrega. Teoricamente, se dois nós se encontram frequentemente eles têm alta probabilidade de entrega entre eles. Entretanto, se um determinado par de nós não se encontram por um longo tempo, eles não são bons para encaminhar mensagem entre eles, ou seja, a probabilidade de entrega entre eles tende a ser menor. A partir desse vetor contendo a probabilidade dos encontros, mensagens são encaminhadas somente para os nós que têm maior probabilidade de encontrar com o nó de destino. Trata-se de uma abordagem que se assemelha a dos protocolos baseados em encaminhamento. Em função desse comportamento, este protocolo consegue diminuir a inundação de pacotes de mensagens na rede e, conseqüentemente, diminuir o consumo de recursos, como o *buffer* de mensagens nos nós e a banda utilizada.

Por suas características de tolerar desconexões e atrasos, as DTNs podem ser utilizadas com vantagens se comparadas com as redes *ad hoc* e *mesh* em cenários de desastre. Essa arquitetura poderia ser utilizada não só para enviar mensagens com informações de evacuação para os civis que ainda se encontrem nas áreas atingidas, mas também para enviar mensagens desses civis para as equipes de resgate e para o centro de controle de

operações, contendo informações sobre suas localizações e condições físicas (de Albuquerque et al., 2014; Martín Campillo et al., 2012). Da mesma forma, essa arquitetura possibilita a troca de mensagens entre o centro de controle e as equipes de resgate, possibilitando uma coordenação mais dinâmica dessas equipes. Em função disso, propõe-se aqui que sejam utilizados VANTs no papel de nós móveis dessa rede. Forma-se, assim, uma variante das FANETS que passaria a operar de forma oportunística em função dos protocolos de DTN utilizados.

4. Planejamento das Rotas de Voo dos VANTs

Por definição, o conceito de planejamento consiste no ato ou efeito de elaborar um plano para um trabalho ou objetivo de forma sistemática (Michaelis, 2019). Sendo assim, realizar um planejamento de rota envolve a elaboração de um plano cujo objetivo é o de traçar um caminho entre um ponto de origem e um ou mais pontos de destino. Conhecendo-se a rota a ser percorrida, é possível um melhor aproveitamento dos recursos disponíveis, tais como combustível e quantidade de veículos a serem utilizados. Pode-se, inclusive, utilizar a quantidade disponível de um dado recurso como parâmetro para o planejamento de rotas ou para o estudo de viabilidade das rotas planejadas.

Existem alguns fatores limitantes que devem ser considerados quando do planejamento de rotas para Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), conforme visto na Seção 2.4. Tratam-se de limitações que podem ser comuns a qualquer tipo de veículo, como é o caso da autonomia, a qual pode ser reduzida em função da carga transportada e velocidade de deslocamento. Há ainda outras mais específicas, como por exemplo a capacidade ou incapacidade de parar no ar, a depender do tipo de VANT, e o teto operacional de voo.

No caso deste trabalho, consideramos que o plano de rota é calculado levando-se em conta a autonomia do tipo de VANT utilizado, que é de cerca de duas horas. Além disso, considerou-se também sua necessidade de se manter constantemente em movimento, que é o caso dos VANTs do tipo asa voadora fixa, ou Zagi. A altitude de voo foi mantida a cerca de 100m em relação ao solo, o que permite simplificar o planejamento de rota ao se assumir que o VANT voa sobre uma mesma superfície 2D. Além disso, numa situação real, essa altitude garante que o VANT estará acima dos obstáculos mais comuns, como árvores e antenas.

Conforme já mencionado, o objetivo principal deste planejamento de rota é o de obter um plano de voo otimizado, ou seja, que permita a um ou mais VANTs percorrerem rotas que minimizem o tempo de comunicação entre os Pontos de Interesse e, em especial,

destes com o Centro de Comando e Controle, responsável pela coordenação das atividades de busca e resgate. Para tal, o problema *macro* foi modelado como sendo uma variante do problema do caixeiro viajante, também conhecido como *Travelling Salesman Problem*, ou TSP. As seções a seguir descreverão o TSP e suas abordagens de solução.

4.1 O Problema do caixeiro viajante (TSP)

O problema do caixeiro viajante (*Travelling Salesman Problem*, ou TSP) é um dos problemas de maior relevância na literatura, com diversos estudos e trabalhos já publicados (Dorigo, Maniezzo, & Colormi, 1996; Reinelt, 1991; Agatz et al., 2018; Lancia & Serafini, 2018). Envolve obter a melhor rota de forma que um *caixeiro*, partindo de sua cidade de origem, passe por todas as cidades que precisa visitar uma única vez e, por fim, retorne a sua cidade de origem. Trata-se, portanto, de um problema de otimização combinatoria que, apesar de parecer simples, possui solução difícil de ser encontrada, pois sua complexidade aumenta de forma exponencial conforme se aumenta o número de cidades.

O grande interesse por parte da comunidade acadêmica pelo TSP se deve, em parte, ao fato dele poder ser aplicado diretamente a inúmeros problemas reais, ou como sendo um subproblema desses. Como exemplo, podemos citar a otimização de rotas de entregas ou para a prestação de serviços de emergência, onde, nesses casos, procura-se minimizar a distância percorrida (ou o tempo de entrega) e o tempo de atendimento às vítimas, respectivamente.

Sob a ótica da complexidade computacional de algoritmos, um problema tem uma solução difícil, ou complexa, quando não se conhece um algoritmo de tempo polinomial para sua solução, conforme o número de entradas do problema. Desta forma, o tempo para se obter uma solução cresce exponencialmente conforme o tamanho do problema aumenta, e essa classe de problemas é denominada NP-difícil. Esse é o caso do TSP, segundo (Karp & Papadimitriou, 1982).

Uma forma de tratar computacionalmente o TSP é representando-o através de um grafo. Grafos são estruturas formadas por nós, ou vértices (V), e cada par de vértices é interligado por arestas (A). Assim, os grafos são então representados pela notação $G(V,A)$. Nos exemplos das Figuras 4.1 e 4.2, as arestas são representadas pela notação A_n e os vértices por V_n , onde $n=1,2,3,4$. Na Figura 4.1 é ilustrado um exemplo de grafo completo, pois existe uma aresta interligando todo e qualquer par de vértices que o compõe. Podemos observar também que cada uma de suas arestas (A_1 , A_2 , A_3 e A_4) possui um peso, ou medida, e grafos desse tipo são denominados ponderados, ou valorados. Além

disso, as arestas desse grafo permitem um caminho em ambos os sentidos, o que o torna um grafo não-direcionado. Uma vez que para cada par de vértices desse grafo existe um caminho reverso, ou seja, dados dois vértices A e B, existe um caminho de A para B e, de forma reversa, de B para A, esse é também considerado um grafo simétrico.

Um grafo simétrico, como o que é mostrado na Figura 4.1, obedecerá a premissa da desigualdade triangular se o custo da distância de V1 a V2, somado ao custo da distância de V2 a V3, for maior ou igual ao custo da distância de V1 a V3, conforme a Equação 4.1:

$$C_{a,b} + C_{b,c} \geq C_{a,c} \quad \forall a, b, c \in N \quad (4.1)$$

onde $C_{x,y}$ é o custo de distância da aresta que interliga os nós x e y.

Grafos simétricos que obedeçam a premissa da desigualdade triangular formam espaços métricos, sendo portanto chamados de grafos métricos. Um TSP modelado por um grafo métrico é considerado um TSP métrico (Arora, 1996).

A solução do TSP consiste em encontrar um ciclo hamiltoniano de menor custo no grafo que o representa. Um ciclo hamiltoniano em um grafo, conforme pode ser visto na Figura 4.2a, é um ciclo que contém todos os vértices do grafo, sendo que cada vértice aparece nesse ciclo uma única vez, exceto o vértice inicial, que também é o vértice final. Nesse caso, temos o ciclo V1, V2, V3 V4 e, por fim, V1 novamente. Com a simples mudança da aresta A2, conforme a Figura 4.2b, esse grafo deixa de ser hamiltoniano, pois, para realizar o ciclo, torna-se necessário passar duas vezes pelo vértice V4.

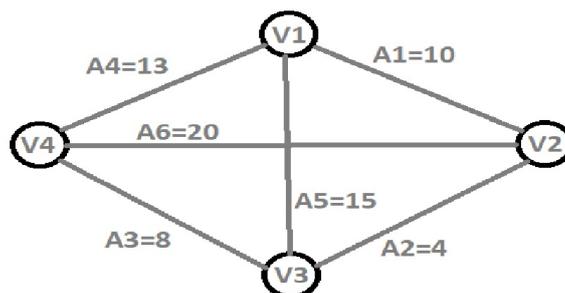


Figura 4.1: Grafo completo, ponderado, não direcionado e simétrico

Uma variação do TSP é o TSP com múltiplos caixeiros (m-TSP), em que mais de um caixeiro parte de uma mesma cidade. O objetivo, nesse caso, é que todas as cidades sejam visitadas uma única vez, mas por apenas um dos caixeiros. Apesar do TSP clássico ser bastante explorado no meio acadêmico, com inúmeras soluções apresentadas, o m-TSP tem uma quantidade mais modesta de propostas de solução. Em linhas gerais, essas soluções são as mesmas que as usadas para o TSP clássico, porém considerando um maior

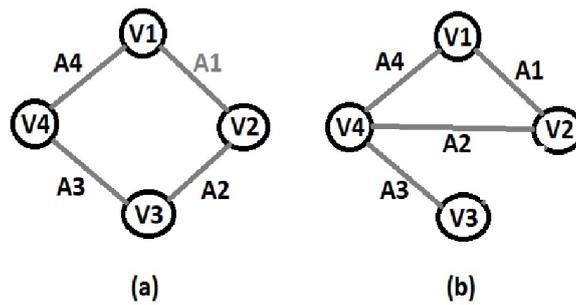


Figura 4.2: Grafo contendo ciclo hamiltoniano (a) e sem conter ciclo hamiltoniano (b)

número de restrições (Bektas, 2006a).

4.2 Algoritmos para solução do TSP

Conforme citado anteriormente, existem várias formas para se encontrar uma solução ótima de rota para o TSP, porém todas têm um custo computacional que cresce exponencialmente conforme o número de locais de visita aumenta. Dentre esses métodos, destaca-se o uso de programação linear inteira (PLI). No entanto, de forma a driblar esse problema do crescimento exponencial do custo computacional da solução conforme o tamanho do problema aumenta, é comum o uso de algoritmos e técnicas que fazem uso de heurísticas. O objetivo, nesse caso, é o de obter uma solução satisfatoriamente aproximada, mas que possa ser atingida num tempo muito menor, factível dentro de um contexto realista de aplicação da solução, mesmo quando o número de visitas é comparativamente grande.

A técnica de programação linear inteira (PLI) é uma abordagem que pode ser adotada para a solução do TSP, desde que o contexto do problema modelado como um TSP assim permita. A PLI equivale a um problema de programação linear (PL) no qual todas ou ao menos algumas das variáveis do problema são discretas, ou seja, assumem apenas valores inteiros. No caso de todas as variáveis de um determinado problema estarem aptas a essa condição de integralidade, tem-se uma variante do PLI denominada Programação Linear Inteira Pura. Em contrapartida, quando apenas algumas das variáveis estão aptas a essa condição, tem-se uma outra variante denominada de Programação Linear Inteira Mista (PLIM). (Lima, 2018)

Uma das primeiras e mais conhecidas forma de resolver o TSP está relacionada á formulação de Dantzig-Fulkerson-Johnson proposta por (B. Dantzig, R. Fulkerson, & M. Johnson, 1954), na qual criamos uma variável x_{ij} para cada aresta (i,j) pertencente ao grafo, indicando se esta aresta pertence ou não ao ciclo hamiltoniano de saída. Mais especificamente, o valor de x_{ij} é definido como:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{o ciclo vai do vértice } i \text{ ao vértice } j \\ 0 & \text{nos outros casos} \end{cases}$$

A expressão (4.2) descreve a função objetivo, que é definida como a minimização da soma dos custos associados para cada aresta (i, j) pertencente ao ciclo hamiltoniano. As restrições (4.3) e (4.4), que também são chamadas de restrições de atribuição, definem que o ciclo desejado deve partir e/ou retornar de/para cada um dos vértices. Por fim, a restrição (4.6) impede a formação de sub-ciclos entre os vértices não iniciais. Deve-se notar que esta formulação tem um número exponencial de restrições devido a (4.5).

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i, j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (4.2)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad j = 1, \dots, n \quad (4.3)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad i = 1, \dots, n \quad (4.4)$$

$$\sum_{i \in Q} \sum_{j \in Q} x_{ij} \leq |Q| - 1 \quad \forall Q \subseteq \{2, \dots, n\} \quad (4.5)$$

$$0 \leq x_{ij} \quad i, j = 1, \dots, n \quad (4.6)$$

Embora a PLI possa ser utilizada para a solução do caixeiro viajante em problemas com poucas cidades (locais de visita), sua aplicação torna-se extremamente custosa, ou até mesmo inviável, a medida que o número de cidades aumenta, pois o conjunto de soluções possíveis a serem exploradas é da ordem de $(n - 1)!$.

Algoritmos de aproximação para problemas de otimização são algoritmos executados em tempo polinomial que produzem uma solução cujo valor não será pior do que uma fração pré-determinada da solução ótima. Neste campo, a forma mais simples de resolver o TSP é, partindo-se de um vértice qualquer, visitar cada um dos outros vértices, escolhendo como próximo vértice a ser visitado aquele que ainda não tenha sido visitado e cuja aresta de ligação tenha o menor custo. Esse é basicamente o conceito por trás da heurística do vizinho mais próximo.

A heurística do vizinho mais próximo baseia-se em uma classe de algoritmos que utiliza um método denominado guloso (*greedy*). Neste caso, o critério guloso utilizado por essa heurística é o de sempre visitar a cidade mais próxima adjacente ao ponto em

que se está, marcando as cidades que já foram visitadas. Após visitar todas as cidades, tem-se uma trajetória definida que passa por todas as cidades apenas uma vez (Hurkens & Woeginger, 2004).

Embora essa heurística apresente resultados satisfatórios para problemas pequenos, uma vez que sua complexidade é da ordem de $O(n^2)$, o tempo necessário de execução para problemas maiores pode também vir a ser inviável. Além disso, outro ponto negativo dessa heurística é que nem sempre será possível obter a solução de menor custo possível para determinado problema. Isso porque, dependendo do vértice pelo qual se inicia a rota, eventualmente poderá ser adicionada uma aresta de maior custo que jamais seria utilizada, caso se iniciasse a rota por um outro vértice qualquer.

Uma outra abordagem para encontrar a rota de menor custo para o TSP é gerar algumas soluções, compará-las entre si e selecionar aquelas com melhor avaliação, isto é, com menores custos, para uma nova fase. Nessa nova fase, essas soluções serão modificadas visando melhorá-las, para que então um novo ciclo de comparação e seleção ocorra. Esse é o princípio básico dos algoritmos genéticos.

O que os algoritmos genéticos fazem é, de certa forma, imitar o processo de seleção natural presente na natureza, onde os mais aptos, ou aqueles com mais condições de sobreviver em um determinado ambiente, conseguem sobreviver tempo suficiente para gerar descendentes mais aptos ainda a sobreviverem. Na natureza, tal processo necessita de milhões de anos para se desenvolver, mas em um ambiente computacional, a depender do tamanho do problema, esse tempo se reduz para um valor que permita seu tratamento. Os algoritmos genéticos são, então, uma classe de algoritmos que atuam de forma similar à natureza, criando um processo de evolução a partir de uma população de soluções possíveis, gerada de forma aleatória. Cada solução candidata tem um peso indicativo de quão boa é tal solução e todas, ou parte dessas soluções, irão gerar descendentes ou mutações. Através da seleção das soluções candidatas mais aptas a gerar descendentes ou mutações, a qualidade das soluções aumenta (Liu & Zeng, 2009).

Outro processo oriundo da natureza que pode ser aplicado ao TSP é o das colônias de formigas. Na natureza, normalmente as formigas andam sem rumo em busca de alimentos. Porém, ao encontrarem alguma fonte de alimento, elas retornam para sua colônia marcando o caminho com uma trilha de feromônios. Isso permite que outras formigas, ao se depararem com esse rastro de feromônios, deixem de andar aleatoriamente e passem a seguir essa trilha, liberando também feromônios caso encontrem alimentos. Esses feromônios das trilhas tendem a evaporar com o tempo, o que implica em dizer que uma trilha com um maior fluxo de formigas e, provavelmente, mais alimentos, tende a levar

mais tempo para “desaparecer”, que é o que ocorre quando todos os feromônios lá depositados evaporam.

De forma análoga, baseando-se em uma trilha virtual de feromônios, a heurística de colônia de formigas tenta imitar o processo pelo qual as formigas procuram alimentos. As formigas virtuais deixam um rastro de feromônios ao explorar novas rotas e esses rastros guiam outras formigas por caminhos onde provavelmente existe uma rota viável. Assim, quanto mais formigas trilharem determinado caminho, maior será a probabilidade de existir uma rota viável a ser escolhida (Dorigo et al., 1996) e (Perez-Carabaza, Besada-Portas, Lopez-Orozco, & Jesus, 2018).

Outra heurística muito conhecida para o TSP métrico é o algoritmo de Christofides (Nilsson, 2003). Nesse método, criado pelo professor Nicos Christofides, cria-se uma árvore geradora mínima com todas as cidades a serem visitadas e cria-se um conjunto de vértices com grau ímpar. Esses dois grafos são então combinados para se criar um ciclo Euleriano. Um ciclo Euleriano corresponde a um ciclo onde cada aresta é visitada apenas uma vez, mas os vértices podem ser visitados mais vezes. Em seguida, removem-se os vértices repetidos, criando por fim um ciclo Hamiltoniano (Karp & Papadimitriou, 1982).

Desde quando o algoritmo de Christofides foi criado, em 1976, ainda não foi encontrado nenhum outro algoritmo que garanta uma solução para o TSP métrico que, no pior caso, forneça uma rota que será apenas uma vez e meia maior que a solução ótima - como, por exemplo, aquela que seria obtida através de PLI, desconsiderando-se sua limitação relacionada à complexidade de tempo de execução.

Dentre as várias heurísticas existentes para TSP, são frequentemente encontrados na literatura trabalhos adotando as heurísticas do vizinho mais próximo, de colônia de formigas e algoritmo genético, como em (Zhengxiang, Guocheng, & Jingen, 2015), (M. S. Uriti & Kumar, 2017) e (Mohammed et al., 2017). Por esse motivo, essas heurísticas foram selecionadas para serem utilizadas neste trabalho. Além delas, o algoritmo de Christofides foi também selecionado devido à sua característica de oferecer sempre uma solução que, no máximo, equivalerá a $3/2$ da solução ótima. (Harald, 2018).

4.3 Modelando o cenário de emergência como um TSP

Por definição deste trabalho, equipes que estejam em atuação no cenário afetado por uma emergência, assim como locais onde foram identificadas possíveis vítimas ou que demandem monitoramento, são aqui denominados de *Pontos de Interesse*, ou PoI. Os

PoIs, junto com o Centro de Comando e Controle (CC), são modelados como vértices do grafo que representa o cenário. As arestas, por sua vez, correspondem às possibilidades de voo direto (em linha reta) de um VANT entre dois vértices, sendo que o custo de uma aresta corresponderá à distância percorrida pelo VANT (ou ao tempo para percorrer essa distância) entre esses respectivos vértices. Uma vez que qualquer vértice pode ser alcançado diretamente, partindo o VANT de qualquer outro vértice, modela-se o cenário como um grafo completo, ponderado e simétrico. A Figura 4.3 ilustra essa modelagem.

Uma vez que o cenário é assim modelado, entende-se que o problema de encontrar uma rota de menor custo para que um único VANT sobrevoe todos os PoIs e o CC, no menor tempo possível, corresponde a um TSP. Cabe ressaltar que se parte da premissa de que o CC possui o conhecimento e a localização de todos os PoIs do cenário de interesse, o que lhe possibilita saber as distâncias envolvidas e os respectivos tempos de voo entre cada ponto, dado um modelo específico de VANT e as condições climáticas do local. Além disso, é também premissa do problema que os VANTs partem do CC e devem retornar a ele no mais breve tempo possível, de maneira a dinamizar a troca de informações e a permitir que o CC efetivamente coordene, em tempo real, as missões de busca e resgate.

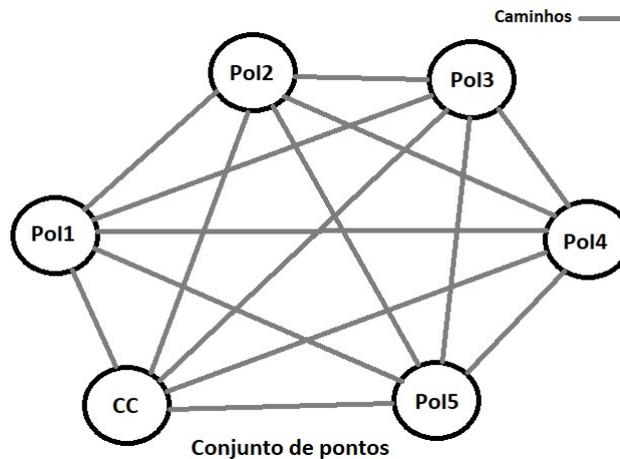


Figura 4.3: Grafo completo representativo do cenário.

4.4 Clusterização do cenário para o m-TSP

Embora os cenários de emergência, de um forma geral, costumem ser caracterizados por não mais do que uma dezena de PoIs, existem circunstâncias que podem elevar esse número rapidamente (Song, Zhang, Sekimoto, & Shibasaki, 2014; Gomes et al., 2016). Em função disso, o uso de múltiplos VANTs passa a ser uma alternativa interessante e, em certos casos, fundamental para se minimizar o tempo de comunicação entre o CC e as

equipes de resgate, ou para minimizar o tempo para que imagens e pequenos vídeos de monitoramento dos PoIs, obtidos a partir dos próprios VANTs, cheguem ao CC. Mesmo nos casos em que o número de PoIs é relativamente pequeno, o uso de múltiplos VANTs pode também contribuir para uma comunicação mais ágil, conforme a topologia do cenário e as distâncias envolvidas.

O problema de otimização de rotas para esses múltiplos VANTs, objetivando cobrir os múltiplos PoIs da maneira mais eficiente possível, equivale a resolver o TSP para múltiplos caixeiros viajantes (m-TSP). Uma das formas de resolver o m-TSP é transformá-lo em m TSPs clássicos e, então, aplicar uma das diversas heurísticas de solução do TSP clássico em cada um dos subproblemas resultantes. Isso pode ser atingido em duas fases, onde na primeira fase é utilizado um algoritmo de clusterização, a fim de dividir o m-TSP original, e na segunda fase aplicam-se os algoritmos de solução de TSP (Oliveira, 2015; Sofge, Schultz, & De Jong, 2002).

Portanto, uma forma de adaptar a solução baseada em TSP, restrita ao caso de haver um único VANT, para o uso de múltiplos VANTs, é dividir o cenário em regiões menores, ou *clusters*, conforme o número de VANTs disponíveis. Esta abordagem precisa ainda levar em consideração o funcionamento dos protocolos DTN, de maneira a explorar suas características de comunicação e transporte de dados. Em função disso, torna-se necessário que as regiões possuam alguma forma de contato entre elas para possibilitar a comunicação entre diferentes PoIs e ainda com o CC.

A idéia básica da clusterização é a de juntar objetos similares em grupos. Esse grupos, os clusters, reúnem então objetos que guardam alguma similaridade entre si, ao mesmo tempo em que guardam diferenças entre os elementos de outro cluster. Ou seja, toda clusterização é feita com o objetivo de ter um máximo de homogeneidade dentro de cada cluster, maximizando-se assim a heterogeneidade entre os clusters. Trata-se de um processo não supervisionado de classificação, onde dados não rotulados (não identificados previamente) são processados por um algoritmo em busca de “proximidades” que reflitam semelhanças entre esses dados em suas n dimensões. Em função dessas proximidades, aglomeram-se dados que guardem alguma semelhança entre si, formando os clusters. (Abbas, 2008) apresenta um comparativo entre alguns algoritmos para clusterização de dados, dentre os quais destacamos o *k-means*.

O *k-means* é um algoritmo de clusterização extremamente popular na literatura devido à sua simplicidade de implementação e uso. Basicamente, necessita como parâmetro a definição do valor de k , que representa o número de clusters objetivado, e a métrica a ser utilizada na medida de proximidade entre os pontos a serem agrupados. No caso, esses

pontos têm uma mesma dimensão n e as distâncias entre eles são calculadas para R^n . Exemplos de métricas de distância comumente usadas são a *euclidiana* ou a *manhattan* (Ramon & Bruynooghe, 1998) e (Singh, Yadav, & Rana, 2013).

Cada cluster é formado tendo por base um ponto central, chamado de centróide. Os centróides são definidos como a média dos valores dos pontos de cada cluster. O algoritmo do *k-means* calcula, de forma recursiva, qual o centróide mais próximo de um dado ponto, para então acrescentar este ponto ao cluster deste centróide. Feito isso, um novo centróide para esse cluster é calculado. O algoritmo termina quando todos os pontos foram avaliados e encontram-se devidamente clusterizados, formando um total de k clusters.

Uma das principais vantagens do *k-means* é sua alta velocidade de execução. Uma vez que o maior consumidor de tempo de processamento desse algoritmo é somente o cálculo das distâncias entre os pontos da base de dados e os centróides dos grupos, sua complexidade computacional é de $O(n)$.

Um outro algoritmo também bastante conhecido e utilizado pela comunidade acadêmica é o *Expectation Maximization*, ou simplesmente **EM**. O objetivo desse algoritmo é encontrar parâmetros de máxima semelhança em um determinado modelo estatístico, para as situações nas quais as equações não possam ser resolvidas diretamente. Via de regra, tais modelos envolvem variáveis latentes, observação de dados conhecidos e parâmetros desconhecidos, dispensando a definição prévia do número de clusters a serem formados.

O fato de obrigatoriamente ter de ser definido um valor para k no *k-means* pode ser considerado uma desvantagem desse algoritmo, quando então o algoritmo EM poderia ser utilizado em seu lugar. Contudo, deve-se ressaltar que o objetivo pretendido neste trabalho é o de agrupar, de forma sistemática, diversos pontos em um mapa geográfico, e que o número de grupos guarda relação com o número de VANTs a serem usados. Considerando que o parâmetro principal para a definição de cada cluster é a distância euclidiana entre esses pontos, e ainda que o valor de k pode ser definido diretamente em função do número de VANTs, o uso do *k-means* torna-se mais vantajoso em detrimento de outras abordagens.

Diversos trabalhos relacionados ao TSP utilizam conjuntamente o algoritmo *k-means*. Em (Latah, 2016), o *k-means* é utilizado para otimizar o desempenho de um algoritmo para solução do m-TSP que tem como base a heurística de colônia de formigas. Outros trabalhos, como em (Tan, Tan, Yun, & Zhang, 2017) e (Mousa, El-Shorbagy, & Farag, 2017), adaptam o *k-means* para incorporá-lo a outros algoritmos de solução do TSP e do

m-TSP, como o genético, por exemplo. Conforme já mencionado, neste trabalho utilizamos o k-means para gerar agrupamentos de PoIs, considerando-se também o CC, e assim criar regiões menores em função de uma estratégia de uso de um total de M VANTs.

5. Propostas de Solução

Conforme visto na Seção 2.1, os cenários de emergência e desastre tendem a ser críticos quanto ao tempo de resposta, e portanto apresentam demandas específicas de comunicação, necessitando de redes de comunicação confiáveis e de baixa latência (Hayat et al., 2016).

Dependendo do tipo da região onde o desastre ocorreu, a mobilidade das equipes pode ficar extremamente debilitada, podendo inclusive necessitar de veículos especiais como barcos e aeronaves para se deslocarem até determinados pontos de interesse (PoIs). O uso de helicópteros e aviões não é raro nessas ocasiões, porém existe uma logística bastante complexa e custosa para colocar essas aeronaves no ar, envolvendo, por exemplo, questões de tripulação e abastecimento, dentre outras. Além desses fatores, muitas vezes essas aeronaves estão ocupadas demais em missões de resgate para poderem ser empregadas em missões de busca de informações. Mesmo com a ajuda desses veículos, as equipes e até sobreviventes podem estar ilhados, sem ter como se deslocarem, de forma extremamente súbita devido a mudanças que podem ocorrer no cenário.

No Capítulo 3 vimos que existem diversas tecnologias de redes sem fio que podem ser empregadas em determinados cenários. Especificamente na Seção 3.5 foram apresentadas as redes *Ad hoc* móveis, as quais podem ser uma solução de conectividade nesses cenários em virtude de seus protocolos conseguirem lidar com as mudanças dinâmicas tão comuns nos cenários de emergência. Podem fornecer serviços tais como voz sobre IP e vídeo sob demanda, trabalhando ainda em conjunto com VANTs, de acordo com suas características de operação discutidas na Seção 2.4. Possuem grande mobilidade, quase irrestrita, e podem ser utilizados para levar conectividade às equipes que se encontram em regiões de difícil acesso, atuando como nós de grande mobilidade da rede de comunicação de auxílio às equipes (Manyam, Rasmussen, Casbeer, Kalyanam, & Manickam, 2017).

No entanto, devido a fatores adversos, como por exemplo interferências eletromagné-

ticas, distância elevada entre equipes que se encontram em PoIs mais distantes, barreiras naturais como morros ou vales, além da própria mobilidade das equipes que, por vezes, precisam retornar ao Centro de Comando e Controle (CC) para reabastecimento, uma rede puramente *ad hoc* pode não ser a melhor solução. E isso porque podem ocorrer interrupções na conectividade da rede, inviabilizando a comunicação fim a fim entre os dispositivos.

Mediante esse contexto, as redes oportunísticas ou tolerantes a atrasos e desconexões (DTN), cujas características de funcionamento foram descritas na Seção 3.6, se constituem como melhor opção a ser empregada em cenários como esses, provendo algum tipo de conectividade mesmo quando não houver um caminho fim-a-fim para o tráfego de dados. VANTs sobrevoando os PoIs, nos quais as equipes estão trabalhando, podem ser usados para receber e enviar dados para essas equipes, transportar os dados recebidos até um outro PoI e, assim sucessivamente, até que tenham percorrido todo o cenário, incluindo o CC, para receber e entregar informações (de Albuquerque et al., 2014; de Albuquerque, de Lucena, & Campos, 2016)

5.1 Visão geral da solução proposta

Neste trabalho, propõe-se que uma topologia de rede de comunicação de dados para apoio às equipes de busca e resgate em cenários de emergência possa ser criada de forma dinâmica, e que seja formada por um conjunto de nós móveis. Esse conjunto de nós móveis é constituído pelos equipamentos utilizados pelos membros das equipes, pelos VANTs e pelas próprias viaturas utilizadas pelas equipes. Servidores instalados no CC fazem boa parte do processamento requerido pela rede, em especial o planejamento de rotas (ou missões dos VANTs e das equipes), o que computacionalmente desonera os dispositivos móveis, que geralmente têm limitações de energia.

A Figura 5.1 exemplifica essa topologia. Nela observamos que os dispositivos com menor alcance de rádio, tais como sensores, telefones celulares do tipo *smart phone* e até estações de trabalho remotas, podem se conectar a um VANT que esteja próximo o suficiente para estar dentro de seu raio de alcance de comunicação. Esse VANT pode, então, funcionar como ponte de comunicação entre esse grupo de dispositivos e outro VANT, ou até mesmo diretamente ao CC, devido a seu maior alcance de comunicação e grande mobilidade.

Os dispositivos móveis portáteis também apresentam limitações de alcance, o que pode prejudicar o desempenho da rede. Para minimizar essa limitação, podem ser usados

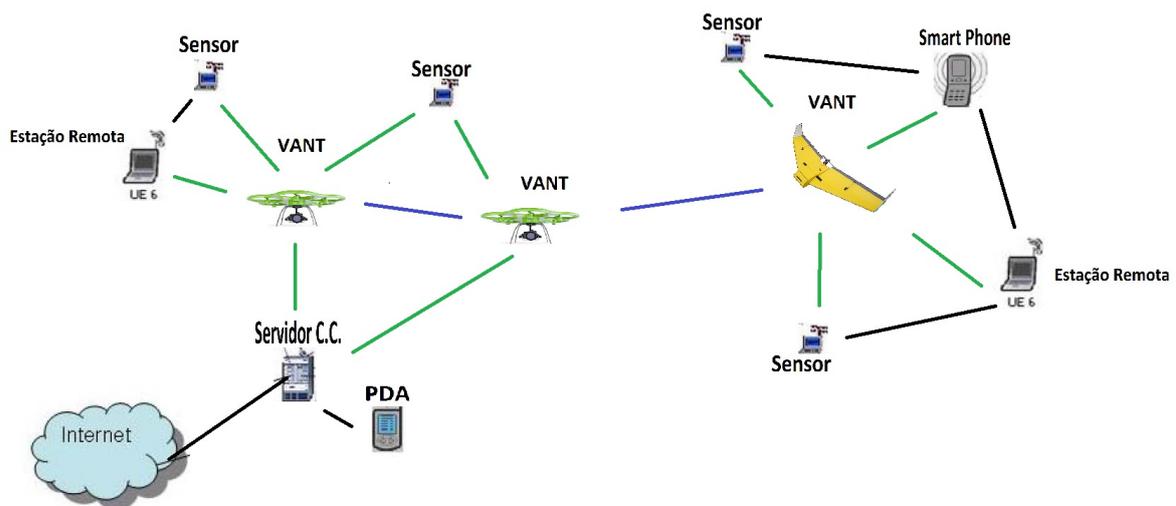


Figura 5.1: Topologia da rede

rádios com maior alcance nos veículos utilizados pelas equipes. Embora esse tipo de rádio com maior potência apresente um maior consumo de energia, esse problema pode ser remediado uma vez que os veículos em terra, de forma geral, têm capacidade de recarregar esses equipamentos com suas próprias baterias. Mesmo assim, apesar do alcance dos dispositivos poder ser aumentado dessa forma, podem ocorrer situações nas quais os veículos não possam acompanhar as equipes em terra, devido a bloqueios causados por deslizamentos ou inundações. Nesses casos, os VANTs passam a ser vitais devido a sua mobilidade aérea. Além de auxiliar na comunicação entre os diversos nós em terra, os VANTs podem também ser aproveitados para a coleta de dados de sensores, assim como a obtenção de fotografias e filmagens aéreas em locais inóspitos ou com grandes restrições de mobilidade, permitindo uma rápida compreensão da situação atual do cenário em questão por parte das equipes e do CC.

Apesar do foco principal dessa rede ser o auxílio direto às equipes de resgate, facilitando sua comunicação com o CC, vítimas que precisem de ajuda, ou mesmo voluntários, podem beneficiar-se e, ao mesmo tempo, contribuir para o funcionamento da infraestrutura como um todo:

- Usuários comuns podem receber vídeos e fotos em “tempo real” dos VANTs - As equipes de resgate, além do próprio CC, podem solicitar que os VANTs sobrevoem determinada área para obter fotos ou vídeos do cenário. O envio dessas imagens pode ser realizado por *broadcast* ou *multicast*, permitindo sua recepção, dentro de um certo limite de tempo, pelas entidades envolvidas com a missão de resgate ou

ainda por usuários civis do sistema, como ocorre com as câmeras de tráfego, por exemplo (Apvrille, Tanzi, & Dugelay, 2014).

- Indivíduos vitimados podem enviar informações para as equipes de resgate - Algumas vítimas podem ser capazes de se conectar no sistema de apoio e enviar informações importantes que possam ajudar as equipes em seu próprio resgate.
- Voluntários podem fornecer informações valiosas - Voluntários, amigos ou parentes podem ter informações que auxiliem na localização de vítimas.
- Quanto mais nós na rede, melhor ela funciona - Quanto mais usuários utilizando o sistema, mais nós estarão presentes na rede e, portanto, mais possibilidades de roteamento existirão, contribuindo assim para o funcionamento da rede como um todo.

Os dispositivos de dados das pessoas comuns, assim denominados **usuários civis**, que estejam próximas da região do desastre e que estejam precisando de ajuda, ou que estejam próximas de pessoas que precisem de ajuda, ou ainda que se voluntariem a ajudar de alguma forma, também podem ser utilizados como nós intermediários da rede oportunística de emergência proposta. Nesse caso, essas pessoas poderiam instalar uma versão mais simples de aplicação (*app*) em seus celulares, a qual serviria somente para transformar seus dispositivos em nós intermediários da rede. Além disso, serviriam também como localizador de vítimas, enviando pedidos de socorro para as equipes e para o CC junto com sua localização geográfica, dada pelos dados de GPS do dispositivo ou por triangulação de sinal, sempre que possível. Com essas informações, as equipes podem ser deslocadas para prestar o socorro necessário ou mesmo enviar VANTs ao local para auxiliar na comunicação, colher maiores detalhes sobre a região e enviar mensagens ou imagens para as vítimas sobre rotas de fuga ou localização das equipes de socorro.

5.1.1 Vantagens no uso de VANTs

O uso de vários VANTs numa arquitetura como essa traz diversas vantagens, se comparada com uma solução que utilize um único VANT (Bekmezci et al., 2013a):

- Em missões de busca, o uso de vários VANTs permite a realização de várias tarefas em paralelo e, portanto, reduz o tempo total da missão.
- Em um sistema com um único VANT, se o VANT ou algum de seus sensores, ou sistema de *firmware* ou *software* falha, o VANT precisa abandonar a missão e retornar

ao CC para ser reparado. Entretanto, em uma arquitetura utilizando vários VANTs, outro VANT pode assumir ou incorporar a tarefa, aumentando assim a resiliência do sistema.

- Em algumas circunstâncias, as informações de sensores de alguns VANTs podem permitir a otimização de missões (planejamento de rotas) de outros grupos de VANTs.

Portanto, para melhorar o desempenho desse sistema é essencial o uso de múltiplos VANTs, tornando-o mais flexível e resiliente para várias aplicações.

Há ainda a possibilidade de um sistema colaborativo entre diferentes tipos de VANTs. Nesse arranjo, um tipo planador ou asa, por exemplo, possui a tarefa principal de localizar potenciais vítimas e possíveis novos pontos de interesse (PoIs) para as equipes de resgate e apoio. Já outro tipo de VANT, nesse caso do tipo multirrotor, devido às suas características de decolagem, pouso vertical e voo pairado (*hovering*), teria a tarefa de receber a informação e ir ao local averiguar, coletando novas evidências ou transportando suprimentos.

Assim sendo, os VANTs se constituem como elementos primordiais para o estabelecimento de uma comunicação entre o CC e os demais nós da rede (PoIs e Equipes em deslocamento), permitindo que haja uma efetiva troca de mensagens entre esses atores (de Albuquerque et al., 2014, 2016). Podemos afirmar então que, ao otimizarmos os trajetos a serem percorridos pelos VANTs para alcançar cada um desses pontos, estaremos atuando diretamente na melhoria dessa comunicação (Albuquerque, Lucena, Campos, Simões, & Moura, 2019).

No Capítulo 4, demonstramos que o problema de minimização do tempo de viagem dos VANTs pode ser modelado como uma variante do problema do caixeiro viajante (TSP), na qual existem múltiplos caixeiros para cobrir o conjunto de cidades a serem visitadas (m-TSP). Portanto, as mesmas heurísticas utilizadas na solução do m-TSP podem ser utilizadas no planejamento de rota dos VANTs. No caso, a abordagem aqui adotada envolve particionar o conjunto de PoIs em regiões menores, de maneira a dividir o trabalho entre os múltiplos VANTs. Cada VANT passa a ser encarado como um “caixeiro” e, assim, formam-se múltiplos TSPs a serem resolvidos. Como o TSP é um problema considerado NP-difícil, ou seja, sua solução pode ser computacionalmente inviável a partir de determinada quantidade de vértices no grafo, mesmo quando se usam heurísticas, a estratégia de dividir o cenário em regiões menores para tratarmos o m-TSP, com menos vértices em cada região, contribui também para a escalabilidade da solução como um todo.

5.2 Premissas para o particionamento do problema

Uma vez que, no processo de gestão de emergências (Seção 2.2), o CC é quem coordena todas as equipes, centralizando em si todas as informações para tomada de decisões em função das ocorrências na região afetada, temos de considerar o CC como sendo o principal nó da rede de comunicação. Desta forma, qualquer otimização de rota tem que considerar o CC como sendo o ponto de maior interesse com relação a origem e destino dos dados. Além disso, pelos motivos já explicados a estratégia de comunicação adota uma arquitetura de rede do tipo DTN, o que também é considerado para as abordagens de particionamento de cenário aqui propostas.

Dito isso, foram elaboradas duas abordagens para o particionamento, ou “clusterização”, do cenário conforme o número de VANTs disponíveis. A partir dessa clusterização, tratamos cada subconjunto formado (“cluster”) como um TSP independente a ser resolvido, objetivando o planejamento da rota do VANT naquele agrupamento de nós. Cada segmento, ou agrupamento de PoIs, é gerado utilizando o *k-means* tendo como métrica a distância euclidiana entre os diversos PoIs (incluindo o CC). Esse algoritmo foi discutido com mais detalhes na Seção 4.4.

Algumas premissas foram assumidas na elaboração dessas abordagens:

- Premissa 1 - Um mesmo nó (ou PoIs, incluindo o CC) poderá fazer parte de um ou mais clusters. Tal premissa garante a possibilidade de troca de mensagens entre todos os nós da DTN formada. Isso ocorre porque o nó que participa de múltiplos clusters servirá como ponto de redistribuição das mensagens entre os VANTs dedicados a cada cluster, conforme o protocolo de DTN usado.
- Premissa 2 - Assume-se que o número de VANTs é maior do que um e menor ou igual ao número de PoIs (excluindo-se o CC). Essa premissa implica em dividir o cenário em um número de regiões equivalente ao número de VANTs em uso, alocando-se um VANT para a cobertura de cada região. Ou seja, ao se utilizar o *k-means*, *k* corresponderá ao número de VANTs.
- Premissa 3 - Conforme já explicado, para cada região, o VANT realizará ciclos de voo passando por todos os nós dessa região (incluindo o CC, se for o caso), e a rota desse ciclo será definida pela solução do TSP que o representa.

Com relação à premissa 2, caso o número de VANTs seja superior ao número de regiões, surge um outro problema a ser tratado, fora do escopo deste trabalho: como

melhor distribuir M VANTs para R regiões, onde $M > R$. Entende-se, nesse caso, que isso seja um problema complementar ao que aqui é tratado, porque envolve o uso de dois ou mais VANTs para possibilitar a entrega e a recepção de mensagens de um único PoI com o restante da rede. Esse entendimento será melhor esclarecido nas seções seguintes. Em contrapartida, caso o número de VANTs seja igual a um, o problema pode ser resolvido com a aplicação direta do TSP, tornando as abordagens aqui estudadas desnecessárias.

Por simplicidade, as abordagens aqui propostas não se preocupam com certos detalhes operacionais para o provimento da solução em um ambiente real, tais como o lançamento de VANTs do CC até algum PoI das regiões computadas ou as rotinas necessárias para reabastecimento dos VANTs.

5.3 Abordagens de solução

Três diferentes abordagens de solução são propostas a seguir. As duas primeiras abordagens envolvem a solução do m-TSP, sendo que a diferença entre elas reside na escolha de quais nós da rede, seja PoI ou CC, serão usados como pontos de passagem de mensagem entre as regiões. A terceira abordagem modela o problema como um único TSP, espalhando os VANTs pela rota calculada.

5.3.1 Abordagem 1: ciclo de voo para cada região engloba o CC

A primeira abordagem tem como foco o CC e é ilustrada na Figura 5.2. Nela consideramos que os VANTs sempre irão realizar um ciclo de voo partindo do CC, visitando cada um dos PoIs de seus agrupamentos - no caso, o agrupamento do qual o VANT é responsável por percorrer -, e retornando ao CC para iniciar um novo ciclo.

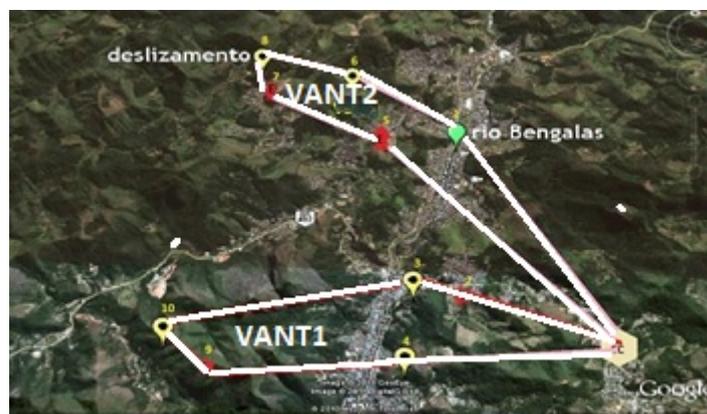


Figura 5.2: Ciclos de VANTs passando pelo CC

Esse cenário leva diretamente à variante do TSP conhecida como m-TSP, apresentada anteriormente. A Figura 5.3 ilustra essa generalização com um único depósito, ou seja, com um único ponto de partida e retorno dos “caixeiros”. Neste caso, os caixeiros representam os VANTs e o depósito representa o CC.

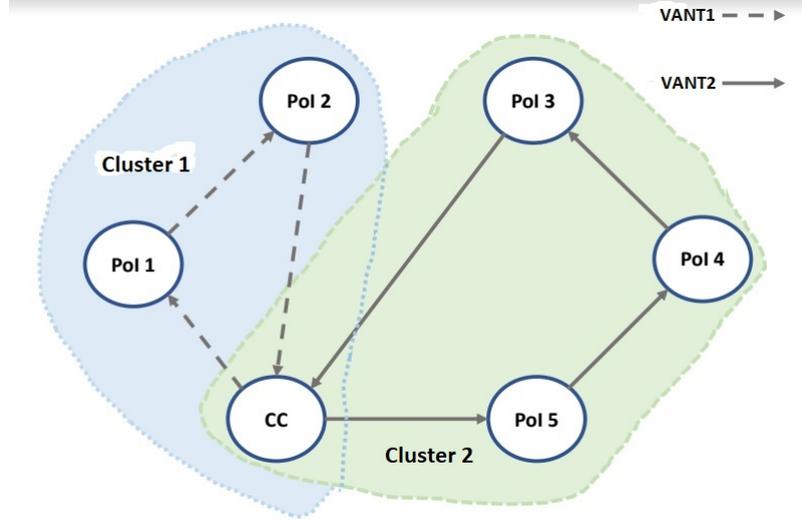


Figura 5.3: Exemplo de representação da Abordagem 1 (M-TSP)

Uma formulação comum utilizando programação linear inteira mista para este problema é a descrita em (Bektas, 2006b), que segue abaixo. Por conveniência, consideramos o vértice representando o CC como sendo o primeiro do conjunto de vértices, ou seja, o vértice um.

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i, j=0}^n c_{ij} x_{ij} \quad (5.1)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad j = 2, \dots, n \quad (5.2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad i = 2, \dots, n \quad (5.3)$$

$$\sum_{i=2}^n x_{1j} = m \quad (5.4)$$

$$\sum_{j=2}^n x_{i1} = m \quad (5.5)$$

$$\sum_{i \in Q} \sum_{j \in Q} x_{ij} \leq |Q| - 1 \quad \forall Q \subseteq \{2, \dots, n\} \quad (5.6)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad i, j = 0, \dots, n \quad (5.7)$$

Podemos notar que essa formulação corresponde a uma generalização do TSP clássico, com algumas pequenas mudanças nas restrições (5.2) e (5.3), pois o vértice um será sempre o vértice de partida para cada uma das m rotas. As restrições (5.4) e (5.5) são introduzidas para definir que cada um dos m ciclos devem partir e voltar para o CC.

Em nossa proposta utilizando heurísticas, os agrupamentos para esta abordagem são obtidos ao rodar-se o k-means excluindo-se o CC do conjunto de nós. Após particionados em k regiões, roda-se o TSP para cada região incluindo-se o CC, para fins de cálculo de rota. Verifica-se, portanto, que o CC passa a ser o nó comum entre as regiões que permite a comunicação entre elas, conforme a Premissa 1. A Figura 5.4 ilustra esse fluxo.

A motivação para essa abordagem se apoia na importância do CC para a coordenação das atividades de busca e resgate. Busca-se, com ela, maximizar a frequência de comunicação entre os PoIs e o CC, de maneira que as pessoas responsáveis pelo controle das operações, presumidamente localizadas no CC, possam se manter melhor atualizadas do estado geral do cenário de emergência, que é notoriamente dinâmico. No capítulo seguinte serão propostas algumas métricas para se avaliar objetivamente a qualidade da comunicação conforme cada abordagem. Isto inclui a comunicação entre os PoIs e o CC.

5.3.2 Abordagem 2: CC faz parte de apenas uma região

A segunda abordagem é mostrada na Figura 5.5, contendo uma montagem sobre o mapa de uma região relacionada a um cenário de desastre, e na Figura 5.6, usando um formato genérico e hipotético, não relacionado com a Figura 5.5. Nessa abordagem, o CC passa a fazer parte do ciclo de voo do VANT de apenas uma das regiões e não mais de todas elas. Obtém-se os agrupamentos rodando o k-means para todos os nós do mapa, incluindo o CC, dividindo-os assim em k regiões. O CC estará, portanto, incluso em uma dessas regiões, e essas regiões precisarão ser interligadas entre si. Essas interligações se darão através de PoIs que servirão como pontos de troca de mensagens entre os VANTs que cobrem regiões vizinhas. Conforme a Premissa 3, o ciclo de voo do VANT em cada região será dado pela solução do TSP que a representa.

A definição de como interligar essas regiões precisa ser realizada de forma a garantir a comunicação entre os VANTs de toda e qualquer região. Em outras palavras, é preciso usar um método que impeça que uma ou mais regiões fiquem desconectadas das demais.

Dada a importância do CC no contexto das soluções aqui propostas, uma das opções para a interligação entre regiões é usar um algoritmo de árvore geradora mínima (AGM) tendo o CC como raiz. Para tal, considera-se, por uma questão de simplicidade, usar

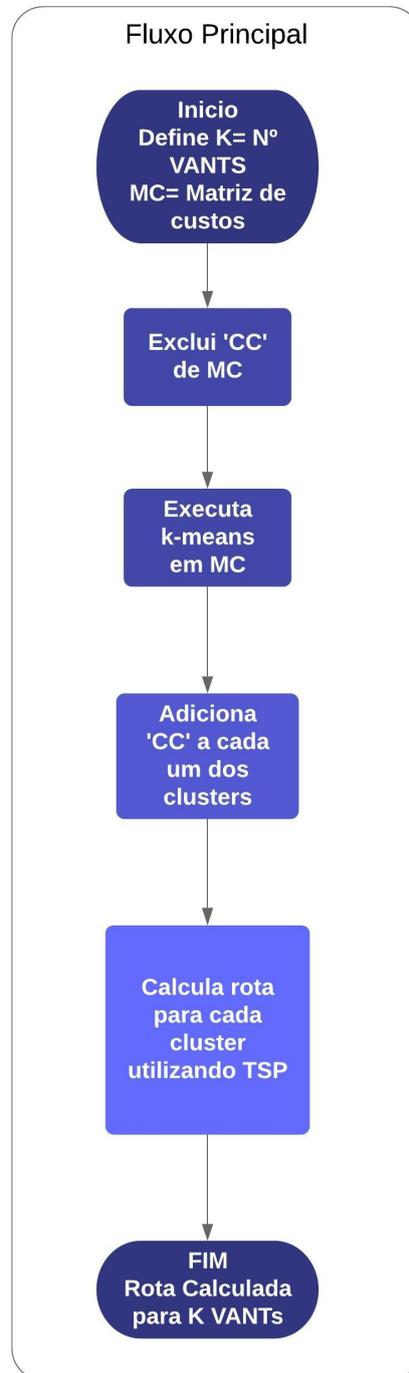


Figura 5.4: Fluxograma da Abordagem 1



Figura 5.5: Ciclos de VANTs passando sem retorno ao CC

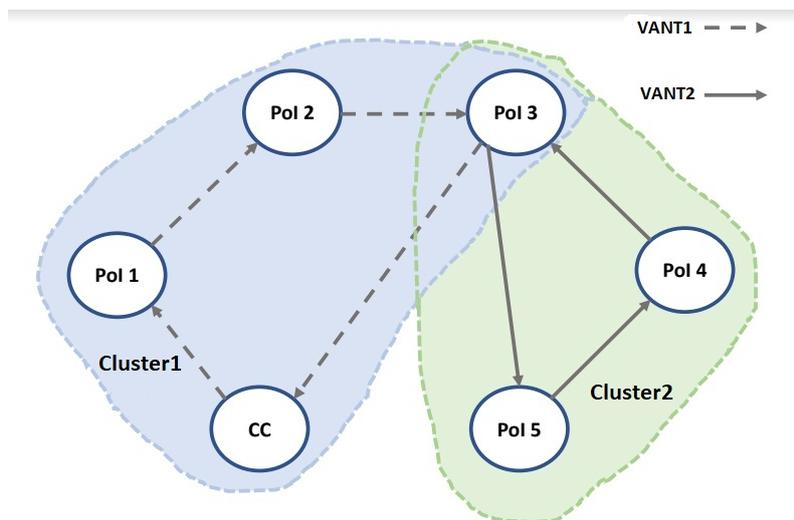


Figura 5.6: Exemplo de representação da Abordagem 2

o centroide de cada região como ponto de referência para a aplicação do AGM, onde o centroide da região que engloba o CC será a raiz da árvore.

Uma vez definidas as interligações entre as regiões, passa-se então para a fase em que se define quais PoIs servirão como ponto de intercomunicação entre os VANTs de regiões vizinhas. Esses PoIs serão aqui chamados de Pontos de Troca de Tráfego entre Clusters, ou PTTeCs (PoI3 na Figura 5.6). Os PTTeCs são definidos da seguinte forma:

- A partir do conjunto formado pelo pontos das duas regiões vizinhas que serão interligadas, utiliza-se o Algoritmo de Pares Mais Próximos (Ziviani, 2013) para se encontrar os dois pontos que mais se aproximam entre si. Em função dessas regiões terem sido particionadas através do k-means usando a distância euclidiana como métrica, esse par de pontos mais próximos serão formados por um ponto de cada região.
- Uma vez selecionado o par de pontos de cada região que melhor as aproxima, faz-se necessário escolher um desses pontos para servir como PTTeC. Como consequência, isso implica em estender o ciclo de voo do VANT que cobre uma das regiões de maneira a englobar esse novo ponto (o PTTeC). Em função disso, adota-se como critério estender o ciclo da região mais distante do CC, ou seja, o PTTeC passa a ser o PoI da região mais próxima ao CC.

O Algoritmo de Pares Mais Próximos é um algoritmo que utiliza a técnica de divisão e conquista para identificar, dentro de um conjunto de pontos no plano, o par de pontos que guardam a maior proximidade entre si dentre todos os possíveis pares do conjunto. Esse algoritmo possui complexidade computacional de $O(n \log n)$ (Ziviani, 2013).

O motivo para o critério de escolha do PTTeC dentre os pares selecionados é que, como a interligação entre regiões foi obtida a partir de uma árvore geradora mínima tendo o CC como raiz, as regiões mais próximas ao CC tendem a ter mais regiões vizinhas. Se essas regiões mais próximas ficarem estendendo seu ciclos para os PoIs das regiões vizinhas, os ciclos dessas regiões podem vir a aumentar muito.

Então, resumindo, temos os seguintes passos para o cálculo desta solução:

- Aplica-se o algoritmo k-means na instância I que contém a matriz de custo para cada PoI e o CC inclusive. $k =$ Número de VANTs disponíveis.
- A centroid de cada cluster é identificada. A localização geográfica de cada uma dessas centroids é utilizada para criar um grafo auxiliar ponderado;

- Uma matriz de custo identificada por C é construída a partir desse grafo auxiliar. O peso de cada aresta é dado pela distância geográfica entre cada uma das centroides;
- A árvore geradora mínima de C é calculada onde a centroide que pertence ao cluster ao qual o CC faz parte é a raiz dessa árvore. Cada par de cluster cuja centroide é conectada por um ramo dessa árvore denominamos de clusters vizinhos;
- Em cada um desses pares de clusters vizinhos um único ponto de um dos clusters é selecionado e adicionado ao conjunto de pontos do outro cluster. Este será o PTTeC deste par de clusters;

Para realizar esse procedimento de identificação do PTTeC temos o seguinte subprocedimento:

- Identificar o cluster cuja centroide está mais próxima da raiz da AGM, este será o cluster de origem enquanto o outro será o cluster de destino;
- Identificar o par de pontos, um de cada cluster, que estão mais próximos um do outro;
- Adicionar o ponto identificado do cluster de origem ao cluster de destino.

A Figura 5.7 ilustra esse algoritmo.

A Abordagem 2 assemelha-se a uma variação do m-TSP clássico - que representa a Abordagem 1 -, onde ao invés de um único depósito para o qual todos os caixeiros retornam, há mais de um depósito. Embora os PTTECs pareçam representar esses depósitos, isso não ocorre de fato no caso genérico. Para melhor ilustrar isso, basta verificar o caso do agrupamento que engloba o CC e que, obrigatoriamente, deverá englobar também pelo menos um PTTEC. Para o VANT designado ao agrupamento contendo o CC, o “depósito” no contexto do TSP usado para o cálculo de sua rota é o CC, enquanto que os demais PTTECs contidos nessa rota são apenas “cidades” a serem visitadas. Já para os VANTs de outros *clusters* que fazem contato com esses PTTECs mais próximos do CC, são estes PTTECs que representam os “depósitos”. Portanto, não foram encontradas formulações tradicionais de solução do m-TSP, ou de suas variações, que se apliquem diretamente à Abordagem 2.

5.3.3 Abordagem 3: abordagem “naive” de referência, sem clusterização

Para os estudos deste trabalho, entende-se ser pertinente comparar as duas abordagens anteriores, propostas para a solução do m-TSP que modela o problema em questão, com

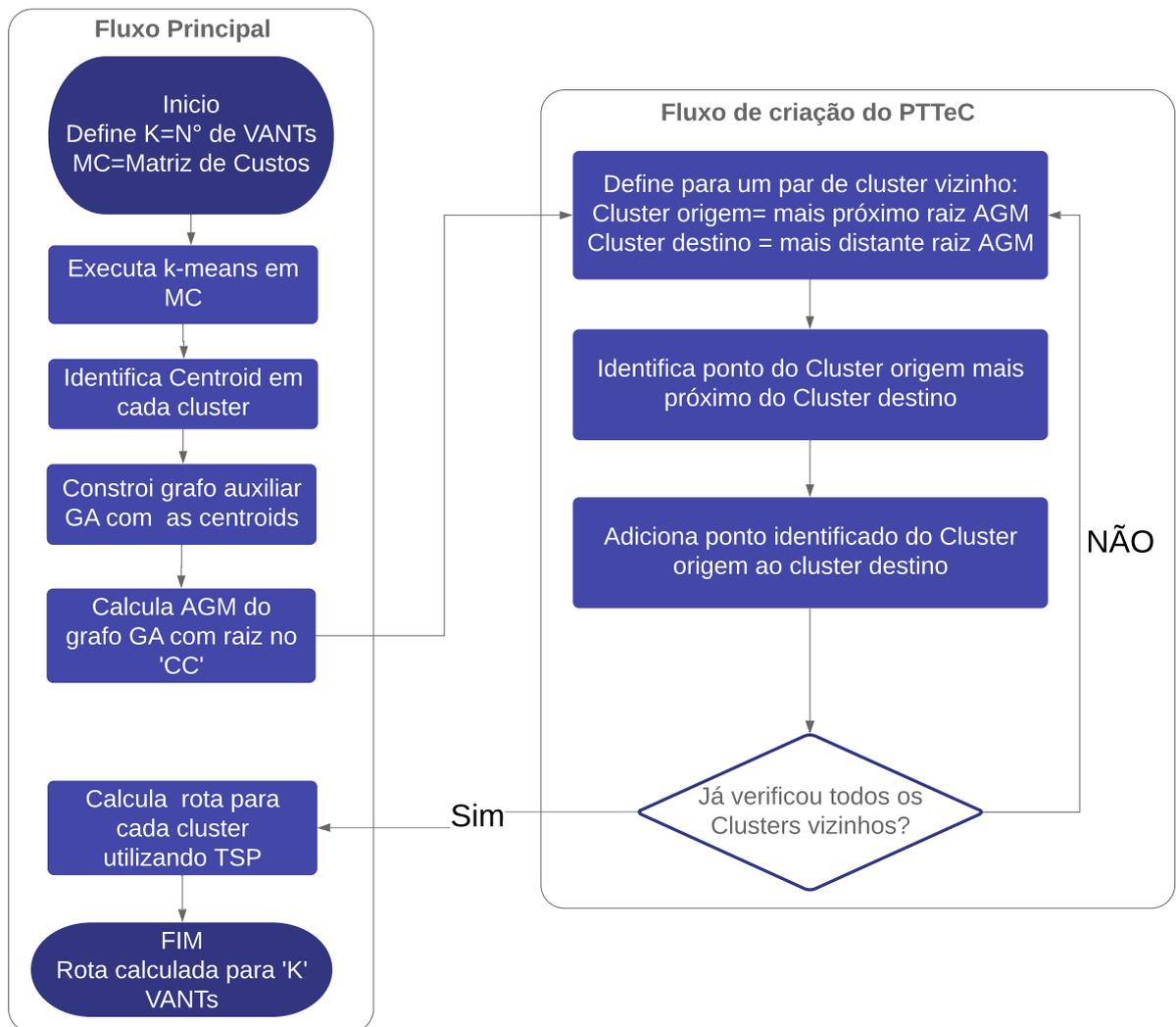


Figura 5.7: Fluxograma da Abordagem 2

uma abordagem mais simples que não divide o cenário de emergência em regiões. Em outras palavras, nesta terceira abordagem o problema aqui tratado será modelado como um TSP simples, sem que o trabalho de percorrer os múltiplos PoIs e o CC seja dividido pelos M VANTs. Como consequência, uma única rota percorrendo todos os nós terrestres do cenário (PoIs mais CC), dada pela solução do respectivo TSP, será usada por todos os M VANTs. Esses M VANTs, no entanto, deverão voar igualmente espaçados ao longo de toda a trajetória do ciclo de voo. Dessa forma, um maior número de VANTs servirá para minimizar o intervalo de tempo entre duas comunicações subsequentes de um nó terrestre para um VANT qualquer, e vice-versa. Verifica-se também, nesta abordagem, que M pode ser superior ao número de PoIs sem com isso afetar a solução do problema. As Figuras 5.8 e 5.9 ilustram dois casos hipotéticos desta abordagem, que será chamada de Abordagem 3, ou *naive*, ou de referência.

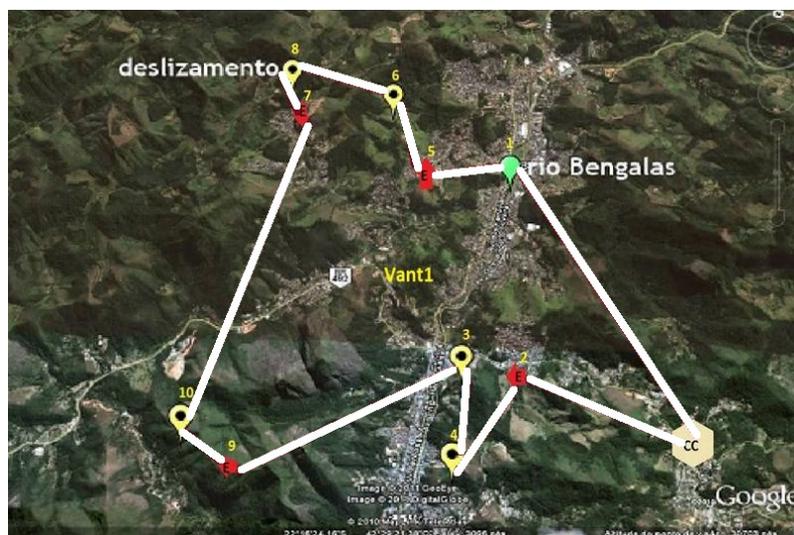


Figura 5.8: Ciclo único de voo dos VANTs

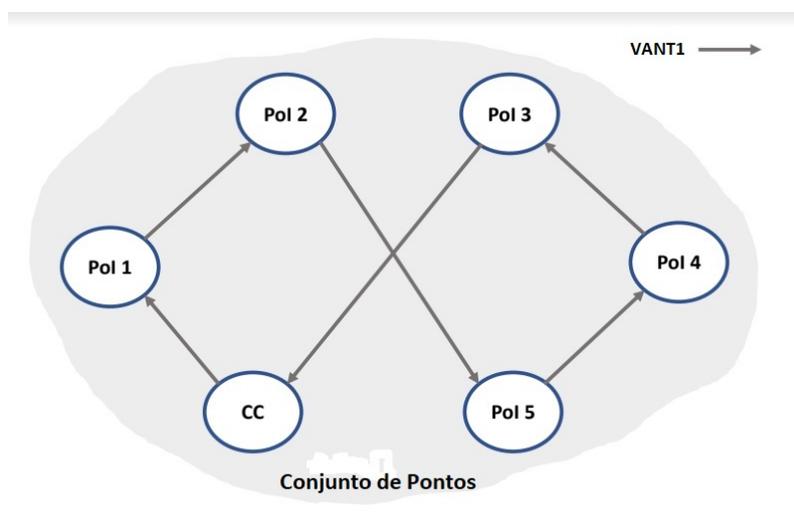


Figura 5.9: Exemplo de representação da Abordagem 3

5.4 Análise comparativa de casos

Esta seção traz uma comparação teórica entre as abordagens 1, 2 e 3 para duas situações diferentes. Na primeira, busca-se um caso onde as abordagens 1 e 2 sejam equivalentes em termos de solução. Na segunda, mostra-se um caso específico de arranjo topológico entre PoIs e CC para fins de diferenciação entre as três abordagens. Nessas comparações, em todos os casos assume-se que o número de VANTs é igual ao número de PoIs.

No primeiro caso, tem-se uma topologia do tipo estrela, tendo o CC como centro. Os PoIs ficam distribuídos de forma equidistante do CC, mantendo também as mesmas distâncias entre si. Isso implica num arranjo geométrico que permite facilmente calcular todas as distâncias envolvidas a partir do conhecimento da distância entre o CC e qualquer dos PoIs. Em outras palavras, o CC passa a ser o centro de um círculo contendo um polígono regular (ou seja, de lados iguais) nele inscrito. Nesse arranjo, para que as abordagens 1 e 2 sejam equivalentes é necessário que o raio do círculo seja menor que o lado do polígono. Pela geometria, isso só ocorrerá caso o número de PoIs seja menor ou igual a 5 (no caso de um hexágono formado por 6 PoIs, o tamanho do lado é igual ao raio). A Figura 5.10 ilustra essa situação para 5 PoIs, onde os lados são as distâncias entre PoIs subsequentes e indicados por D , seu raio, dado por r , indica a distância do CC, ao centro, para cada um dos PoIs.

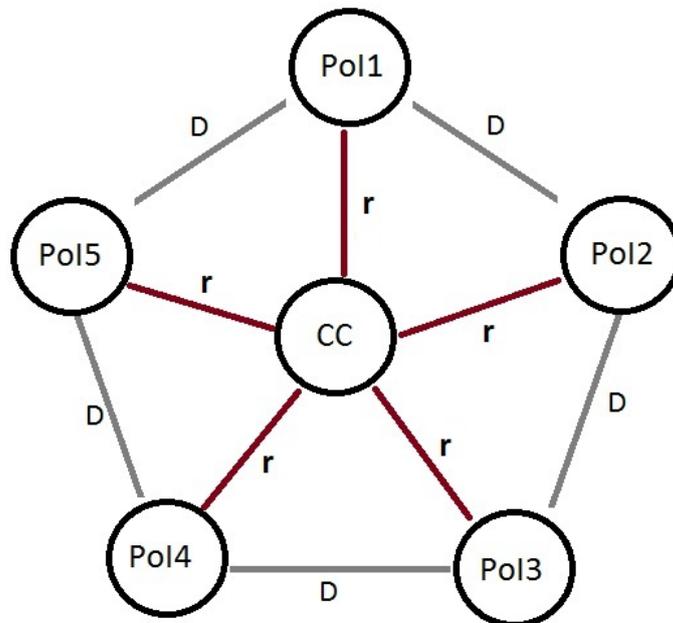


Figura 5.10: Topologia em estrela com CC no centro ($r < D$)

Nesse primeiro caso ilustrado pela Figura 5.10, a Abordagem 1 gerará 5 clusters onde

cada cluster conterá um único PoI. Conforme sua definição, cada ciclo de VANT será formado pelo PoI de cada cluster e o CC. Já pela Abordagem 2, 6 clusters serão gerados, cada qual contendo um nó apenas: os mesmos 5 clusters da Abordagem 1 mais um cluster contendo o CC. Pela definição da Abordagem 2, no que tange à escolha do nó de interconexão entre os clusters (regiões), o CC será usado como PTTeC. Portanto, no arranjo topológico desse caso, ambas as abordagens tornam-se equivalentes uma vez que o CC passa a ser o PTTeC da Abordagem 2. Sempre que, na Abordagem 2, houver um único PTTeC e esse for o CC, as duas abordagens serão equivalentes.

Com relação à Abordagem 3 nesse primeiro caso mostrado na Figura 5.10, a solução do TSP gerará um ciclo hamiltoniano passando pelos PoIs e o CC, o que se diferencia substancialmente das duas outras abordagens. Os cinco VANTs serão então igualmente espaçados ao longo dessa trajetória, o que claramente eleva o tempo médio de entrega de uma mensagem gerada por um PoI ao CC. Nas abordagens 1 e 2, se desconsiderarmos possíveis problemas relacionados ao protocolo DTN em uso, esse tempo equivalerá ao tempo para percorrer a distância entre o PoI e o CC, igual a r . Na Abordagem 3, o tempo médio corresponderá à metade do tempo necessário para percorrer a distância total do ciclo hamiltoniano, ou seja, $1/2(4D + 2r) = 2D + r$. O intervalo de tempo entre mensagens que chegam de um PoI para o CC, nas abordagens 1 e 2, será equivalente ao tempo para percorrer $2r$, que é o tempo que leva para um VANT retornar ao CC com uma nova mensagem. No caso da Abordagem 3, será o tempo do ciclo hamiltoniano dividido pelo número de VANTs, ou seja, $2(2D + r)/5$. Dado que o ângulo interno do pentágono regular é igual a 72° , tem-se que $D = 1,454r$, aproximadamente. Portanto, $2(2D + r)/5 = 1,563r$, valor menor que o intervalo de tempo entre mensagens para as abordagens 1 e 2.

O arranjo do segundo caso considera um posicionamento em linha reta de todos os PoIs em relação ao CC, conforme ilustrado na Figura 5.11. Por simplicidade, adota-se uma mesma distância d entre cada nó desse arranjo. Portanto, se numerarmos cada PoI a partir do CC, o k -ésimo PoI estará a uma distância kd em relação ao CC. Esse segundo caso apresenta diferenças interessante entre as abordagens 1, 2 e 3.

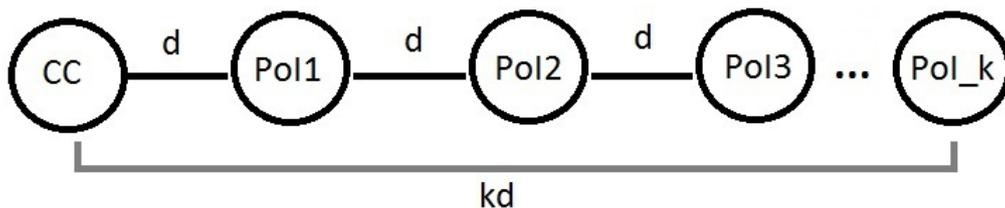


Figura 5.11: PoIs alinhados em reta

Pela Abordagem 1, cada PoI implicará em um cluster formado por ele próprio. Como consequência, os ciclos dos VANTs serão formados por cada PoI e o CC, conforme ilustrado na Figura 5.12(a). Pela Abordagem 2, cada nó implicará em um cluster separado, incluindo o CC. A ligação entre clusters obedecerá as regras de obtenção dos PTTeC, fazendo com que os ciclos de voo de cada VANT formem uma cadeia de “elos” interligando o CC com o PoI subsequente, esse PoI com o próximo, e assim por diante. A Figura 5.12(b) ilustra o encadeamento desses ciclos. Já pela Abordagem 3, os VANTs estarão espaçados ao longo do ciclo hamiltoniano que, invariavelmente, representa um percurso que sai do CC, percorre todos os PoIs em linha e depois retorna ao CC (supõe-se aqui, por simplicidade inicial, sem contato com os PoIs nesse retorno).

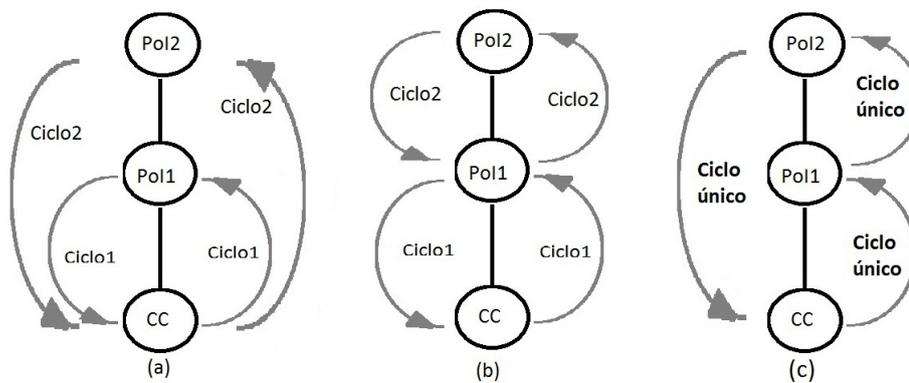


Figura 5.12: Ciclo de voo nas abordagens 1 (a), 2 (b) e 3 (c)

Comparando-se as três abordagens para esses casos, evidenciam-se semelhanças e diferenças. Primeiramente, tomemos como base o tempo para um ciclo de comunicação entre cada PoI e o CC. Na Abordagem 1, esse tempo será função da distância kd entre o CC e o PoI k , dado que a mensagem entre o PoI e o CC depende unicamente do ciclo do VANT que os intercomunica (supõe-se aqui, por simplicidade inicial, que o VANT não se comunicará com um PoI diferente ao longo do caminho). Já na Abordagem 2, a intercomunicação entre o CC e o PoI k dependerá do encaminhamento das mensagens pelos ciclos que compõem o encadeamento de “elos” entre esses dois pontos. Sendo assim, o tempo de comunicação dependerá não apenas da distância kd , mas também do tempo que a mensagem levará para passar de um VANT para outro através do PTTeC que os interliga. No melhor caso, o que envolveria um sincronismo perfeito entre todos os VANTs, esse tempo seria proporcional a $2kd$, como na Abordagem 1. No pior caso, o repasse de mensagem em cada PTTeC terá que aguardar um ciclo completo do VANT por aquela região, cuja distância coberta seria igual a, aproximadamente, $2d$. Portanto, no pior caso o tempo de intercomunicação seria proporcional a $2kd + k(2d) = 4kd$. Ou seja, na Abordagem 2, o tempo de comunicação entre o PoI k e o CC será maior ou igual ao obtido na Abordagem 1, podendo chegar ao dobro no pior caso.

Na Abordagem 3, o tempo para o ciclo de comunicação entre o PoI k e o CC será proporcional ao tempo que leva para um VANT cobrir toda a distância do ciclo hamiltoniano, ou seja, $2Nd$, onde N é o número de PoIs do cenário, ou seja, $N \geq k$. Portanto, quanto maior o valor de N , maior será esse tempo em relação à Abordagem 1 e o mesmo em relação à Abordagem 2, supondo-se o melhor caso dessa. Para o pior caso da Abordagem 2, esse tempo para a Abordagem 3 será maior se $k \leq N/2$.

O tempo de envio e recepção de mensagens entre CC e PoIs não é a única medida que reflete as características de comunicação de cada abordagem. Em um cenário de emergência, a frequência com que as mensagens chegam a um dado nó, em especial ao CC, também é uma medida de interesse. Por simplicidade, pode-se entender que essa frequência de entrega de mensagens depende do intervalo de tempo com que elas são capturadas pelos VANTs em cada ponto de origem. Para compararmos ambas as abordagens com relação à frequência de entrega de mensagens, no escopo deste segundo caso, assume-se que uma mensagem de tamanho fixo é gerada para o CC sempre que o VANT passa por um PoI.

Na Abordagem 1, o PoI k precisará aguardar um ciclo completo de voo do VANT para entregar a esse VANT uma nova mensagem logo após uma passagem anterior do mesmo. Ou seja, o intervalo de tempo entre entregas de mensagens será proporcional a $2kd$ para o PoI k . Como o VANT voa direto do PoI para o CC e vice-versa, podemos entender que este intervalo de tempo entre entregas de mensagem, na Abordagem 1, vale tanto para entregas do PoI para o VANT como do VANT para o CC.

Na Abordagem 2, o tempo que o VANT leva para retornar ao PoI k após sua última passagem, VANT esse que circula no “elo” em direção ao CC, é de $2d$. Portanto, para qualquer PoI k , o tempo entre entregas de mensagem do PoI para o VANT será de $2d$. Apesar dos $k - 1$ repasses necessários entre os PoIs ao longo do caminho até o CC, podemos considerar que, no último “elo” da cadeia, formado pelo PoI 1 e o CC, a cada ciclo de $2d$ uma mensagem originada pelo PoI k estará disponível para ser recebida pelo VANT e entregue ao CC. Portanto, para qualquer PoI k , o intervalo de tempo entre entregas de mensagem, tanto na origem (PoI k) quanto no destino (CC), será proporcional a $2d$. Trata-se, portanto, de uma frequência de entregas maior que a obtida na média pela Abordagem 1, caso se tenha um número maior que 3 PoIs.

Na Abordagem 3, de forma semelhante ao da Abordagem 1, o PoI k precisará aguardar um ciclo inteiro de voo do VANT para entregar-lhe uma nova mensagem. Porém, uma vez que os VANTs obrigatoriamente precisarão passar por todos os N PoIs para completar seu ciclo e se encontram espaçados entre si, o intervalo de tempo entre entregas de mensagens

será da ordem de $2Nd/M$ onde M é o número de VANTs. O tempo de entregas do PoI k para o VANT e do VANT para o CC somente será igual caso $kd = Nd/2$, para todos os outros casos, esse tempo será da ordem de kd para entregas do PoI ao VANT e de $d(N - k)$ para as entregas do VANT ao CC. Desta forma teremos uma frequência de entregas menor do que as obtidas, em média, pelas abordagens 1 e 2, caso tenhamos uma quantidade de PoIs maior ou igual a 2.

As análises para o segundo caso, ilustrado na Figura 5.11, assumiram, por simplicidade, que nas abordagens 1 e 3 os VANTs não faziam contato com outros PoIs que não tenham sido considerados no cálculo de seu ciclo de voo, conforme mostrado nas Figuras 5.12(a) e 5.12(c). Caso esses contatos sejam considerados, na Abordagem 3, logo que uma mensagem seja entregue ao PoI k , um outro VANT retornando ao CC poderá receber uma mensagem do PoI k com destino ao CC. Desta forma, no melhor caso, o tempo de comunicação entre o CC e o PoI k será proporcional a $2kd$, como ocorre na Abordagem 1. No pior caso, terá de esperar um VANT vindo do PoI $k + 1$ para o PoI k . Como os VANTs ficam espaçados na Abordagem 3, esse tempo será proporcional a $2Nd/M$, onde M é o número de VANTs. Portanto, no pior caso esse tempo será de $2kd + 2Nd/M$. Na Abordagem 1 nada muda, pois o VANT que esteja vindo do PoI $l > k$ para o CC, passando pelo PoI k , ou terá uma réplica da mensagem do PoI k para o CC ou só a receberá quando passar pelo PoI k . Em quaisquer dos casos, o VANT associado ao cluster do PoI k já estará voltando para o CC e carregando essa mensagem.

Quanto à frequência de entrega de mensagens para a Abordagem 3, como os VANTs sempre percorrem todos os PoIs e se encontram igualmente espaçados, este tempo será dado por $2Nd/M$. No caso da Abordagem 1, deve-se notar, primeiramente, que todos os VANTs passam pelo CC e pelo PoI 1, mas nem todos os VANTs passam pelos demais PoIs. Dado um PoI k , $N - (k - 1)$ VANTs passam por este PoI, onde N é o número máximo de PoIs. Ou seja, apenas os VANTs alocados aos ciclos que englobam PoIs $l \geq k$ passam pelo PoI k . Portanto, no PoI N , que é o mais distante do CC, apenas um VANT passará por ele. Outra observação importante é que, como as distâncias dos ciclos de voo têm valores múltiplos de $2d$ e dado que essas rotas são cíclicas, os VANTs se encontram periodicamente em um dado ponto a intervalos que são múltiplos de $2d$.

Supondo, por simplicidade, que todos os $N - (k - 1)$ VANTs passam ao mesmo tempo pelo PoI k em direção ao CC, e que neste exato momento apenas uma mensagem seja replicada para todos os VANTs (e não duas mensagens subsequentes), o VANT alocado ao PoI k levará um tempo proporcional a $2kd$ para passar novamente por esse PoI em direção ao CC e o VANT alocado ao PoI $k + 1$ levará um tempo proporcional a $2kd + 2d$ para passar novamente por esse mesmo PoI em direção ao CC. Portanto, verifica-se que, no

pior caso, o intervalo de tempo entre mensagens do PoI $k < N$ para o CC será proporcional a $2kd$ e, no melhor caso, proporcional a $(2kd + 2d) - (2kd) = 2d$. Para o PoI N , esse intervalo será sempre determinístico e proporcional a $2Nd$, a depender da velocidade do VANT.

De acordo com essas análises, fica claro portanto que as abordagens aqui estudadas podem ser aplicadas em qualquer cenário onde o uso do espaço aéreo pelos VANTs não seja um impeditivo, ficando a qualidade da solução diretamente relacionada ao posicionamento dos PoIs e do CC no cenário, tendo como configurações limítrofes as analisadas acima.

Para termos uma noção de como se comportariam na prática essas abordagens, caso aplicadas nesses dois cenários hipotéticos, realizamos experimentos de simulação com o simulador de redes oportunísticas THE ONE, utilizando o protocolo Epidêmico e com os parâmetros ajustados da seguinte forma:

- Quantidade de VANTs e PoIs fixada em cinco;
- Tamanho das mensagens variando aleatoriamente entre 500 KB e 20 MB;
- Intervalo entre a geração de mensagens fixado em 30 s;
- Tempo total de simulação de 7200 s;
- Velocidade de deslocamento dos VANTs fixada em 36 km/h.

A escolha dos valores acima segue o mesmo padrão adotado nos experimentos que serão detalhados no próximo capítulo, com as devidas justificativas. As medidas obtidas também são definidas no próximo capítulo.

Para este estudo preliminar e comparativo, foi realizada uma única rodada de simulação para cada uma das abordagens, em cada uma das duas disposições teóricas dos PoIs. As medidas representam médias obtidas para um conjunto de 480 mensagens geradas com origens e destinos aleatórios. Quando originadas a partir de um PoI aleatório, o destino é sempre o CC e, quando originadas do CC, o destino é aleatoriamente escolhido para um PoI qualquer.

No cenário onde os PoIs são distribuídos de forma pentagonal, as abordagens 1 e 2 se equivalem diretamente, pois a regra de formação dos PTTeC utilizando AGM gera uma árvore com raiz no CC e uma ramificação para cada um dos PoIs, conforme já explicado anteriormente. Isso foi constatado experimentalmente e, em função disso, apenas uma

simulação foi realizada representando as abordagens 1 e 2. Nesse mesmo cenário, podemos observar na Figura 5.13 que, conforme esperado, a Abordagem 3 apresenta uma maior latência em comparação com as abordagens 1 e 2. Mesmo com igual número de VANTs nos três casos, o trajeto a ser percorrido na Abordagem 3 é maior do que o das abordagens 1 e 2.

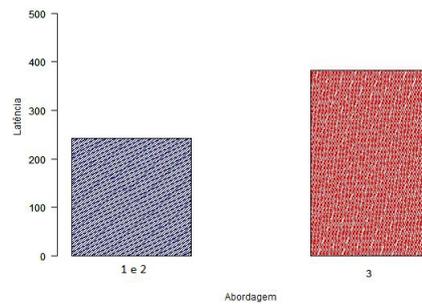


Figura 5.13: Latência no cenário pentagonal

De forma análoga, no cenário hipotético com os PoIs dispostos em linha, os valores de latência das abordagens 1 e 2 são bem próximos, enquanto que na Abordagem 3 o valor é praticamente o dobro, conforme visto na Figura 5.14. Embora as abordagens 1 e 2, neste caso, tenham trajetórias bem distintas, elas praticamente se equivalem na simulação, pois acabam por se beneficiar de encontros oportunistas entre o VANTs, onde um VANT que esteja em uma rota indo de um PoI_a para um PoI_c pode ter um encontro com um outro VANT retornando do PoI_d para o PoI_a , quando esses VANTs passam pelo PoI_b , e assim entregar-lhe uma mensagem endereçada ao PoI_a , reduzindo a latência dessa mensagem. Já na Abordagem 3, uma vez que todos os VANTs realizam a mesma trajetória, que necessariamente passa por todos os PoIs, esses encontros oportunistas ocorrem em um menor grau, se comparado com as outras duas abordagens.

Quanto à sobrecarga na rede, que indica o número de cópias produzido por cada mensagem entregue, nas duas primeiras abordagens temos um valor levemente inferior se comparado com a Abordagem 3, conforme visto na Figura 5.15. Nas abordagens 1 e 2, o trajeto percorrido por cada VANT é igual e invariavelmente alcança todos os pontos, possibilitando que as mensagens sejam eventualmente entregues. Da mesma forma ocorre com a Abordagem 3, embora nessa última todos os VANTs tenham de percorrer todos os PoIs, incluindo o CC. Com isso, todos os VANTs também irão passar por todos os PoIs, possibilitando a entrega das mensagens.

A forma como o contato dos VANTs com os PoIs afeta a métrica de sobrecarga pode ser melhor observada na Figura 5.16, do cenário com os PoIs dispostos em linha. Os

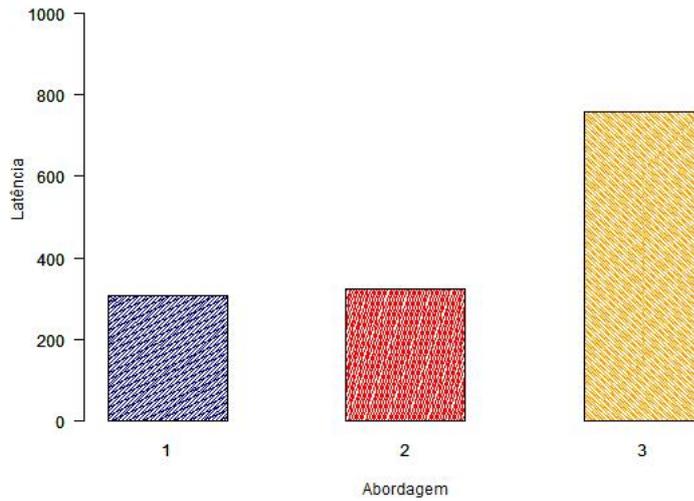


Figura 5.14: Latência no cenário em linha

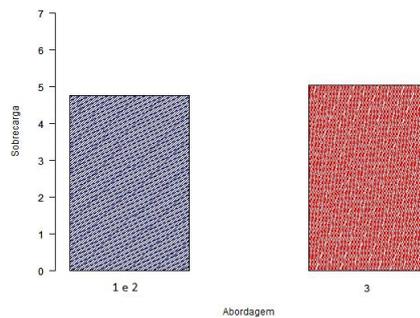


Figura 5.15: Sobrecarga no cenário pentagonal

valores para a Abordagem 3 praticamente não se alteram se comparados com os valores do cenário pentagonal, pois os VANTs têm de percorrer toda trajetória passando por todos os PoIs. A Abordagem 1 apresenta um valor um pouco mais elevado do que o da Abordagem 3, pois cada VANT percorre uma trajetória até um determinado PoI e retorna ao CC. Com isso, pode ocorrer de uma mensagem ser encaminhada para um dado nó e essa mensagem levar um tempo maior para ser encaminhada por outro VANT de forma adequada. Na Abordagem 2, fica ainda mais evidente o efeito desse “isolamento” de PoIs em função da trajetória dos VANTs, apresentando assim o maior valor de sobrecarga das três abordagens para esse cenário.

A Figura 5.17 nos traz mais uma confirmação de como a trajetória dos VANTs, a depender do posicionamento dos PoIs no cenário, influencia diretamente no desempenho total da rede no que diz respeito à taxa de entrega. No cenário pentagonal, nas três abor-

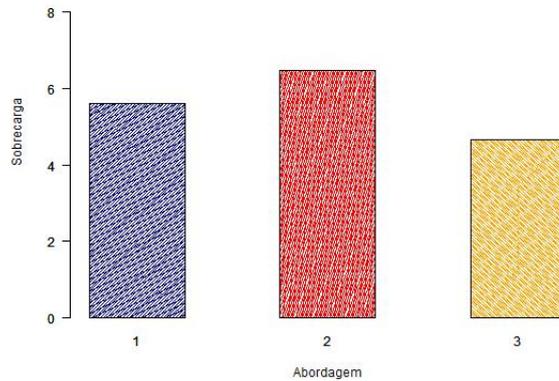


Figura 5.16: Sobrecarga no cenário em linha

dagens, os VANTs percorrem todos os PoIs, e a menor trajetória de cada um deles nas abordagens 1 e 2 já garante alguma vantagem com relação à Abordagem 3.

Corroborando com esse fato, temos na Figura 5.18 os valores para a taxa de entrega de mensagens de cada abordagem no cenário linear. Aqui fica ainda mais evidente que a Abordagem 2 apresenta uma maior dificuldade na entrega das mensagens, conforme discutido mais acima, seguido pela Abordagem 1. A Abordagem 3 se sai um pouco melhor, apresentando a maior taxa de entrega dentre as três abordagens, conforme esperado em função da trajetória dos VANTs.

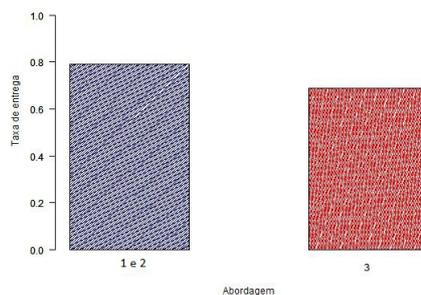


Figura 5.17: Taxa de entrega no cenário pentagonal

Da mesma forma, o atraso médio entre mensagens (AMeM), que é uma métrica proposta neste trabalho e que se encontra descrita na Seção 6.2, também é diretamente afetado pelo comprimento total de cada trajetória de cada VANT. Na Figura 5.19, relacionada ao cenário pentagonal, vemos que a Abordagem 3, com uma trajetória única e bem maior do que a dos VANTs nas outra duas abordagens, apresenta um valor maior de AMeM. Em contrapartida, na Figura 5.20, referente ao cenário em linha, vemos que, embora a

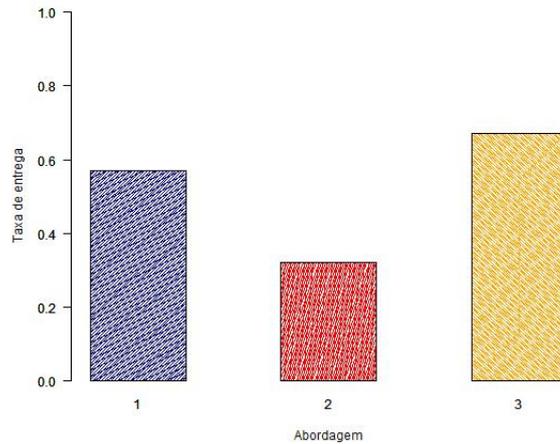


Figura 5.18: Taxa de entrega no cenário em linha

trajetória para os VANTs da Abordagem 3 seja bem maior do que aquela da Abordagem 2, o valor de AMeM da Abordagem 2 é muitas vezes maior do que os das abordagens 1 e 3. Isso reforça a idéia de que, mesmo com trajetórias menores, o fato de nem todos os VANTs terem livre acesso a todos os nós da rede impacta de forma direta no AMeM, principalmente para aqueles nós que estejam mais afastados.

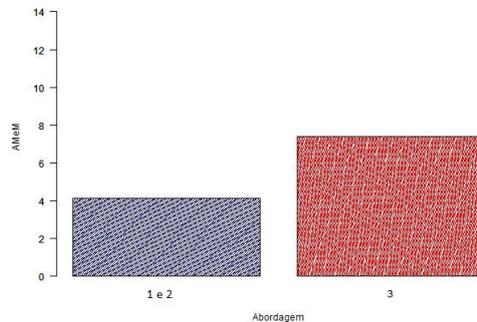


Figura 5.19: AMeM no cenário pentagonal

Comparando os resultados obtidos com as simulações e os resultados teóricos esperados no primeiro caso, onde temos os PoIs dispostos de forma pentagonal, o valor de r é aproximadamente de 2.178 m e o de D é de 2.710 m, sendo a velocidade de deslocamento do VANT da ordem de 10 m/s. Nesse caso, observamos que, em média, a latência esperada nas abordagens 1 e 2 seria dada por r/V_{vant} , onde V_{vant} é a velocidade de deslocamento dos VANTs. Já para a Abordagem 3, esse valor seria dado por $((2D + r)/V_{\text{vant}})/2$. Verifica-se, então, que esses valores são bem próximos daqueles apresentados na Figura 5.13. A Tabela 5.1 apresenta esses valores.

Para os valores de AMeM deste cenário, nas abordagens 1 e 2 esperamos ter 5 mensa-

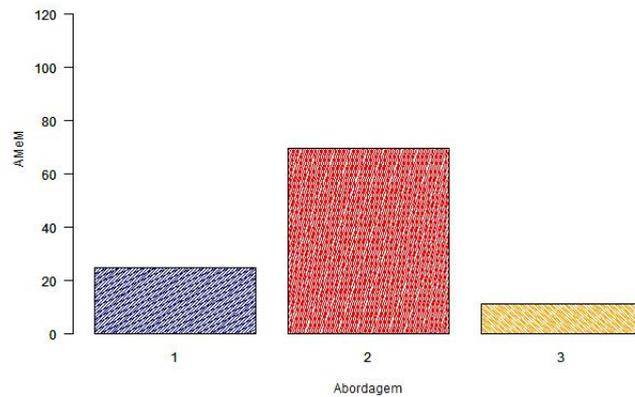


Figura 5.20: AMeM no cenário em linha

Comparativo tempo de entrega de mensagens teórico x simulado			
Abordagens	1	2	3
Teórico	217,8	217,8	379,9
Simulado	243,1	243,1	382

Tabela 5.1: Comparativo dos tempos de entrega de mensagens (teórico vs simulado) nas três abordagens, mapa pentagonal

gens chegando dentro de um tempo determinado pela distância r e a velocidade de voo do VANT, ou seja, $(r/V_{VANT})/5$. Na Abordagem 3 teremos casos onde ocorrerá apenas uma mensagem recebida em um tempo dado pela distância r e outros casos, mais extremos, onde teremos cinco mensagens recebidas dentro de um intervalo de tempo proporcional à trajetória total, ou seja, $(2r + 4D)$. O ponto médio entre esses valores serve como estimativa do valor esperado para o AMeM nessa abordagem. Os comparativos podem ser visualizados na Tabela 5.2, onde se verifica a proximidade entre os valores teóricos e simulados.

Comparativo AMeM teórico x simulado			
Abordagens	1	2	3
Teórico	4,35	4,35	5,21
Simulado	4,10	4,10	7,37

Tabela 5.2: Comparativo do AMeM (teórico vs simulado) nas três abordagens, mapa pentagonal

Já no mapa com os pontos dispostos em linha, o valor de d é de 2.216 m. Nesse caso, a latência média esperada para a Abordagem 1 pode ser estimada como sendo o ponto médio entre o pior e o melhor caso, ou seja, $(d_{p0I1} + d_{p0I5})/2$. Para a Abordagem 2,

temos um cálculo parecido com o da Abordagem 1, sendo que, no pior caso, o tempo de intercomunicação pode chegar a quatro vezes o melhor caso, ou seja, $(d_{PoI1} + (4 * d_{PoI5}))/2$. Na Abordagem 3, o tempo médio de entrega de mensagens pode ser estimado como sendo a média das distâncias entre o PoI mais próximo e o PoI mais distante, ou seja, $(d_{PoI5} + d_{PoI1})/2$. Os valores apresentados na Figura 5.14 estão bem próximos desses valores teóricos e o comparativo entre eles pode ser visualizados na Tabela 5.3.

Comparativo tempo de entrega de mensagens teórico x simulado			
Abordagens	1	2	3
Teórico	332,4	277,0	664,8
Simulado	308,2	324,4	757

Tabela 5.3: Comparativo dos tempos de entrega de mensagens (teórico vs simulado) nas três abordagens, mapa linear

Também com relação ao cenário em linha, o valor estimado do AMeM para a Abordagem 1 é dado pelo tempo relativo à distância d , enquanto que para a Abordagem 2 esse tempo será estimado como sendo o ponto médio entre o melhor caso definido pela distância d e o pior caso definido pela distância total até o PoI_5 , ou seja, $(6 * d)/V_{VANT}$. Na Abordagem 3, como os VANTs são igualmente espaçados, teremos um VANT chegando no mesmo intervalo de tempo dado por d para a Abordagem 1. Contudo, após a primeira volta completa no trajeto, deveremos ter pelo menos cinco mensagens entregues por cada um desses VANTs, logo teremos $(d/V_{VANT})/5$. Os comparativos entre os valores teórico e simulado podem ser visualizados na Tabela 5.4, onde se verifica a proximidade entre eles.

Comparativo tempo de entrega de mensagens teórico x simulado			
Abordagens	1	2	3
Teórico	22,16	66,48	7,38
Simulado	24,9	69,50	11,08

Tabela 5.4: Comparativo do AMeM (teórico vs simulado) nas três abordagens, mapa linear

Cabe ressaltar que os valores teóricos obtidos para os dois casos analisados nesta seção consideram situações de melhor e pior caso. Todavia, as simulações não consideram apenas esses resultados e, portanto, as estatísticas contemplam todas as situações ocorridas. A partir da análise teórica, utilizou-se o ponto médio entre os valores de pior e melhor caso como estimativa das médias a serem obtidas via simulação, para efeito de comparação. Isso explica as pequenas discrepâncias entre os valores numéricos apresentados nas tabelas.

6. Análise Experimental

Neste capítulo, abordam-se os métodos utilizados nos experimentos realizados e seus resultados. São elencadas as ferramentas usadas, formas como os testes foram implementados e as métricas utilizadas para avaliação. Os diversos experimentos, de uma forma geral, foram divididos por objetivo, cenários, tipos de solução e métricas de desempenho, para fins de análise.

Inicialmente foram avaliadas quatro heurísticas de solução para o TSP. Para tal, quatro mapas relacionados com diferentes cenários de emergência foram avaliados, cada qual com um determinado número de PoIs. A solução obtida equivale à rota a ser usada por um único VANT para percorrer todos os PoIs e retornar ao CC. A implementação de cada heurística foi validada usando-se a biblioteca TSPLib, (Reinelt, 1991).

Posteriormente, as abordagens de solução para múltiplos VANTs, mostradas no Capítulo 5, foram avaliadas. Para tal, um único mapa referente a um desastre ocorrido em 2011 na região de Nova Friburgo - RJ foi usado. Desse único mapa, 2 cenários foram gerados: um contendo os 10 PoIs obtidos a partir dos dados da Defesa Civil, referentes ao respectivo desastre, e outro contendo 20 PoIs obtidos a partir de um gerador aleatório de pontos de interesse, que usa dados de geolocalização e área de abrangência para a geração desses PoIs.

As três abordagens de solução propostas foram avaliadas variando-se, para cada um dos dois cenários, o número de VANTs, os protocolos DTN e o tipo de informação circulando pelos nós do cenário. Dois tipos de informação foram avaliados, cada qual representado pelo tamanho das mensagens circulando pela rede. O primeiro tipo refere-se a trocas de mensagens contendo áudio e imagens, cujos tamanhos foram variados aleatoriamente entre 500 kBytes e 1 MByte. O segundo tipo agrega também o envio de mensagens contendo vídeos com qualidade VGA (640x480 pixels) que podem ter uma duração de até 30 segundos, onde esse limite é representado por uma mensagem de 20 MBytes.

As seguintes métricas de desempenho foram usadas para avaliação comparativa das abordagens de solução: taxa média de sucesso na entrega de mensagens aos destinos, atraso médio para a entrega de mensagens aos destinos, sobrecarga média de mensagens geradas na rede, e intervalo de tempo entre entregas de mensagens no destino. Para os experimentos que emularam a troca de mensagens contendo áudio e imagens, as métricas de desempenho foram obtidas para mensagens geradas pelos PoIs com destino ao CC e vice-versa. Já para os experimentos que emularam a troca de mensagens contendo vídeo de curta duração, essas mesmas métricas foram obtidas para mensagens geradas por um PoI específico com destino ao CC.

Para simular as DTNs dos experimentos, foi usada a ferramenta The One (Keränen, Ott, & Kärkkäinen, 2009). Os mapas de localização usados no The One foram importados em padrão aberto a partir da ferramenta OpenJunp (Steiniger & Hunter, 2012). Os resultados dos agrupamentos obtidos com o k-means se valeram da implementação desse algoritmo na ferramenta Weka (Bouckaert et al., 2013). Já os algoritmos de pares mais próximos, para obtenção do PTTeC, e de Kruskal, para cálculo da árvore geradora mínima, usaram implementações próprias.

As seções a seguir fornecem maiores detalhes sobre os experimentos realizados e analisa seus resultados.

6.1 Parâmetros de simulação

Nas simulações realizadas neste trabalho através da ferramenta The One, cada mensagem gerada possui uma origem e um destino. Como é intenção deste trabalho avaliar as soluções propostas na comunicação entre CC e PoIs, foram geradas apenas mensagens partindo dos PoIs para o CC e do CC para os PoIs. A frequência de geração dessas mensagens se dá de duas formas, conforme o experimento realizado. Na primeira, mensagens são geradas a cada 30 segundos com origem e destino aleatórios dentre os possíveis pares origem-destino do cenário simulado - ou seja, de algum PoI para o CC ou do CC para algum PoI. Na segunda, mensagens são geradas cada vez que um VANT passa por um determinado PoI, tendo esse PoI como origem e o CC como destino.

Conforme o experimento, o tamanho das mensagens pode variar entre 500 kBytes e 1 MByte ou entre 500 kBytes e 20 Mbytes. No caso delas serem geradas cada vez que um VANT passa por um determinado PoI, fixa-se o tamanho das mensagens em 20 MBytes para representar a captura de 30 segundos de vídeo em resolução VGA pelo VANT.

Com relação aos VANTs, a velocidade de deslocamento é fixada em 30 Km/h e altitude é constante, a 100 metros do solo. Com relação ao ambiente de rede sem fio, para todos os nós foram utilizados rádios padrão IEEE 802.11 configurados para um alcance de 100 metros e capacidade de transmissão de 54 Mbps. Os *buffers* de mensagens de cada nó (VANT, PoI ou CC) são configurados com o tamanho máximo permitido pelo The One: 2.144 MBytes.

O tempo de partida dos VANTs depende da abordagem usada. Na Abordagem 1, todos os VANTs partem do CC no início da simulação. Na Abordagem 2, no início da simulação cada VANT parte ou do CC ou do PTTeC mais próximo do CC. Na Abordagem 3, os VANTs partem do CC em sequência no início da simulação, com o intervalo de tempo entre eles dado pela razão entre o tempo para percorrer o ciclo calculado pela solução do TSP e o número de VANTs.

Sempre que um VANT passa por um PoI ou pelo CC, ele dá três voltas circulares em torno desse ponto. Esse círculo tem raio de 65 metros, o que resulta num tempo total de cerca de 2,5 minutos orbitando em torno de cada PoI ou CC.

6.2 Métricas de avaliação

Conforme já mencionado, as métricas de desempenho usadas para avaliar as soluções propostas foram: (i) a taxa média de sucesso na entrega de mensagens aos destinos, aqui denominada como *taxa de entrega*; (ii) o atraso médio para a entrega de mensagens a seus destinos, denominado como *latência*; (iii) a sobrecarga média de mensagens geradas na rede, ou *overhead*; e, (iv) o intervalo de tempo entre entregas de mensagens no destino, aqui chamado de *atraso médio entre mensagens* e referenciado pela sigla AMeM.

Dessas métricas, as três primeiras são comuns na avaliação de protocolos de roteamento para DTNs. Já a métrica AMeM é uma proposta inédita deste trabalho para fins de avaliação de soluções DTN para cenários de emergência, até onde foi possível verificar na literatura relacionada.

A taxa de entrega é calculada computando-se a fração média do número de mensagens entregues nos seus destinos, em relação ao número de mensagens geradas pelos diferentes nós da rede no experimento. A latência corresponde ao tempo médio que as mensagens levaram desde suas origens até suas recepções nos respectivos destinos. Portanto, só leva em consideração as mensagens que conseguiram ser entregues. A sobrecarga, ou *overhead*, representa o excesso de réplicas de mensagens geradas pelo protocolo de rote-

amento da DTN. No The One, esta métrica é calculada pela razão média entre o número de réplicas de mensagens geradas na DTN para cada mensagem entregue. Portanto, a ausência de réplicas para as mensagens entregues resulta em um *overhead* de valor 1, conforme mostra a Equação 6.1:

$$\text{Overhead} = \frac{(N_{\text{replicas}} - N_{\text{entregues}})}{N_{\text{entregues}}} \quad (6.1)$$

onde N_{replicas} é o número de mensagens enviadas ou retransmitidas na DTN e $N_{\text{entregues}}$ é o número de mensagens entregues nos seus destinos.

O atraso médio entre mensagens, ou AMeM, é uma métrica que se propõe a verificar como os protocolos de roteamento DTN, conjugado às soluções propostas, influenciam na frequência com que as mensagens são entregues em seus destinos. Seu cálculo corresponde à média dos intervalos de tempo entre duas entregas subsequentes de mensagens num mesmo destino. Neste trabalho, a depender do experimento, essa métrica foi computada para todos os intervalos de entrega ocorridos na DTN como um todo que tenham como destino o CC ou para um fluxo único de mensagens entre um PoI específico e o CC.

Em se tratando de operações de salvamento em cenários de emergência, a métrica AMeM pode indicar a frequência com que o CC ou as equipes de resgate vão sendo atualizadas com relação às situações em cada PoI. Caso os VANTs sejam usados para transportar vídeos de monitoramento de uma dada localização, por exemplo, quanto menor o AMeM mais frequente será a entrega de mensagens contendo esses vídeos e, consequentemente, mais contínuo será o acompanhamento do CC quanto à variação da situação no respectivo local.

6.3 Avaliação de heurísticas de TSP

Quatro heurísticas para solução do TSP foram avaliadas neste trabalho: colônia de formigas (*ant colony*), algoritmo de Christofides, algoritmo genético (*genetic algorithm*), e vizinhos mais próximos (*nearest neighbors*). Para o algoritmo genético, foi adotado um tamanho populacional e de mutações de 100 gerações para cada parâmetro. No algoritmo de colônia de formigas, foi utilizada uma taxa de degradação de feromônio de 50%, uma taxa de 1% de escolha aleatória da próxima cidade, a cada rodada, e 2000 iterações.

Esta seção traz uma avaliação comparativa entre essas heurísticas, de modo a selecionar qual heurística melhor se adequa às soluções aqui propostas para cenários de emergência.

6.3.1 Validação das implementações usadas

Inicialmente, as implementações de cada heurística foram validadas através de instâncias de referência extraídas da biblioteca *online TSPLib*. Trata-se de um repositório em que são disponibilizadas diversas instâncias para o TSP, com suas respectivas soluções ótimas conhecidas (Reinelt, 1991). As instâncias de referência utilizadas foram **att48**, **fri26** e **gr17**. A Tabela 6.1 apresenta as características dessas instâncias.

Os resultados retornados para as implementações das quatro heurísticas usadas neste trabalho, tendo como entrada as instâncias de referência da Tabela 6.1, coincidiram com os resultados observados na TSPLib. Portanto, consideram-se válidas essas implementações.

Instâncias de Referência - TSPLIB	
Nome	#cidades
<i>att48</i>	48
<i>fri26</i>	26
<i>gr17</i>	17

Tabela 6.1: Instâncias de referência

6.3.2 Cenários de avaliação das heurísticas

Validadas as implementações, nesta segunda etapa foram selecionados quatro cenários de emergência para aplicação das heurísticas. O objetivo desta avaliação é a de obter, para cada heurística, a rota cíclica a ser usada por um único VANT para percorrer todos os PoIs distribuídos no cenário.

Os cenários de emergência utilizados nesta análise são mostrados na Figura 6.1, com seus respectivos PoIs localizados em cada mapa. Esses mapas são representativos de regiões que estiveram em situação de emergência e foram extraídos de trabalhos que tratam de cenários de emergência (Mete & Zabinsky, 2010; Sheu, 2007; Hasnain, Hubbard, & Cunningham, 2016; de Albuquerque et al., 2014), ainda que o objeto de estudo desses trabalhos não seja o mesmo do presente trabalho. A Tabela 6.2 apresenta a quantidade de PoIs presentes em cada um dos mapas analisados, essas quantidades excluem o CC.

6.3.3 Resultados obtidos com as heurísticas

As tabelas 6.3 e 6.4 mostram os custos das trajetórias, calculadas em metros e em minutos, obtidas com cada heurística. Conforme podemos observar, a heurística baseada

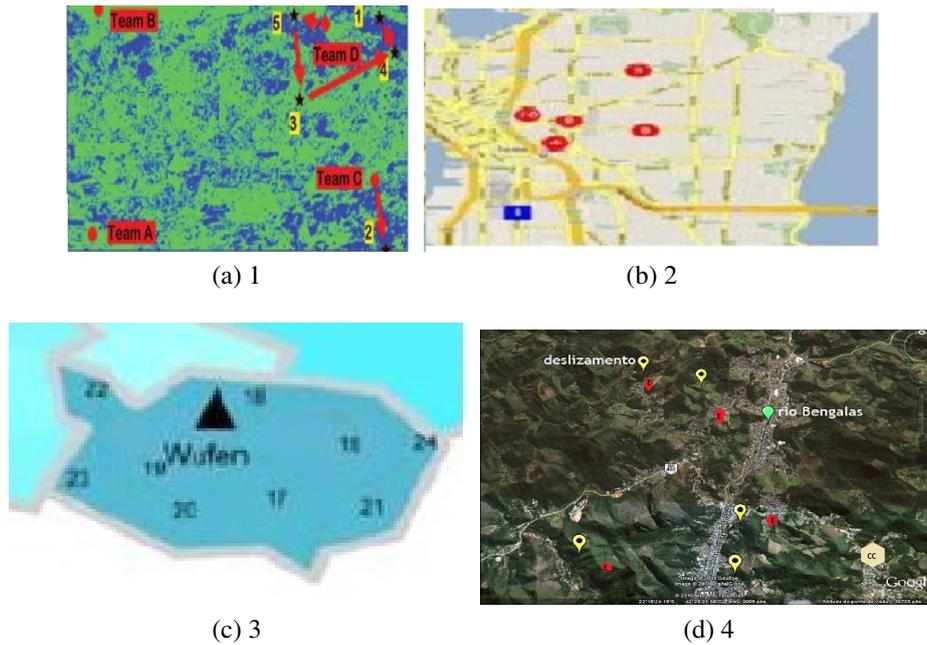


Figura 6.1: Mapas dos cenários de emergência usados na avaliação

Cenários de emergência (Figura 6.1)	
#ID	#PoIs
1	9
2	6
3	10
4	11

Tabela 6.2: Número de PoIs para cada cenário de emergência

em colônia de formigas obtém soluções de menor custo em todas as instâncias analisadas, seguida de perto pelo algoritmo de Christofides. O algoritmo de Christofides apresenta a maior diferença comparativa para a melhor solução somente para o Cenário 3, sem no entanto distanciar-se de sua premissa de oferecer uma solução, no pior dos casos, dentro de uma relação de $3/2$ da solução ótima. Ou seja, uma solução cujo custo será, no máximo, uma vez e meia pior do que o custo da melhor solução possível para aquela instância.

Distâncias (m) x Cenário x Heurística				
Cenários	1	2	3	4
<i>Ant colony</i>	1.910	5.035	37.420	21.191
<i>Christofides</i>	1.970	5.215	50.680	21.191
<i>Genetic alg.</i>	2.440	5.215	63.960	33.831
<i>Nearest neig.</i>	2.100	5.880	45.160	21.841

Tabela 6.3: Distâncias de cada trajetória em metros

Tempo (min) x Cenário x Heurística (VANT a 30 km/h)				
Cenários	1	2	3	4
<i>Ant colony</i>	3,82	10,07	74,84	42,38
<i>Christofides</i>	3,94	10,43	101,36	42,38
<i>Genetic alg.</i>	4,88	10,43	127,92	67,66
<i>Nearest neig.</i>	4,20	11,76	90,32	43,68

Tabela 6.4: Tempo para percorrer cada trajetória em minutos

Tempo para cálculo da trajetória (ms) x Cenário x Heurística				
Cenários	1	2	3	4
<i>Ant colony</i>	158,664	85,562	180,847	251,808
<i>Christofides</i>	1,727	1,637	1,764	1,877
<i>Genetic</i>	258,458	235,334	235,919	231,906
<i>Nearest</i>	1,753	1,163	1,562	1,704

Tabela 6.5: Tempo para calcular cada trajetória em milisegundos

Podemos observar ainda que o algoritmo genético apresenta os piores resultados para todas as instâncias e que o algoritmo do vizinho mais próximo, por vezes, aproxima-se dos melhores resultados apresentados pelos algoritmos de colônia de formigas e Christofides.

A Tabela 6.5 mostra o tempo que cada algoritmo levou para calcular a solução apresentada para cada uma das instâncias. Neste caso, os algoritmos de Christofides e do vizinho mais próximo apresentam os menores tempos para o cálculo da solução, enquanto os algoritmos de colônia de formigas e genético necessitam de tempo muitíssimo superior para calcularem a solução para esses mesmos cenários. De forma geral, podemos concluir que o algoritmo de Christofides apresenta a melhor relação custo/benefício, pois apresenta uma solução bastante próxima da melhor solução obtida pelos quatro algoritmos a um custo de tempo de processamento consideravelmente baixo. Para os cenários analisados, o algoritmo de Christofides apresenta, para o Cenário 3, um aumento no tempo total de deslocamento através da rota calculada de cerca de 35%, mas com uma redução do tempo de cálculo de mais de 100 vezes se comparado com o algoritmo de colônia de formigas, que é o que apresenta as rotas de menor custo geral.

Para efeitos de avaliação, o número de iterações do algoritmo de colônia de formigas foi alterado com o objetivo de se verificar qual o número mínimo de iterações que permitiria uma melhor performance do algoritmo quanto ao tempo para encontrar uma solução, sem que a qualidade dessa solução fosse degradada. Para as instâncias analisadas, o valor encontrado foi de 10% do valor utilizado para todos os testes, ou seja, 20 iterações. Com esse baixo número de iterações, o algoritmo teve, conforme esperado, uma diminuição

Tempo para cálculo da trajetória (ms) x PLI x Christofides					
Qtde.de nós na instância	11	20	60	128	200
<i>PLI</i>	25	31	310	515	62.623
<i>Christofides</i>	5	6	15	18	150

Tabela 6.6: Comparativo entre PLI e Christofides em milisegundos

linear no tempo de cálculo das soluções, caindo portanto para cerca de 10% dos valores apresentados. Vale ressaltar que, embora uma considerável melhora nos tempos de execução do algoritmo tenha sido observada, não se pode afirmar que a qualidade da solução se manterá para outras instâncias. Além disso, os algoritmos do vizinho mais próximo e Christofides ainda apresentam tempos de execução para encontrar uma solução muitas vezes inferior.

Por fim, uma outra forma de resolver o TSP é com a utilização da técnica de programação linear inteira (PLI), que fornece solução ótima. Com o intuito de avaliar também essa solução, realizou-se sua implementação seguindo o exemplo de solução para TSP utilizando o resolvidor matemático Gurobi (Gurobi Optimization, 2018), apresentado em (Gurobi, 2018). Com esta implementação, obtivemos resultados ótimos para os cenários estudados, ou seja, valores idênticos aos obtidos com o algoritmo de colônia de formigas para o custo das rotas. Os tempos de processamento da solução via PLI para algumas instâncias encontram-se plotados na Tabela 6.6 em conjunto com os obtidos pelo algoritmo de Christofides.

A depender da dinâmica de como o posicionamento dos PoIs variam num cenário de desastre, ou mesmo da possibilidade de surgimento de novos PoIs durante a fase de desastre ou mesmo no pós-desastre, um tempo de solução da ordem de poucos minutos pode ser tolerado para a obtenção de um resultado ótimo para o TSP. Esse “recálculo”, caso necessário, ocorreria durante as órbitas dos VANTs sobre o CC, que então reprogramaria as respectivas novas rotas dos VANTs. Entretanto, a solução por PLI pode não ser escalável o suficiente para a solução de alguns problemas bem maiores, apesar de raros, resultantes de desastres que impliquem em um número muitíssimo grande de PoIs a serem percorridos por um único VANT.

Uma vez que o objetivo deste trabalho é o de buscar uma solução adequada ao tamanho de quaisquer cenários de emergência, onde a quantidade de PoIs pode crescer bastante dependendo do tipo de desastre ocorrido, optou-se por utilizar o algoritmo de Christofides nas soluções de TSP empregadas nas abordagens 1, 2 e 3. Os resultados e análises para

essas abordagens de solução são mostradas nas seções seguintes.

6.4 Resultados para as abordagens propostas

As abordagens propostas neste trabalho foram simuladas para dois cenários de emergência relativos ao desastre ocorrido em Nova Friburgo - RJ, no ano de 2011 (de Albuquerque et al., 2014). Um dos cenários é o mesmo já utilizado neste trabalho, retratando na íntegra o desastre ocorrido. Conta com 10 PoIs localizados conforme informações obtidas da Defesa Civil da região do desastre, além do CC. O segundo cenário conta com 20 PoIs aleatoriamente espalhados por esse mesmo mapa de Nova Friburgo, sendo que as geolocalizações desses PoIs foram dadas pela ferramenta Geomidpoint (GeoMidpoint, 2019).

Para cada um dos cenários, em cada abordagem, os quatro protocolos de roteamento DTN citados neste trabalho foram simulados: *Epidemic*, *Maxprop*, *Prophet* e *Spray and Wait*. Em cada caso, o cenário com 10 PoIs foi analisado para uma quantidade de dois, quatro e dez VANTs, e o cenário com 20 PoIs foi analisado para uma quantidade de 9 e 20 VANTs.

Cada caso contou com 10 rodadas de simulação com duração de cerca de 7200 segundos (tempo simulado). Para os cenários com 10 PoIs, o número de mensagens geradas fica em torno de 500. Para o cenário com 20 PoIs e 9 VANTs, o número de mensagens fica em torno de 600, e com 20 PoIs e 20 VANTs fica em torno de 1000. O intervalo de confiança calculado foi de 95% utilizando a tabela *t-student*.

Para cada caso - ou seja, para cada abordagem em um dado cenário com um dado número de VANTs e usando um dado protocolo de roteamento DTN -, dois tipos de aplicação foram representados através dos valores usados para os tamanhos de mensagem.

A primeira aplicação emula trocas de mensagens contendo áudio e imagens, nas quais as comunicações são realizadas entre PoIs e CC, e vice-versa (nunca entre dois PoIs quaisquer). Nesse caso, as mensagens possuem tamanho aleatório variando entre 500 KBytes e 1 MByte e são geradas deterministicamente a cada 30 segundos. O sentido da mensagem (se indo para o CC ou vindo do CC) e o respectivo PoI, de origem ou destino, são aleatoriamente escolhidos. A avaliação desses casos, para essa aplicação, é realizada usando-se as quatro métricas citadas na Seção 6.2, calculadas a partir de todas as mensagens que circularam pela rede.

A segunda aplicação emula mensagens que podem também carregar vídeos de curta

duração. Nesse caso, o tamanho máximo da mensagem é de 20 MBytes, o que representa cerca de 30 segundos de um vídeo com qualidade VGA (640 x 480 pixels). Da mesma forma, as mensagens somente podem ser geradas dos PoIs para o CC e vice-versa, com PoIs aleatoriamente escolhidos a cada 30 segundos, sendo que desta vez seus tamanhos variam aleatoriamente entre 500 kBytes e 20 MBytes. Entretanto, na emulação desta aplicação, um único PoI é selecionado para gerar apenas mensagens de 20 MBytes para o CC, sendo que a métrica de desempenho AMeM passa a ser calculada apenas a partir dessas mensagens. Além disso, o momento de geração dessas mensagens passa a ser somente quando um VANT sobrevoa esse PoI. Dessa forma, busca-se neste caso também verificar, através da métrica AMeM, como fica a qualidade percebida pelo CC com relação a mensagens de vídeo obtidas a partir de ações de monitoramento aéreo de um dado PoI. O PoI escolhido é aquele cuja distância de voo para o CC mais se aproxima da distância média calculada para o TSP, numa solução envolvendo apenas um VANT.

6.4.1 Resultados para a Abordagem 1

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos para a Abordagem 1. A Tabela 6.7 apresenta os resultados para o cenário com 10 PoIs e mensagens contendo áudio e imagens. A Tabela 6.8 apresenta os resultados para o cenário com 10 PoIs e mensagens podendo conter vídeos. As figuras 6.2 a 6.7 apresentam graficamente valores contidos nessas tabelas para cada métrica de desempenho em cada cenário de aplicação.

Métricas					
VANTs	Protocolos	Latência (s)	Overhead	Taxa de entrega	AMeM (s)
2	Epidêmico	499 ±12,11	10 ±0,67	0,92 ±0,01	2,36 ±0
	Maxprop	498 ±12,26	6 ±0,09	0,92 ±0,01	2,38 ±0
	Prophet	498,55 ±11,82	1,73 ±0,21	0,92 ±0,01	2,29 ±0,03
	Spray&Wait	498,8 ±12,23	2,86 ±0,04	0,92 ±0,01	2,44 ±0
4	Epidêmico	311,11 ±5,48	12,78 ±0,13	0,95 ±0	2,36 ±0
	Maxprop	310,65 ±5,52	7,59 ±0,09	0,96 ±0	2,30 ±0
	Prophet	311,29 ±5,54	3,83 ±0,11	0,95 ±0	2,26 ±10 ⁻³
	Spray&Wait	292,86 ±5,27	3,98 ±0,05	0,85 ±0,01	2,74 ±0
10	Epidêmico	196,15 ±4,64	18,9 ±0,04	0,97 ±0	0,98 ±0
	Maxprop	196,12 ±4,63	12,35 ±0,08	0,97 ±0	0,98 ±10 ⁻⁴
	Prophet	196,76 ±4,45	9 ±0,25	0,96 ±0	0,97 ±10 ⁻³
	Spray&Wait	172,79 ±4,76	5,19 ±0,06	0,77 ±0	1,39 ±0

Tabela 6.7: Abordagem 1 no cenário com 10 PoIs, mensagens de áudio ou imagens

Nesta abordagem podemos observar uma redução acentuada na latência geral do cenário a medida que o número de VANTs cresce, conforme mostrado na Figura 6.2, Esse

Métricas					
VANTs	Protocolos	Latência (s)	Overhead	Taxa de entrega	AMeM (s)
2	Epidêmico	502 ±5,94	9,3 ±0,55	0,92 ±0,01	1,74 ±0
	Maxprop	502,4 ±6,37	6,07 ±0,8	0,92 ±0	1,8 ±0
	Prophet	502,33 ±6,38	1,55 ±0,2	0,92 ±0,01	1,71 ±0,04
	Spray&Wait	502,08 ±6	2,86 ±0,03	0,92 ±0	1,76 ±0
4	Epidêmico	310 ±6	12,54 ±0,19	0,95 ±0	1,28 ±0
	Maxprop	308,6 ±6,35	7,4 ±0,08	0,95 ±0	1,32 ±0
	Prophet	309,58 ±6,47	3,7 ±0,11	0,95 ±0	1,12 ±10 ⁻³
	Spray&Wait	292,61 ±6,79	3,96 ±0,05	0,85 ±0	1,40 ±0
10	Epidêmico	198,34 ±4,12	18,89 ±0,06	0,97 ±0	0,71 ±0
	Maxprop	197,74 ±3,97	12 ±0,11	0,97 ±0	0,67 ±10 ⁻³
	Prophet	198,68 ±4,1	8,81 ±0,2	0,97 ±0	0,85 ±10 ⁻³
	Spray&Wait	173,46 ±2,55	5,13 ±0,06	0,77 ±0	0,98 ±0

Tabela 6.8: Abordagem 1 no cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio, imagens ou vídeo

comportamento linear e proporcional é esperado, pois o acréscimo de VANTs e a consequente divisão da região em mais áreas torna os percursos entre PoIs e CC cada vez menores.

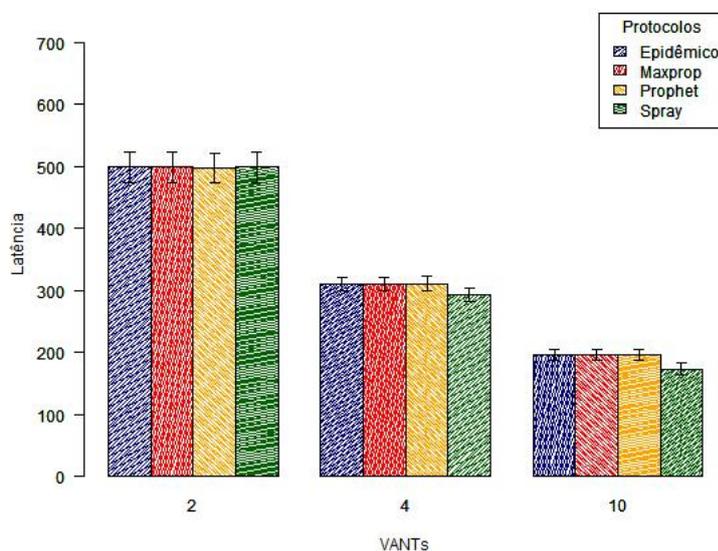


Figura 6.2: Latência para Abordagem 1, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio ou imagens

Com relação à emulação da aplicação contendo áudio, imagens e vídeo, esse comportamento linear e proporcional é confirmado quando se aumenta de 2 para 4 VANTs, conforme mostrado na Figura 6.3, chegando a uma diferença de quase 35%, enquanto que

de 4 para 10 VANTs temos uma redução de 32%.

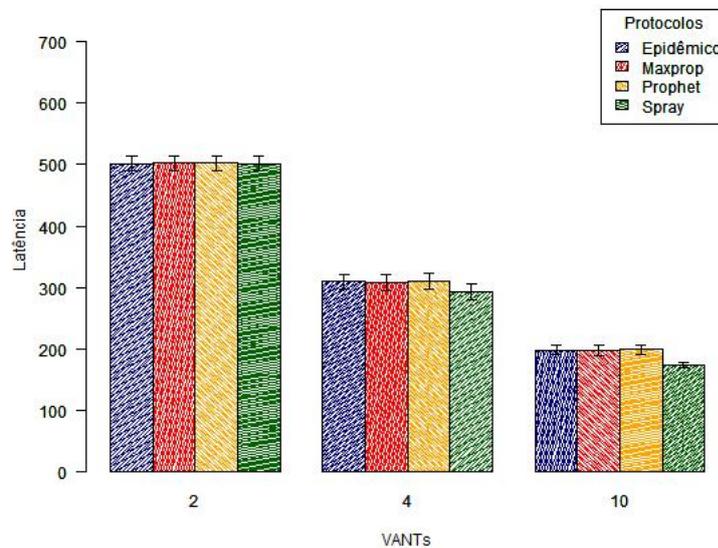


Figura 6.3: Latência para Abordagem 1, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio, imagens ou vídeo

Quase todos os protocolos apresentam resultados muito próximos ou até idênticos de latência, o que se explica pelo cenário ser praticamente composto por trajetos únicos interligados. Essa sutil diferença já é o suficiente para que o protocolo Spray and Wait apresente perdas nas taxas de entrega de mensagens a medida que mais VANTs, e por conseguinte rotas, são acrescentadas ao cenário. Já as taxas dos outros protocolos se mantêm similares, conforme mostrado na Figura 6.4.

Essa perda, que também se reflete de forma sutil na latência para esse protocolo, se explica pela forma como o protocolo funciona. Embora o cenário seja completamente conectado pelo ponto comum, onde todos os VANTs obrigatoriamente devem passar, que é o CC, pode ocorrer de algumas mensagens serem encaminhadas na fase *Spray* desse protocolo para VANTs que nunca cheguem a encontrar o nó de destino dessas mensagens. Por possuírem rotas distintas, nem todos os VANTs visitam todos os PoIs.

Quando mensagens de vídeo maiores passam a trafegar na rede, esse aumento de carga se reflete na taxa de entrega de todos os protocolos, como observado na Figura 6.5. Destacam-se, neste caso, os protocolos Maxprop e Prophet com as maiores taxas de entrega, embora com sutil diferença se comparado com os outros dois protocolos.

Essas mensagens maiores tendem a sobrecarregar os *buffers* dos nós da rede. Assim, quanto mais réplicas das mensagens forem criadas e mais tempo for necessário para a entrega de cada mensagem, mais rapidamente esses *buffers* irão saturar. Logo, menos

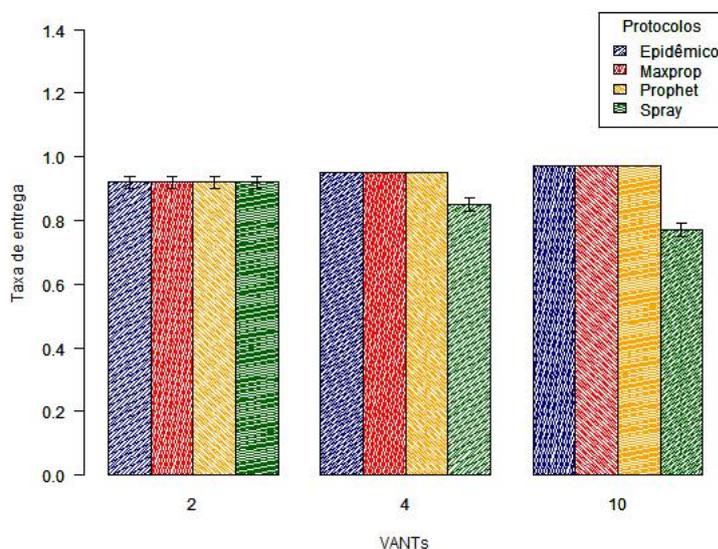


Figura 6.4: Taxa de entrega para Abordagem 1, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio ou imagens

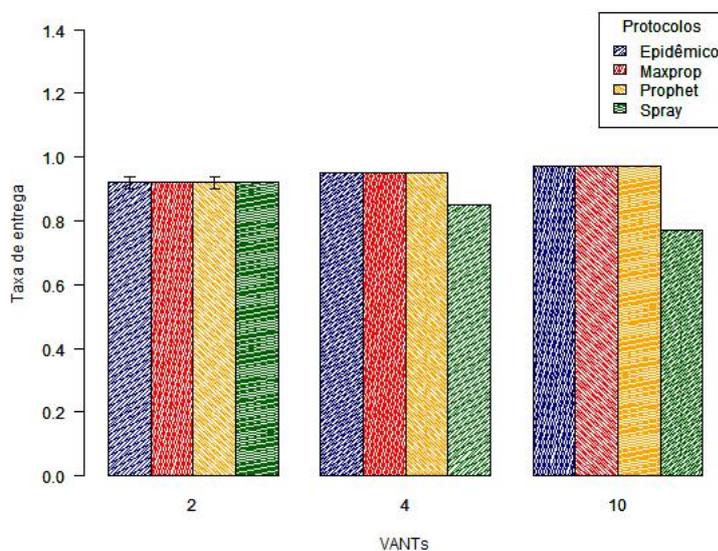


Figura 6.5: Taxa de entrega para Abordagem 1, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio, imagens ou vídeo

mensagens poderão ser entregues. É o que ocorre com os protocolos Epidêmico e Spray and Wait.

Essa pequena diferença na taxa de entrega quase não se reflete nos valores do AMeM, conforme observamos na Figura 6.6. Mesmo que uma quantidade menor de mensagens esteja sendo entregue, um único VANT pode entregar, em um único contato, diversas des-

sas mensagens, garantindo a fluidez das informações. Essa afirmação pode ser confirmada ao analisarmos os valores de AMeM para mensagens de vídeo que chegam ao CC vindas de um único PoI, mostrados na Figura 6.7

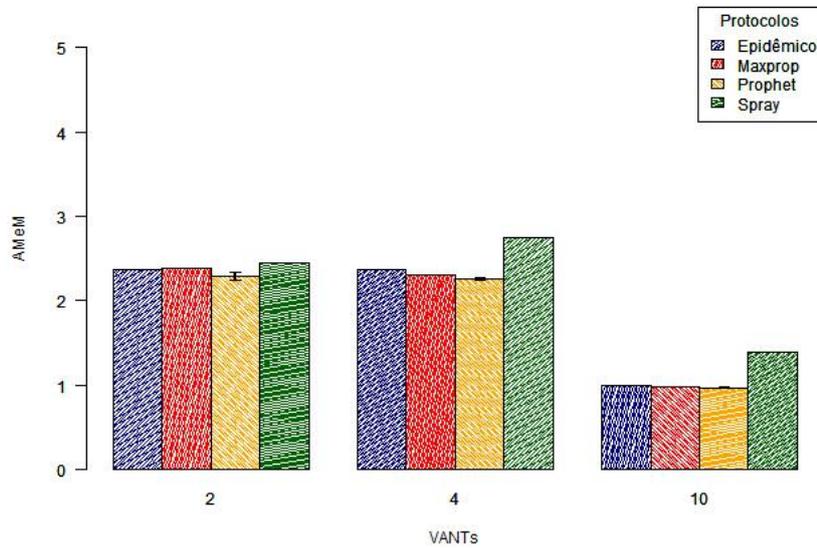


Figura 6.6: AMeM para Abordagem 1, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio ou imagens

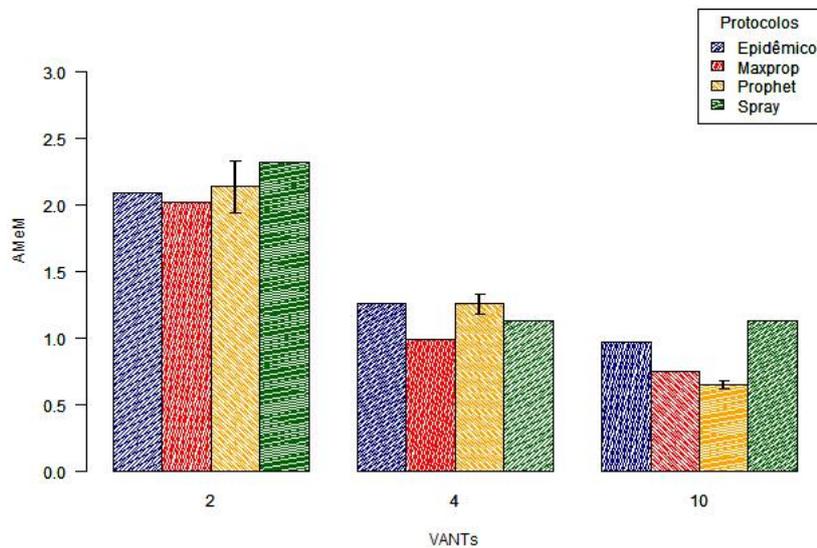


Figura 6.7: AMeM para Abordagem 1, cenário com 10 PoIs, mensagens com video de um único PoI

Podemos ver que existe uma tendência de similaridade entre os protocolos no que tange a uma leve queda nos valores do AMeM, praticamente linear, conforme visto na Figura 6.7. Essa queda sutil se deve às características das rotas geradas, pois como temos

somente um VANT em cada rota, percorrendo o trajeto de forma cíclica e constante, o que muda com a quantidade dos VANTs é somente o comprimento total de cada uma dessas trajetórias.

Os valores de sobrecarga também mantêm a tendência esperada de aumentar conforme o número de VANTs aumenta, conforme mostrado na Figura 6.8. Aqui os protocolos Prophet e Spray and Wait apresentam os menores valores. Contudo, devemos lembrar que o Spray and Wait consegue estes resultados, quase lineares e bastante baixos, controlando explicitamente o número de réplicas das mensagens na rede, o que pode se refletir em uma menor taxa de entrega, como já comentamos.

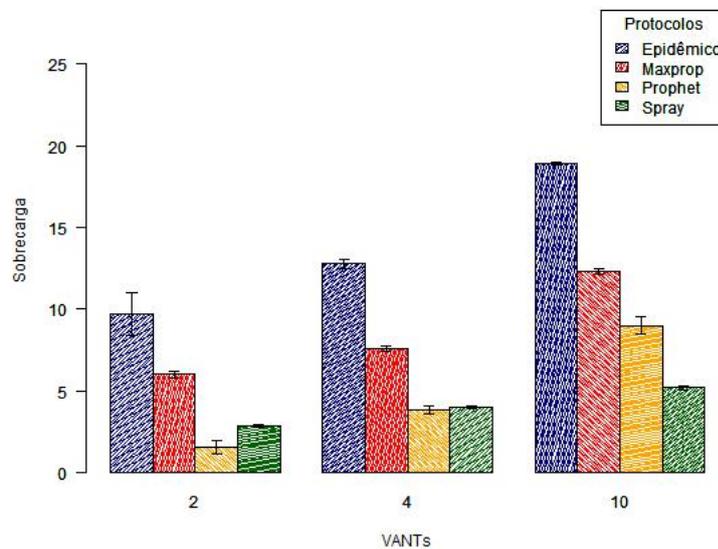


Figura 6.8: Overhead para Abordagem 1, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio ou imagens

A Figura 6.9 apresenta graficamente os valores de *overhead* quando sobrecarregamos a rede com mensagens de vídeo. Confirmamos então a tendência de comportamento linear do protocolo Spray and Wait, com resultados muito similares aos obtidos quando não tínhamos essas mensagens de vídeo circulando na rede. Podemos confirmar ainda que o protocolo Prophet mantém uma baixa sobrecarga sem a desvantagem de maiores perdas na taxa de entrega.

A Tabela 6.9 apresenta os resultados para o cenário com 20 PoIs e mensagens contendo áudio e imagens. A Tabela 6.10 apresenta os resultados para este mesmo cenário com 20 PoIs, porém com mensagens podendo conter vídeos. Por uma questão de organização e melhor visualização do trabalho como um todo, os gráficos para o cenário com 20 PoIs não serão apresentados no corpo deste trabalho.

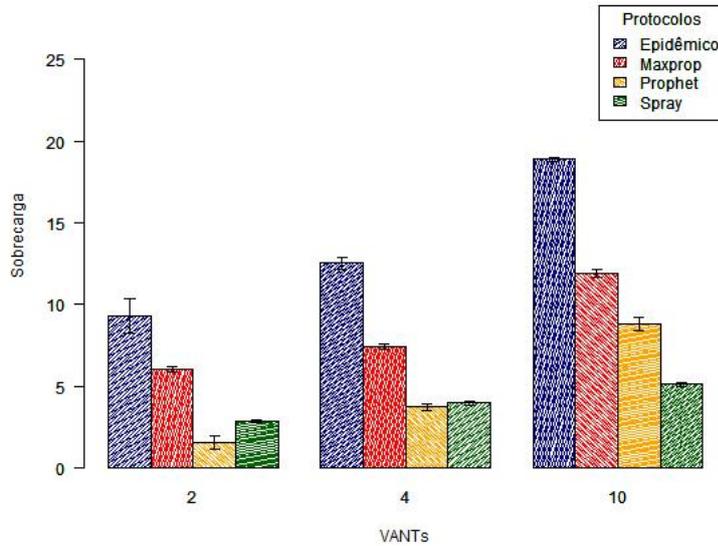


Figura 6.9: Overhead para Abordagem 1, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio, imagens ou vídeo

Métricas					
VANTs	Protocolos	Latência (s)	Overhead	Taxa de entrega	AMeM (s)
9	Epidêmico	115,51 ±1,24	27,4 ±0,09	0,99 ±0,01	0,63 ±0
	Maxprop	115,32 ±1,23	14,55 ±0,09	0,99 ±0,01	0,64 ±0
	Prophet	115,37 ±1,27	7,24 ±0,28	0,99 ±0,1	0,65 ±10 ⁻³
	Spray&Wait	102 ±2,2	4,74 ±0,07	0,67 ±0,01	1,12 ±0
20	Epidêmico	83,9 ±1,05	38,14 ±0,07	0,99 ±0	1,60 ±0
	Maxprop	83,54 ±1	21 ±0,06	0,99 ±0	1,08 ±0
	Prophet	83,3 ±0,93	14,4 ±0,2	0,99 ±0	0,37 ±10 ⁻⁴
	Spray&Wait	76,1 ±1,23	5,99 ±0,06	0,61 ±0,1	0,60 ±0

Tabela 6.9: Abordagem 1 no cenário com 20 PoIs, mensagens com áudio ou imagens

Nesta abordagem, podemos observar que, embora os valores de latência, *overhead* e taxa de entrega apresentem valores substancialmente diferentes daqueles encontrados no cenário com 10 PoIs, a tendência de cada uma dessas métricas se mantém igual, com os mesmos protocolos apresentando os maiores e menores valores.

Destaca-se ainda o fato de, mesmo essa rede sendo formada por uma quantidade maior de nós, essas métricas ainda se mantêm dentro de patamares razoáveis para seu correto funcionamento, mesmo com mensagens de vídeo circulando.

Métricas					
VANTs	Protocolos	Latência (s)	Overhead	Taxa de entrega	AMeM (s)
9	Epidêmico	254 ±11,52	12 ±0,11	0,73 ±0,01	10,22 ±0
	Maxprop	1206,15 ±6,18	8,25 ±0,13	0,82 ±0,01	2,69 ±0,07
	Prophet	146,33 ±2,38	3,21 ±0,05	0,9 ±0,01	10,77 ±2,12
	Spray&Wait	124,35 ±2,99	4,35 ±0,05	0,65 ±0,01	26,35 ±0
20	Epidêmico	235,64 ±10,3	15,63 ±0,42	0,64 ±0,01	20,76±0
	Maxprop	195,35 ±8,75	9,95 ±0,13	0,7 ±0,01	24,61 ±1,03
	Prophet	126,31 ±2,65	5,21 ±0,12	0,84 ±0	44,63 ±10,94
	Spray&Wait	101,37 ±3,56	5,45 ±0,09	0,56 ±0,01	36,84 ±0

Tabela 6.10: Abordagem 1 no cenário com 20 PoIs, mensagens com áudio, imagens e vídeo

6.4.2 Resultados para a Abordagem 2

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos para a Abordagem 2. A Tabela 6.11 apresenta os resultados para o cenário com 10 PoIs e mensagens contendo áudio e imagens. A Tabela 6.12 apresenta os resultados para este mesmo cenário com 10 PoIs, porém com mensagens podendo conter vídeos.

Métricas					
VANTs	Protocolos	Latência (s)	Overhead	Taxa de entrega	AMeM (s)
2	Epidêmico	776,63 ±25,59	11 ±0,16	0,89 ±0	3 ±0
	Maxprop	772,16 ±27,9	7,45 ±0,09	0,89 ±0	2,7 ±0
	Prophet	778,62 ±28,04	2,21 ±0,06	0,89 ±0	3,14 ±0,01
	Spray&Wait	595,79 ±23,57	3,91 ±0,08	0,52 ±0,01	5,36 ±0
4	Epidêmico	494,72 ±9,03	13,04 ±0,11	0,92 ±0	3,13 ±0
	Maxprop	494,31 ±9,1	9,61 ±0,09	0,92 ±0	3,07 ±0
	Prophet	518,01 ±14,27	3,3 ±0,05	0,9 ±0	3,43 ±0
	Spray&Wait	332,17 ±7,52	6 ±0,12	0,42 ±0,01	3,7 ±0
10	Epidêmico	221,7 ±1,62	18,9 ±0,04	0,97 ±0	0,88 ±0
	Maxprop	221,58 ±1,51	15,5 ±0,06	0,97 ±0	0,84 ±0
	Prophet	317,58 ±19,87	7,46 ±0,07	0,95 ±0,01	2,56 ±0,03
	Spray&Wait	86,42 ±3,47	16 ±0,16	0,22 ±0	1,09 ±0

Tabela 6.11: Abordagem 2 no cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio ou imagens

Os valores de latência obtidos nesta abordagem são apresentados de forma gráfica na Figura 6.10. Nesta abordagem, o protocolo Prophet apresenta uma latência um pouco maior do que a dos outros protocolos, esse resultado pode ser explicado pelo seu comportamento probabilístico de entrega de mensagens. O protocolo Spray and Wait, por outro lado, apresenta os menores valores de Latência, inclusive quando avaliado com a utili-

Métricas					
VANTs	Protocolos	Latência (s)	Overhead	Taxa de entrega	AMeM (s)
2	Epidêmico	118,61 ±42,37	12,05 ±0,38	0,54 ±0,01	10,45 ±0
	Maxprop	1001,05 ±43,56	7,55 ±0,32	0,63 ±0,04	8,52 ±0
	Prophet	872,53 ±54,17	2,96 ±0,23	0,6 ±0,03	6,30 ±0,34
	Spray&Wait	684,97 ±23,69	5 ±0,23	0,4 ±0,01	12,94 ±0
4	Epidêmico	730,83 ±27,25	19,06 ±0,62	0,56 ±0,01	21,55 ±0
	Maxprop	595,79 ±14,64	8,73 ±0,13	0,85 ±0,03	5,54 ±0,15
	Prophet	592,08 ±25,22	5,4 ±0,1	0,71 ±0,01	12,58 ±1,26
	Spray&Wait	372,42 ±53,58	8,29 ±0,12	0,41 ±0,01	8,54 ±0
10	Epidêmico	480,83 ±53,58	33,88 ±0,99	0,4 ±0,01	14,1 ±0
	Maxprop	366,31 ±30,2	18,69 ±0,27	0,42 ±0,01	8,57 ±1,04
	Prophet	575,96 ±73,6	11,64 ±0,74	0,41 ±0,01	13,96 ±0,76
	Spray&Wait	115,61 ±3,28	18,78 ±0,30	0,18 ±0	2,01 ±0

Tabela 6.12: Abordagem 2 no cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio, imagens ou vídeo

zação de mensagens de vídeo, conforme observado na Figura 6.11. Porém, essa grande redução na latência se reflete na taxa de entrega deste protocolo.

Conforme previsto, podemos observar na Figura 6.12 que o protocolo Spray and Wait é bastante afetado pela segmentação das rotas, que se intensifica com o aumento do número de VANTs. Essa característica desse protocolo fica ainda mais evidente quando a rede opera um pouco mais sobrecarregada, devido ao tráfego de mensagens de vídeo. Na Figura 6.13, relacionada à taxa de entrega com mensagens de vídeo na rede, observa-se a queda acentuada desta taxa para o Spray and Wait.

Com mensagens maiores circulando pela rede, os *buffers* dos nós podem ficar saturados mais rapidamente. Como pode não haver uma rota direta até o destino das mensagens, algumas dessas mensagens podem nunca chegar ao seu destino. Por esse motivo, os demais protocolos também apresentam taxas de entrega baixas neste caso.

Da mesma forma, observamos que, enquanto os outros protocolos mantêm valores de AMeM constantes e semelhantes entre si, os valores para o protocolo Spray and Wait são bem maiores, destacando-se no gráfico da Figura 6.14. Ao analisarmos o gráfico da Figura 6.15, contendo o AMeM somente das mensagens de vídeo de um determinado PoI para o CC, no caso mais extremo de segmentação, onde existe uma rota diferente e individual para cada um dos 10 VANTs, ocorre dos VANTs não conseguirem entregar qualquer mensagem utilizando esse protocolo. Já o protocolo epidêmico apresenta um valor bastante grande para o AMeM com uso de apenas dois VANTs. Neste caso, como

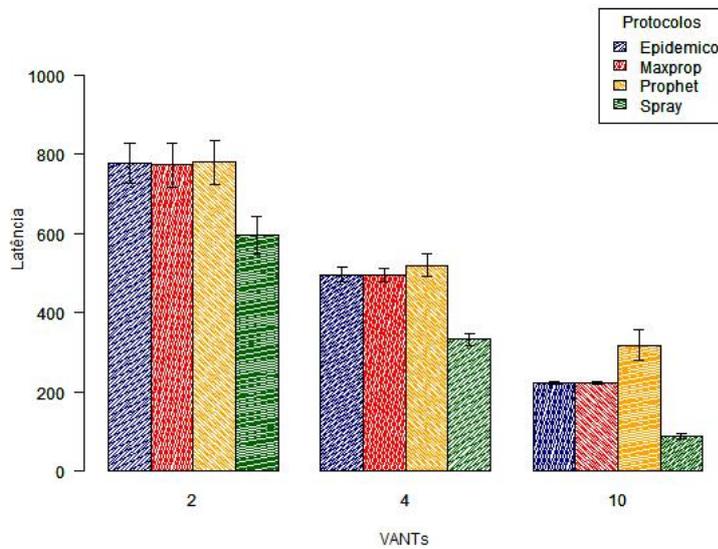


Figura 6.10: Latência para Abordagem 2, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio ou imagens

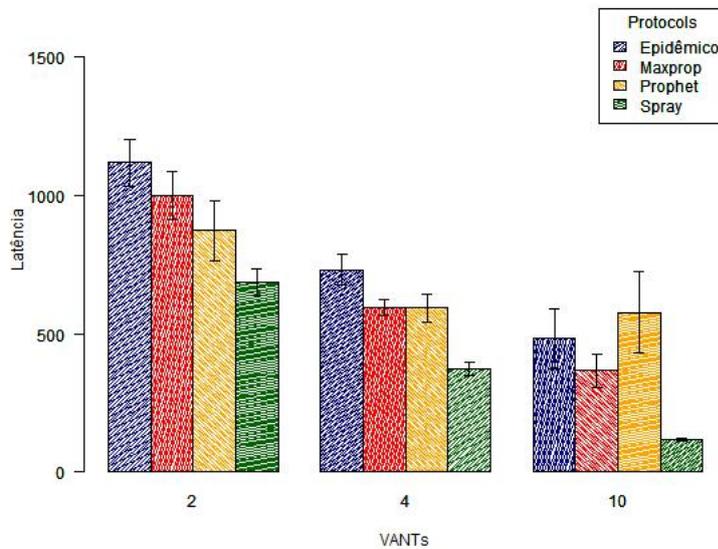


Figura 6.11: Latência para Abordagem 2, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio, imagens ou vídeo

temos mais nós em cada rota, o comportamento de replicação indiscriminada do epidêmico faz com que determinadas mensagens sofram uma maior latência, devido ao rápido preenchimento do *buffer* dos VANTs.

Quanto ao *overhead*, figuras 6.16 e 6.17, o protocolo Prophet mantém-se como sendo o protocolo analisado que utiliza menos recursos da rede. O protocolo Spray and Wait

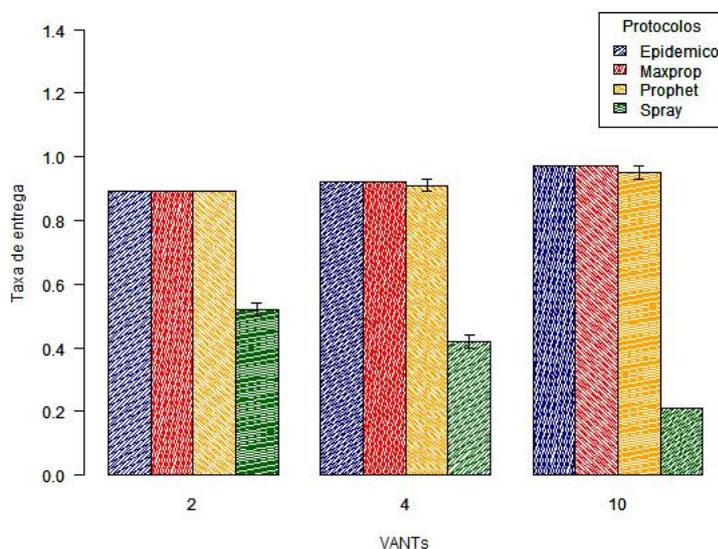


Figura 6.12: Taxa de entrega para Abordagem 2, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio ou imagens

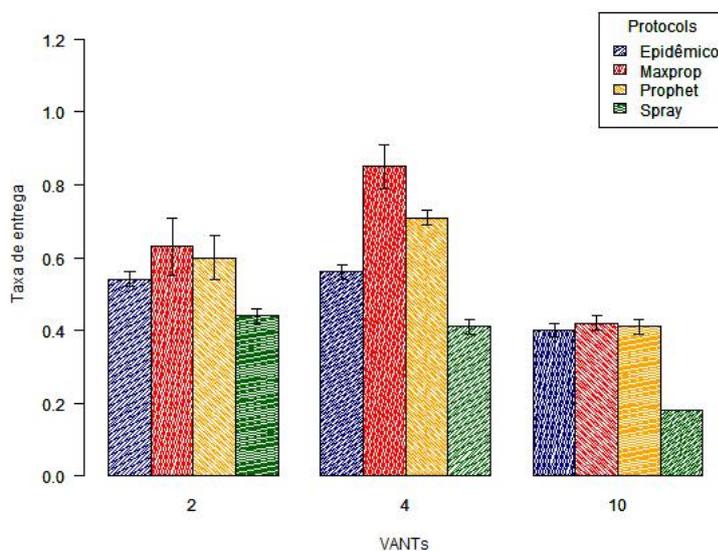


Figura 6.13: Taxa de entrega para Abordagem 2, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio, imagens ou vídeo

poderia ser considerado também, porém, as características de seu funcionamento que lhe permitem ter um baixo valor de *overhead* também limita ou até impede seu funcionamento nesta abordagem, conforme já discutido.

A Tabela 6.13 apresenta os resultados para o cenário com 20 PoIs e mensagens contendo áudio e imagens. A Tabela 6.14 apresenta os resultados para este mesmo cenário

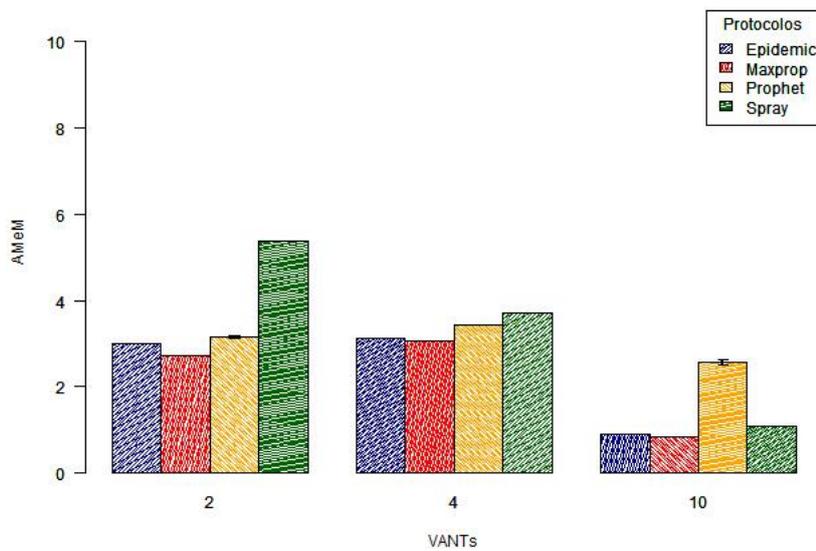


Figura 6.14: AMeM para Abordagem 2, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio e imagens

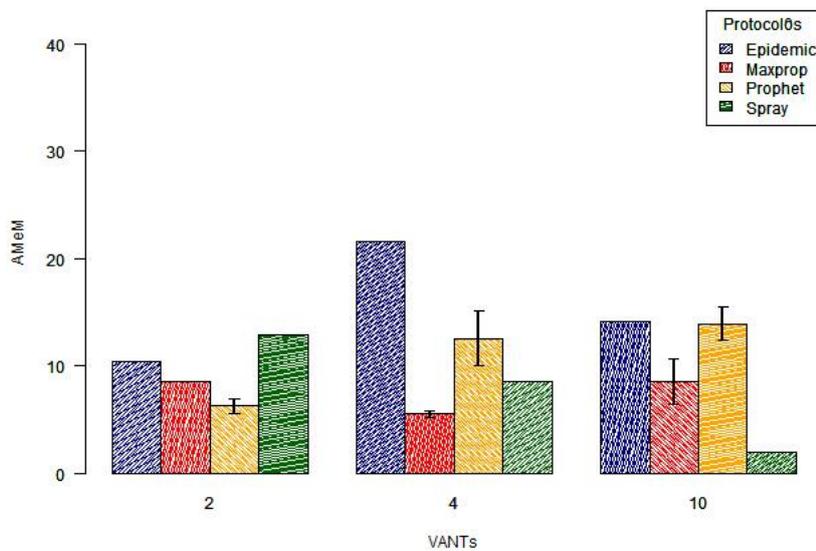


Figura 6.15: AMeM para Abordagem 2, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio, imagens ou vídeo

com 20 PoIs, porém com mensagens podendo conter vídeos. Por uma questão de organização e melhor visualização do trabalho como um todo, os gráficos para o cenário com 20 PoIs não serão apresentados no corpo deste trabalho.

Conforme comentado anteriormente para o cenário com 10 PoIs, o protocolo Spray and Wait não funciona de forma adequada nesta abordagem, devendo ser evitado. Neste

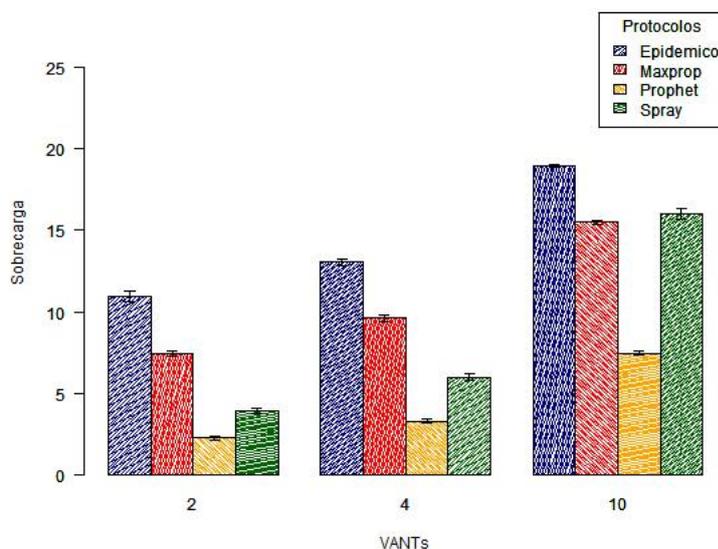


Figura 6.16: Overhead para Abordagem 2, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio e imagens

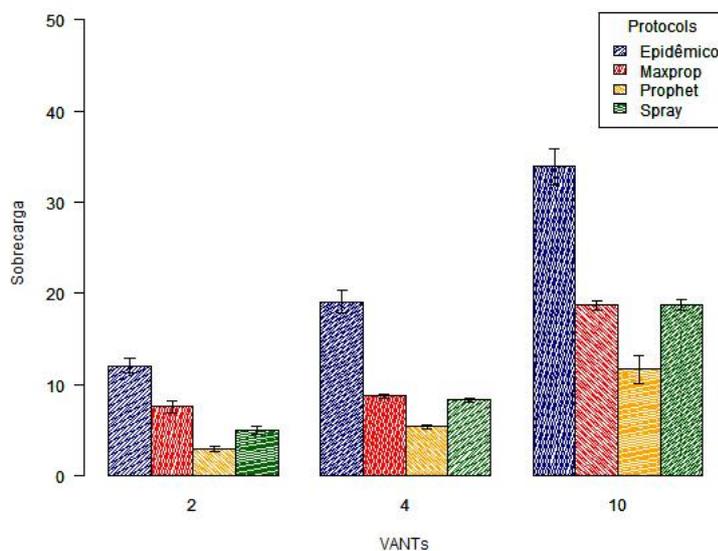


Figura 6.17: Overhead para Abordagem 2, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio, imagens ou vídeo

cenário com 20 PoIs suas limitações ficam ainda mais evidentes, apresentando taxas de entrega muito menores nos casos mais extremos.

Todos os demais protocolos comportam-se de forma análoga ao cenário com 10 PoIs, inclusive com os valores bastante elevados de *overhead* para o protocolo epidêmico.

Métricas					
VANTs	Protocolos	Latência (s)	Overhead	Taxa de entrega	AMeM (s)
9	Epidêmico	186,54 ±1,62	27,12 ±0,38	0,97 ±0	1,20 ±0
	Maxprop	185,58 ±1,79	17,27 ±0,09	0,97 ±0	1,19 ±10 ⁻⁴
	Prophet	212,85 ±4,04	4,37 ±0,08	0,97 ±0,01	3,68 ±10 ⁻³
	Spray&Wait	121,23 ±2,03	10,35 ±0,23	0,37 ±0,01	2,14 ±0
20	Epidêmico	162,03 ±2,03	38,75 ±0,09	0,98 ±0	0,74 ±0
	Maxprop	161,78 ±2,07	27,53 ±0,07	0,98 ±0	0,77 ±0
	Prophet	191,23 ±2,60	8,53 ±0,19	0,97 ±0	1,50 ±10 ⁻³
	Spray&Wait	76,36 ±3,74	33,39 ±1,13	0,13 ±0,009	4,27 ±0

Tabela 6.13: Abordagem 2 no cenário com 20 PoIs, mensagens com áudio e imagens

Métricas					
VANTs	Protocolos	Latência (s)	Overhead	Taxa de entrega	AMeM (s)
9	Epidêmico	561,9 ±34,42	20,56 ±0,55	0,49 ±0,01	55,60 ±0
	Maxprop	465,71 ±38,69	15,82 ±0,36	0,55 ±0,02	36,74 ±10,08
	Prophet	398,2 ±49,29	4,47 ±0,15	0,56 ±0,01	42,82 ±20,72
	Spray&Wait	176,54 ±8,32	9,24 ±0,15	0,35 ±0,01	9,86 ±0
20	Epidêmico	375,58 ±30,01	64,95 ±2,42	0,51 ±0	21,72 ±0
	Maxprop	289,22 ±10,47	25,69 ±0,29	0,71 ±0,01	15,17 ±2,37
	Prophet	301,73 ±29,64	14,82 ±1,01	0,53 ±0,04	20,17 ±2,91
	Spray&Wait	79,57 ±2,49	47,76 ±2,53	0,09 ±0	N.A.

Tabela 6.14: Abordagem 2 no cenário com 20 PoIs, mensagens com áudio, imagens e vídeo

6.4.3 Resultados para a Abordagem 3

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos na Abordagem 3. A Tabela 6.15 apresenta os resultados para o cenário com 10 PoIs e mensagens contendo áudio e imagens. A Tabela 6.16 apresenta os resultados para este mesmo cenário, porém com mensagens contendo vídeos além de áudio e imagens.

A latência nesta abordagem 'naive' não apresenta diferenças expressivas entre os protocolos analisados, apresentando modesta redução em função do aumento do número de VANTs, conforme pode ser observado na Figura 6.18. Percentualmente, temos uma diferença de apenas 15,8% entre o uso de dois VANTs e quatro VANTs. Prosseguindo nesta comparação, o resultado obtido entre quatro e dez VANTs é de cerca de 26,6% de melhora na latência, porém mais do que dobrando a quantidade de VANTs. O mesmo comportamento é observado no gráfico da Figura 6.19, mostrando a latência com mensa-

Métricas					
VANTs	Protocolos	Latência (s)	Overhead	Taxa de entrega	AMeM (s)
2	Epidêmico	652,17 ±17,20	11 ±0,18	0,9 ±0,02	5,00 ±0
	Maxprop	650,78 ±19,38	7,29±0,28	0,9 ±0,02	5,07 ±0
	Prophet	655,91 ±18,14	2,21 ±0,08	0,9 ±0,02	5,01 ±10 ⁻³
	Spray&Wait	654,53 ±18,35	3,54 ±0,06	0,9 ±0,02	5,12 ±0
4	Epidêmico	472,24 ±20,32	13,19 ±0,19	0,92 ±0,01	2,84 ±0
	Maxprop	472,03 ±20,19	9,69 ±0,2	0,92 ±0,01	2,85 ±0
	Prophet	478,97 ±22,45	4,28 ±0,08	0,92 ±0,01	2,80 ±0
	Spray&Wait	473,95 ±21,31	4,94 ±0,06	0,92 ±0,01	3,07 ±0
10	Epidêmico	316,45 ±7,98	19,14 v0,11	0,95 ±0,01	1,74 ±0
	Maxprop	316,26 ±7,93	16,41 ±0,26	0,95 ±0,01	1,73 ±10 ⁻³
	Prophet	323,75 ±7,12	10,45 ±0,16	0,95 ±0,01	1,85 ±10 ⁻⁴
	Spray&Wait	323,2 ±6,94	5,05 ±0,04	0,95 ±0,01	2,24 ±0

Tabela 6.15: Abordagem 3 no cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio ou imagens

Métricas					
VANTs	Protocolos	Latência (s)	Overhead	Taxa de entrega	AMeM (s)
2	Epidêmico	954,74 ±47,88	11,7 ±0,51	0,61 ±0,03	9,83 ±0
	Maxprop	794,88 ±29,45	6,81 ±0,28	0,79 ±0,04	8,99 ±0,29
	Prophet	808,93 ±30,82	3,35 ±0,15	0,74 v0,02	5,69 ±0,22
	Spray&Wait	799,95 ±42,7	4,19 ±0,09	0,79 ±0,02	7,47 ±0
4	Epidêmico	666,87 ±34,35	17,71 ±0,48	0,72 ±0,01	9,57 ±0
	Maxprop	548,6 ±30,47	8,98 0,19	0,89 ±0,02	2,97 ±0
	Prophet	590,46 ±4,21	6,37 ±0,29	0,78 ±0,01	3,84 ±0,08
	Spray&Wait	566,66 ±36,58	4,8 ±0,09	0,88 ±0,01	3,02 ±0
10	Epidêmico	442,62 ±11,39	32,65 ±0,29	0,79 ±0	5,93 ±0
	Maxprop	329,11 ±7,29	14,5 ±0,17	0,95 ±0,01	1,33 ±10 ⁻⁴
	Prophet	399,91 ±7,36	16,61 ±0,37	0,84 ±0,01	2,84 ±0,39
	Spray&Wait	330,9 ±6,89	5 ±0,03	0,94 ±0	2,04 ±0

Tabela 6.16: Abordagem 3 no cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio, imagens ou vídeo

gens de vídeos. Uma vez que a trajetória é única e a velocidade dos VANTs é constante, os VANTs levam sempre o mesmo tempo para se deslocarem entre os PoIs e o CC e, portanto, realizar a entrega das mensagens.

A Figura 6.20 apresenta os valores para a taxa de entrega de mensagens de áudio e imagens nesta abordagem. Nota-se uma tendência de aumento contínuo dessa taxa em função do número de VANTs para todos os protocolos, muito embora nunca fique abaixo de 92%. Com a utilização de vídeo, como podemos observar na Figura 6.21,

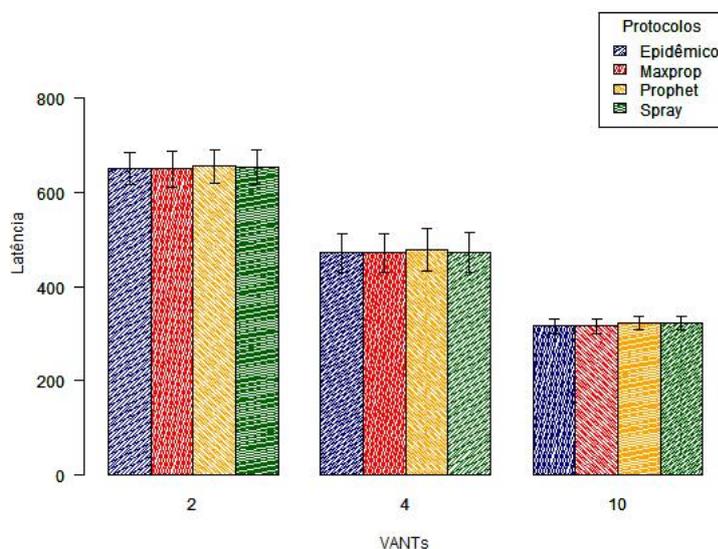


Figura 6.18: Latência para Abordagem 3, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio e imagens

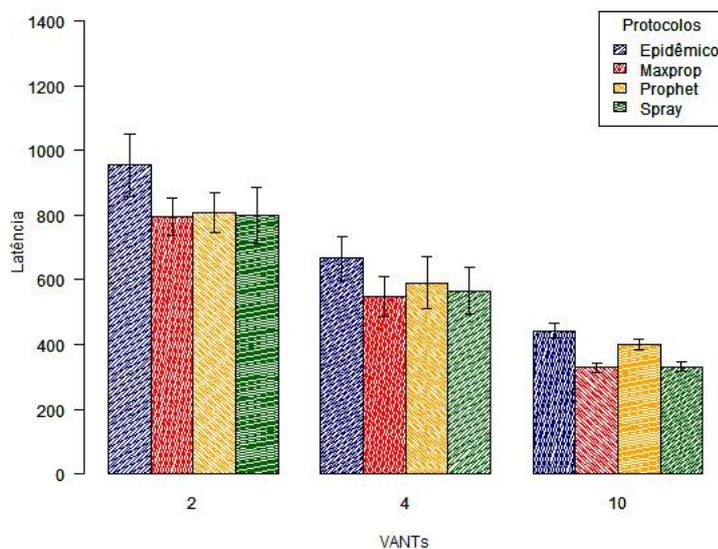


Figura 6.19: Latência para Abordagem 3, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio, imagens ou vídeo

embora a tendência seja igual ao caso anterior, essas taxas tendem a ser mais modestas se comparadas ao caso sem vídeo quando utilizamos um número menor de VANTs, devido ao preenchimento do *buffer* dos nós.

Na Figura 6.22 podemos observar graficamente os valores de *overhead* para esta abordagem. A estratégia do protocolo Spray and Wait em manter o *overhead* baixo, sem com-

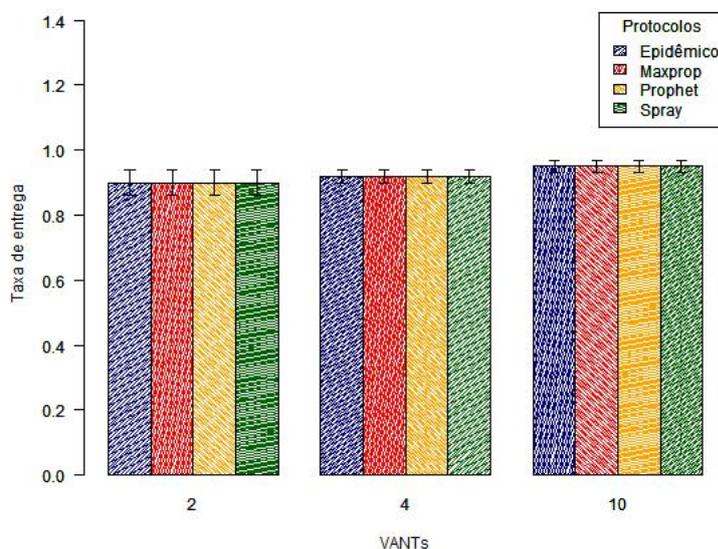


Figura 6.20: Taxa de entrega para Abordagem 3, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio e imagens

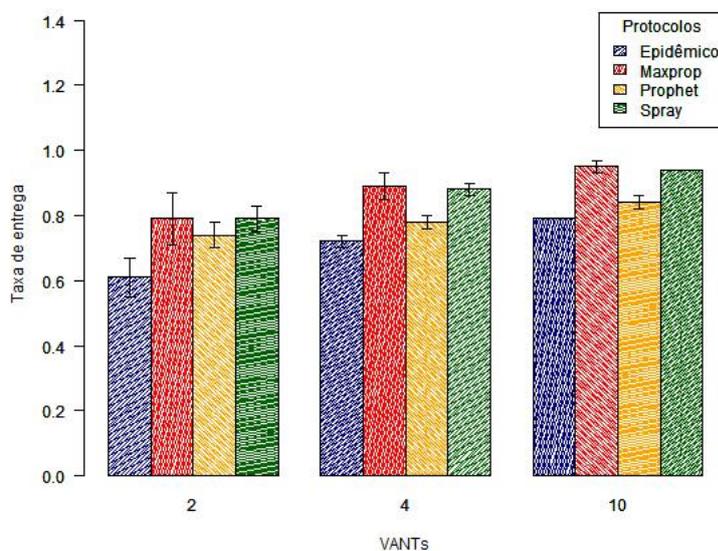


Figura 6.21: Taxa de entrega para Abordagem 3, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio, imagens ou vídeo

prometer muito a taxa de entrega das mensagens, pode ser muito bem observada. Seu valor permanece praticamente constante, independente da quantidade de VANTs no cenário. Os demais protocolos seguem a tendência de aumento contínuo e quase linear, conforme o número de VANTs aumenta.

O protocolo que gera o maior *overhead*, como esperado, é o epidêmico. Na figura 6.23

fica ainda mais evidente a voracidade com que esse protocolo consome recursos da rede em função do número de nós, tamanho e quantidade de mensagens circulando na rede.

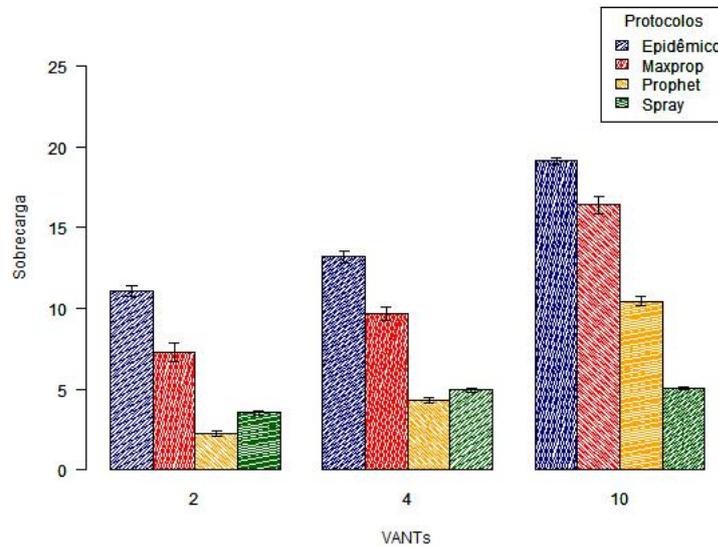


Figura 6.22: *Overhead* para Abordagem 3, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio e imagens

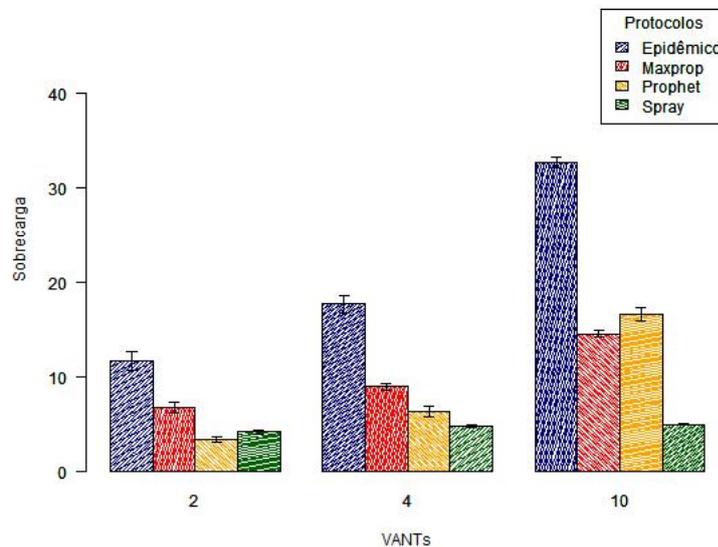


Figura 6.23: *Overhead* para Abordagem 3, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio, imagens ou vídeo

Por fim, obtemos um comportamento determinístico do AMeM, com valores muito próximos para todos os protocolos e para qualquer quantidade de VANTs, como podemos observar na Figura 6.24. Considerando que os VANTs podem, em um único contato, entregar diversas mensagens em sequência, é esperado que o AMeM apresente valores

baixos e constantes. Ao observarmos os valores de AMeM para um único PoI, Figura 6.25, temos uma melhor percepção do que ocorre. Neste caso, o AMeM depende diretamente do tempo que os VANTs levam para percorrer o trajeto entre o PoI e o CC. Além disso, devemos considerar que, quanto mais VANTs no cenário, mais mensagens são geradas desse PoI e, portanto, mais mensagens são entregues em menos tempo.

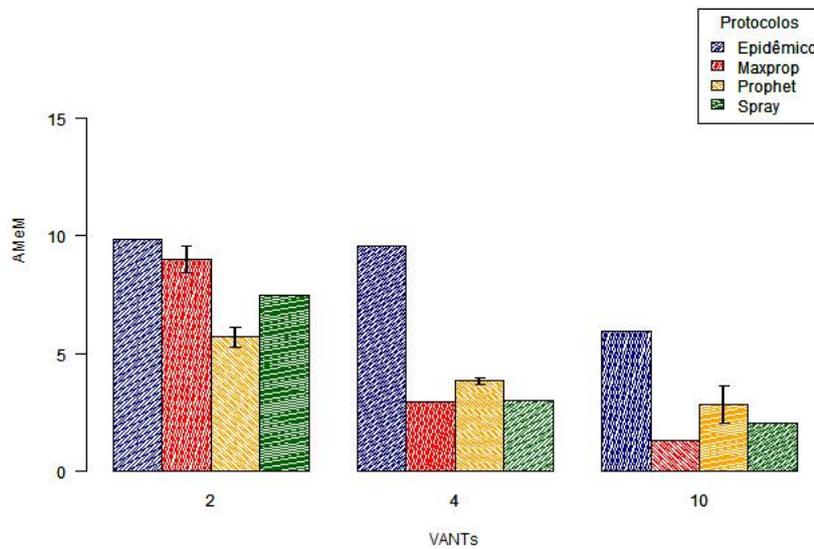


Figura 6.24: AMeM para Abordagem 3, cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio e imagens

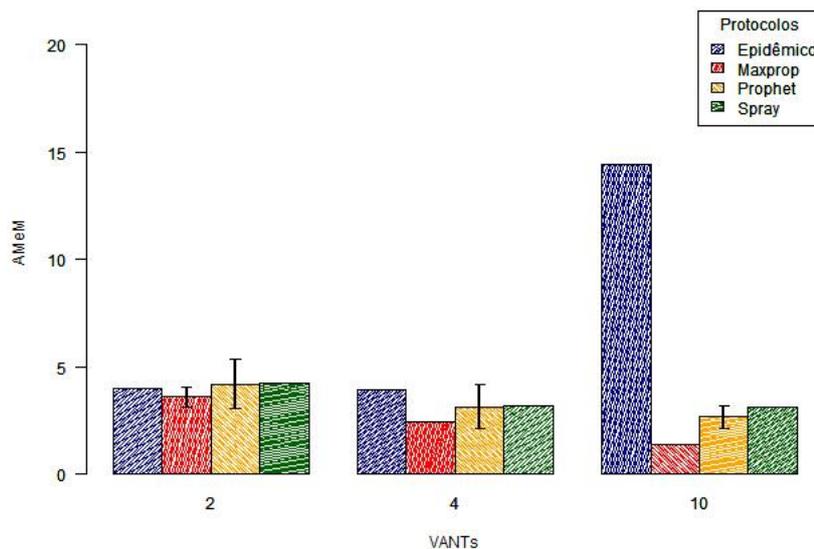


Figura 6.25: AMeM para Abordagem 3 no cenário com 10 PoIs, mensagens com áudio, imagens ou vídeo

A Tabela 6.17 apresenta os resultados para o cenário com 20 PoIs e mensagens con-

tendo áudio e imagens. A Tabela 6.18 apresenta os resultados para esse mesmo cenário com 20 PoIs, porém com mensagens podendo conter vídeos. Por uma questão de organização e melhor visualização do trabalho como um todo, os gráficos para o cenário com 20 PoIs não serão apresentados no corpo deste trabalho.

Métricas					
VANTs	Protocolos	Latência (s)	Overhead	Taxa de entrega	AMeM (s)
9	Epidêmico	287,93 ±8,44	28,21 ±0,17	0,96 ±0,01	1,58 ±0
	Maxprop	285,39 ±5,99	21,9 ±0,2	0,96 ±0,01	1,52 ±10 ⁻⁴
	Prophet	299,65 ±10,69	10 ±0,24	0,96 ±0,01	1,50 ±0,03
	Spray&Wait	298,33±9,27	5,05 ±0,03	0,95 ±0	3,07 ±0
20	Epidêmico	222,29 ±3,03	39,3 ±0,15	0,97 ±0,01	0,81 ±0
	Maxprop	222,11 ±3,04	33,25 ±,048	0,97 ±0,01	0,83 ±0
	Prophet	229,43 ±2,82	22,1 ±0,48	0,97 ±0,01	1,31 ±10 ⁻³
	Spray&Wait	235,18 ±3,80	5,11 ±0,02	0,96 ±0	2,3 ±0

Tabela 6.17: Abordagem 3 no cenário com 20 PoIs, mensagens com áudio ou imagens

Métricas					
VANTs	Protocolos	Latência (s)	Overhead	Taxa de entrega	AMeM (s)
9	Epidêmico	740,38 ±121,59	89,17 ±7,31	0,12 ±,01	N.A.
	Maxprop	768,74 ±136,39	71,12 ±4,53	0,12 ±0	N.A.
	Prophet	773,64 ±129,66	27,72 ±3,17	0,13 ±0,01	N.A.
	Spray&Wait	648,7 ±70,2	16,79 ±0,76	0,14 ±0,01	N.A.
20	Epidêmico	373,73 ±10,46	53,86 ±0,76	0,41 ±0	7,74 ±0
	Maxprop	259,72 ±4,32	30,63 ±0,27	0,46 ±0,01	1,74 ±0,14
	Prophet	294,97 ±5,65	24,7 ±0,66	0,42 ±0,01	4,21 ±0,99
	Spray&Wait	284,82 ±9,01	6,57 ±0,07	0,49 ±0	1,42 ±0

Tabela 6.18: Abordagem 3 no cenário com 20 PoIs, mensagens com áudio, imagens e vídeo

Nesta abordagem temos o caso mais interessante para o cenário de 20 PoIs. Como já foi discutido, O desempenho dessa abordagem depende diretamente da quantidade de VANTs e de sua capacidade transportar todas as mensagens a serem entregues. Observando os valores da Tabela 6.17, constatamos que a rede apresenta valores muito bons em seu funcionamento para todos os protocolos. No entanto, quando mensagens de vídeo circulam pela rede nesta abordagem, a taxa de entrega de mensagens cai a níveis muito baixos, e o *overhead* e a latência sobem bastante. Isto ocorre devido ao tamanho inadequado dos *buffers* dos nós. Esses *buffers* atingem seu limite muito rapidamente com o aumento de nós e do tamanho de mensagens. Como as mensagens permanecem nesses *buffers* até que possam ser entregues, pouquíssimas mensagens conseguem ser entregues

a tempo. Com o aumento de VANTs, e portanto mais *buffers* na rede, a taxa de entrega melhora e as demais métricas sofrem uma sensível melhora.

Conclui-se então que, conforme proposto em (de Albuquerque et al., 2014, 2016), tem-se um resultado satisfatório de latência e taxa de entrega para esta abordagem com rota única utilizando apenas dois VANTS, pois não observamos maiores ganhos quanto a essas métricas simplesmente aumentando o número de VANTs. Já o AMeM indica uma queda linear e diretamente proporcional ao número de VANTs utilizados, no entanto, deve-se avaliar se aumentar o número de VANTs para reduzir o AMeM é de fato uma necessidade para as equipes de resgate e para o CC.

Quanto a melhor utilização dos recursos da rede, cabe destacar que eles são melhor aproveitados quando se utiliza os protocolos de *Prophet* ou *Spray and Wait*, face a seus valores de *overhead* reduzidos.

6.5 Discussão sobre os resultados

Nesta seção procuramos comparar as três abordagens propostas e analisadas neste capítulo.

Comparativamente, podemos observar que, em quase todos os casos, a taxa de entrega de mensagens tende a permanecer quase constante e sempre acima dos 90%. O protocolo que apresentou mais problemas com essa métrica foi o *Spray and Wait*, pois, conforme dito anteriormente, devido ao seu mecanismo de funcionamento, este protocolo não funciona de forma adequada em redes onde haja uma grande segmentação dos nós, que é o que ocorre na Abordagem 1 e, de forma ainda mais acentuada, na Abordagem 2. Os demais protocolos tiveram taxas de entrega menores somente quando os *buffers* dos nós foram sobrecarregados, com o aumento do tamanho das mensagens na rede. Assim, nesses casos, o protocolo que gera mais réplicas na rede, e portanto consome mais recursos, terá sempre uma taxa de entregas menor. Esse é o caso do protocolo epidêmico.

A latência, por outro lado, sofre grande influência da quantidade de VANTs e da abordagem para a composição das rotas adotada. Excetuando o protocolo *Spray and Wait*, todos os outros protocolos apresentaram valores muito próximos entre si para todas as abordagens.

Tomamos como referência o protocolo epidêmico e apresentamos, na Figura 6.26, um gráfico comparativo com os valores de latência deste protocolo em cada uma das abordagens, utilizando dois, quatro e dez VANTs no cenário com 10 PoIs. Observamos então

que a Abordagem 3 (aqui chamado *Único*, para indicar a solução com uma única rota para todos os VANTs) é a que apresenta ganhos menos expressivos em função do número de VANTs, sendo que a Abordagem 1 (aqui chamada *RCC*, para indicar a solução onde cada VANT deve “retornar ao CC” ao final de sua rota) situa-se no extremo oposto. Uma observação interessante é que a Abordagem 1 (*RCC*) pode ser considerada um encurtamento de trajetória, para cada um dos VANTs, se comparada com a Abordagem 3 (*Único*).

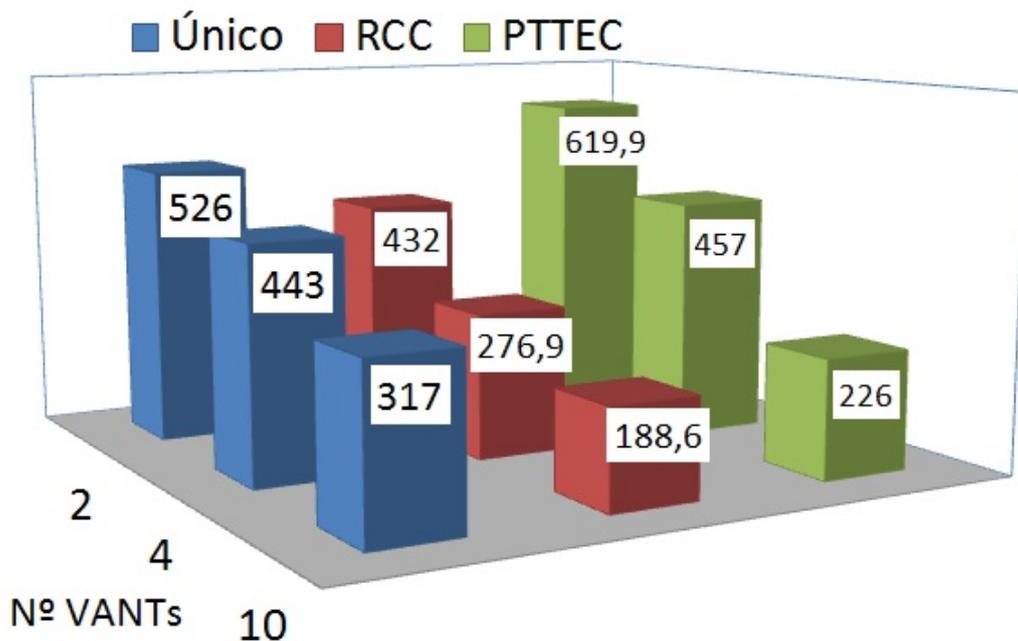


Figura 6.26: Comparativo dos valores de latência em função da abordagem e do número de VANTs

Então, conforme sugerido em (de Albuquerque et al., 2014), talvez a Abordagem 1 (*RCC*) possa ter seu desempenho melhorado utilizando 2 VANTs em cada uma de suas rotas. Embora essa não seja uma solução para o m-TSP da forma como foi modelado neste trabalho, pode ser uma solução alternativa a ser explorada para o caso de haverem mais VANTs disponíveis do que PoIs. A Abordagem 2 (aqui chamada de *PTTEC*, para indicar a solução que utiliza “PTTECs” entre os *clusters*), por sua vez, não apresenta valores tão baixos de latência quanto a Abordagem 1 (*RCC*), porém também demonstra um grande grau de redução em comparação com a Abordagem 3 (*Único*), aqui tratada como uma abordagem de referência.

Outro fator importante a ser levado em consideração é a percepção que o nó de destino tem da frequência com que as mensagens são entregues a ele. De forma inédita, incluímos neste trabalho uma métrica que mede justamente o atraso médio entre essas mensagens, o AMeM. A Figura 6.27 apresenta um comparativo dessa métrica para as abordagens propostas, considerando o cenário com 10 PoIs, quando analisadas apenas as mensagens

de vídeo entre um PoI específico e o CC. Os valores apresentados são uma média dos valores de cada protocolo em cada uma das abordagens.

Nesta métrica, fica claro que, embora a latência geral da rede na Abordagem 3 (Único) não seja das melhores, uma vez que os VANTs sobrevoam de forma cíclica e constante cada um dos PoIs, o AMeM reduz-se de forma bastante expressiva. De forma semelhante, embora um pouco menos expressiva, a Abordagem 2 (PTTEC) também tem uma performance melhorada pelo número de VANTs, apesar de apresentar valores elevados de latência.

Na Abordagem 2 (PTTEC), a latência tende a ser elevada porque nem todos os VANTs têm acesso direto ao CC, sendo necessário que as mensagens sejam encaminhadas sistematicamente até que atinjam o nó de destino. Porém, uma vez que cada VANT pode entregar diversas mensagens simultaneamente, do ponto de vista do nó de destino tem-se a percepção de um atraso bem menor de entrega entre uma mensagem e outra.

Quanto ao *overhead* da rede, dentre os protocolos efetivamente funcionais nas diversas abordagens estudadas, o *Prophet* se manteve sempre com as menores taxas, sendo superado, em poucos casos, pelo protocolo Maxprop.

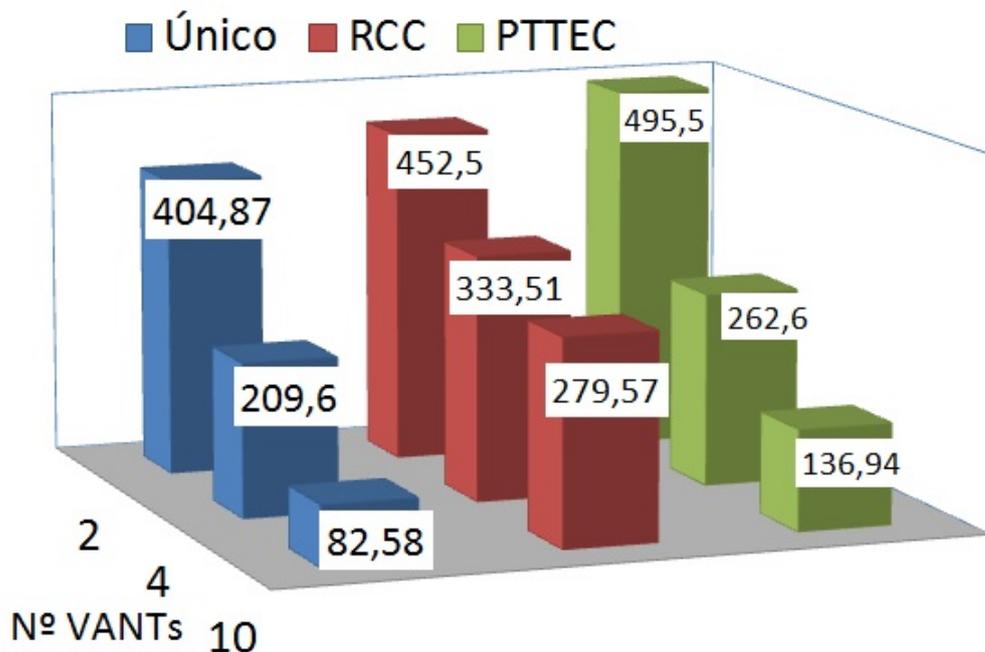


Figura 6.27: Comparativo dos valores do AMeM em função da abordagem e do número de VANTs

Desta forma, apresentamos nas figuras 6.28 a 6.35 um comparativo dos resultados das métricas avaliadas para os dois protocolos que mais se destacaram nas análises, o *maxprop* e o *prophet*, quando aplicados aos cenários de 10 e de 20 PoIs. Nestas figuras

temos, no eixo Y, a identificação da quantidade de VANTs. Já no eixo X temos a identificação do protocolo e a respectiva abordagem analisada. Essa última informação também encontra-se codificada pelas cores azul, para a Abordagem 1, verde, para a Abordagem 2, e vermelho, para a Abordagem 3.

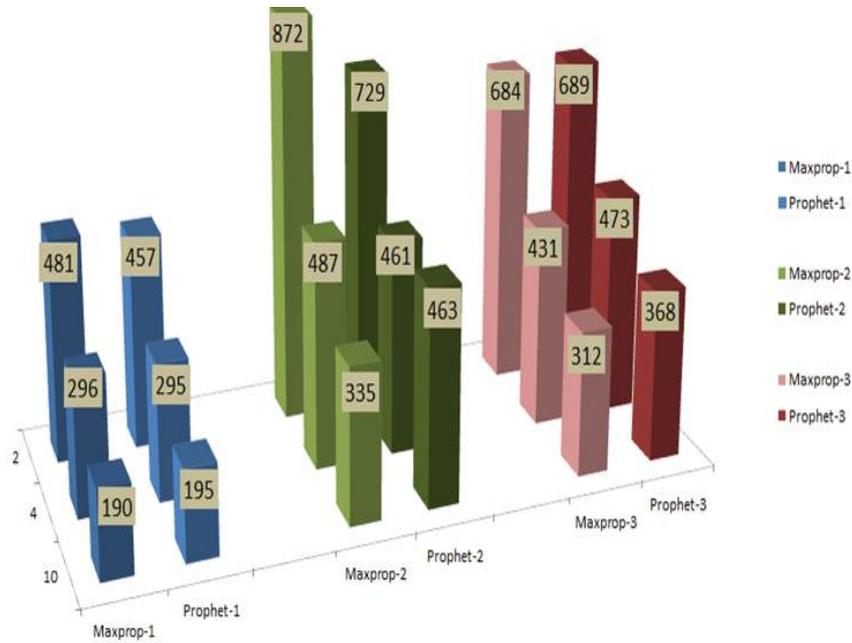


Figura 6.28: Comparativo dos valores de Latência em função da abordagem, do protocolo e do número de VANTs para 10 PoIs

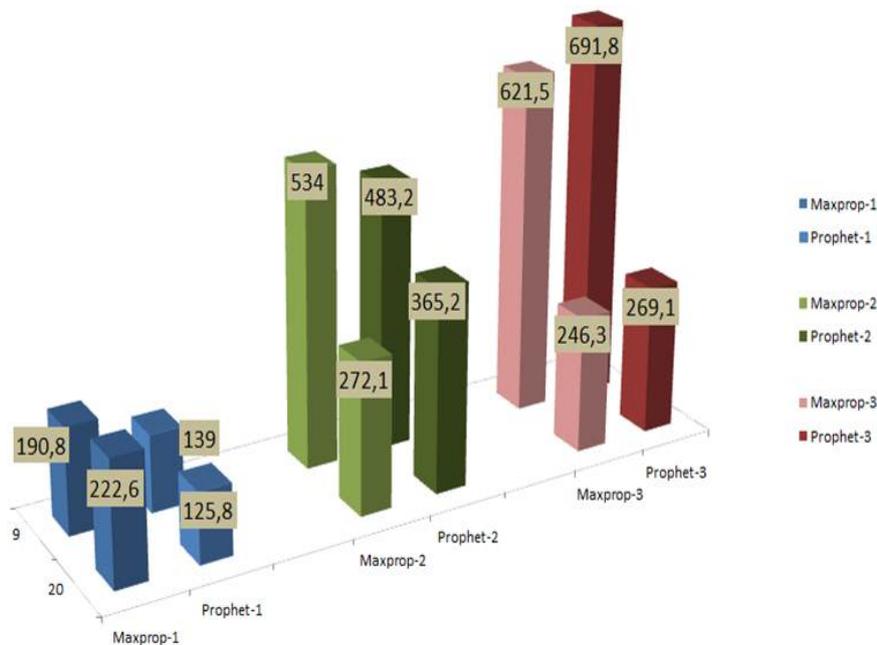


Figura 6.29: Comparativo dos valores de Latência em função da abordagem, do protocolo e do número de VANTs para 20 PoIs

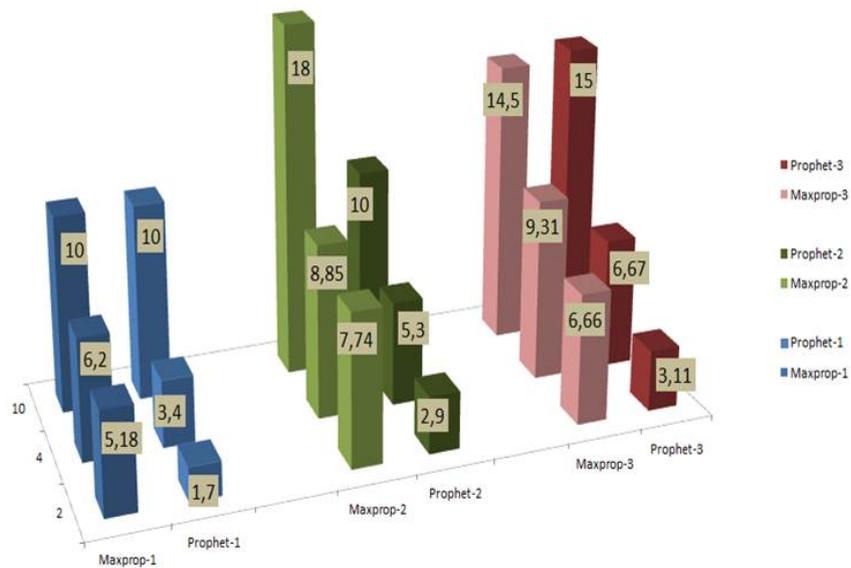


Figura 6.30: Comparativo dos valores de Sobrecarga em função da abordagem, do protocolo e do número de VANTs para 10 PoIs

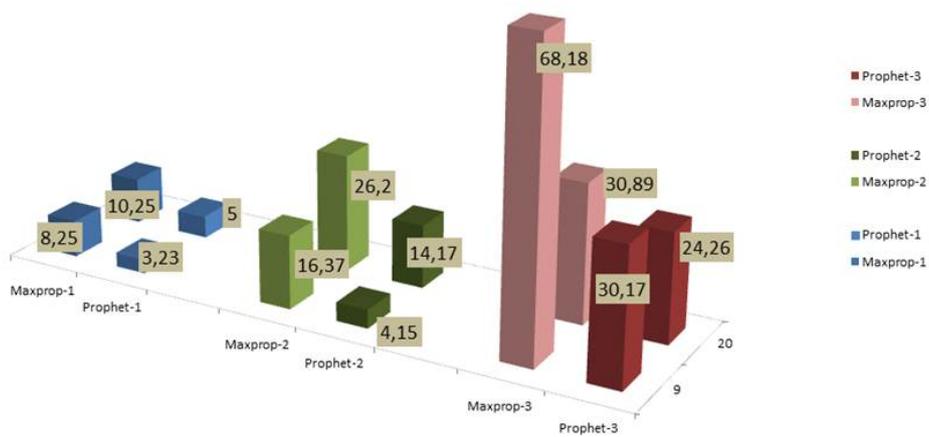


Figura 6.31: Comparativo dos valores de Sobrecarga em função da abordagem, do protocolo e do número de VANTs para 20 PoIs

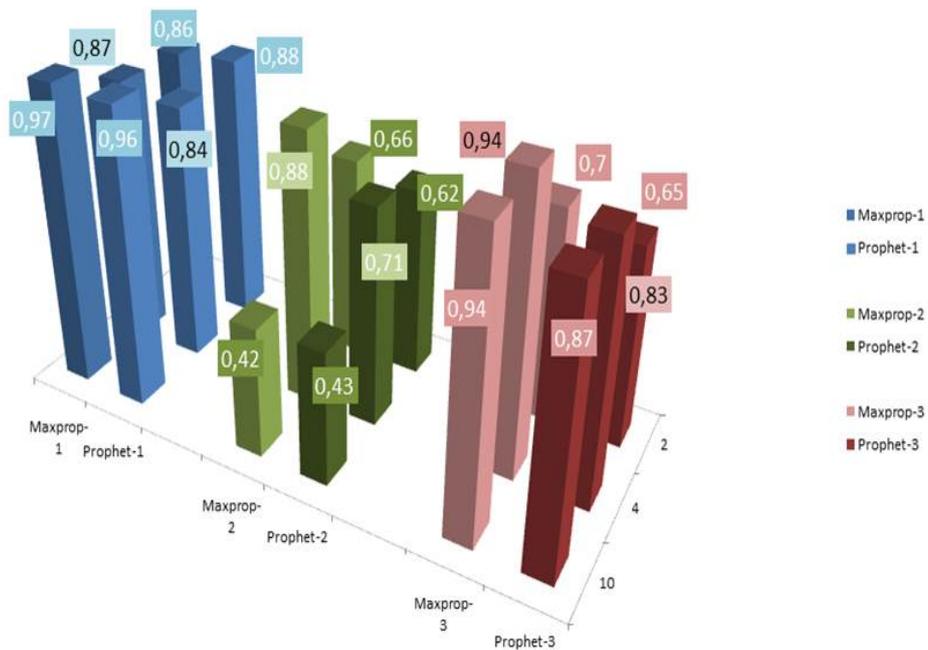


Figura 6.32: Comparativo dos valores de Taxa de entrega em função da abordagem, do protocolo e do número de VANTs para 10 PoIs

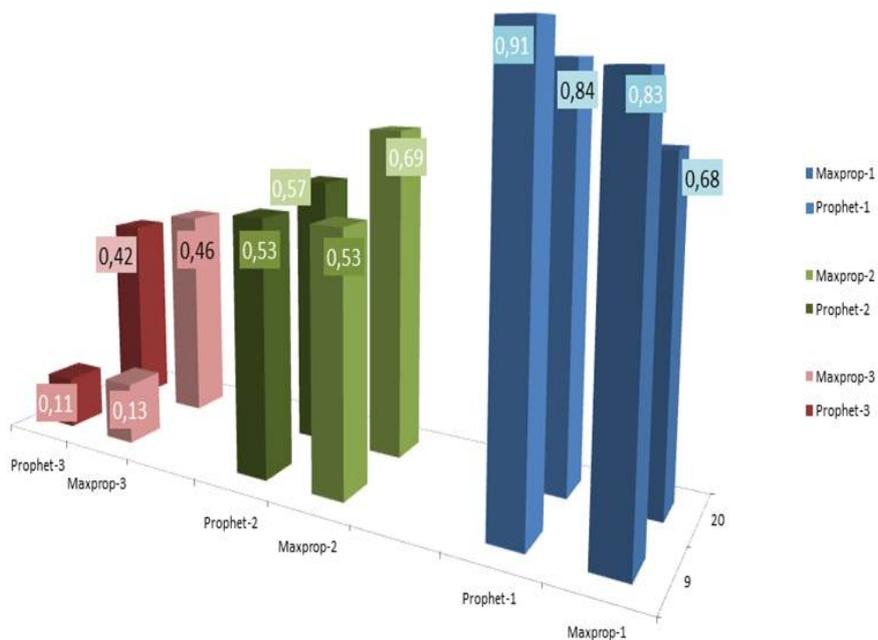


Figura 6.33: Comparativo dos valores de Taxa de entrega em função da abordagem, do protocolo e do número de VANTs para 20 PoIs

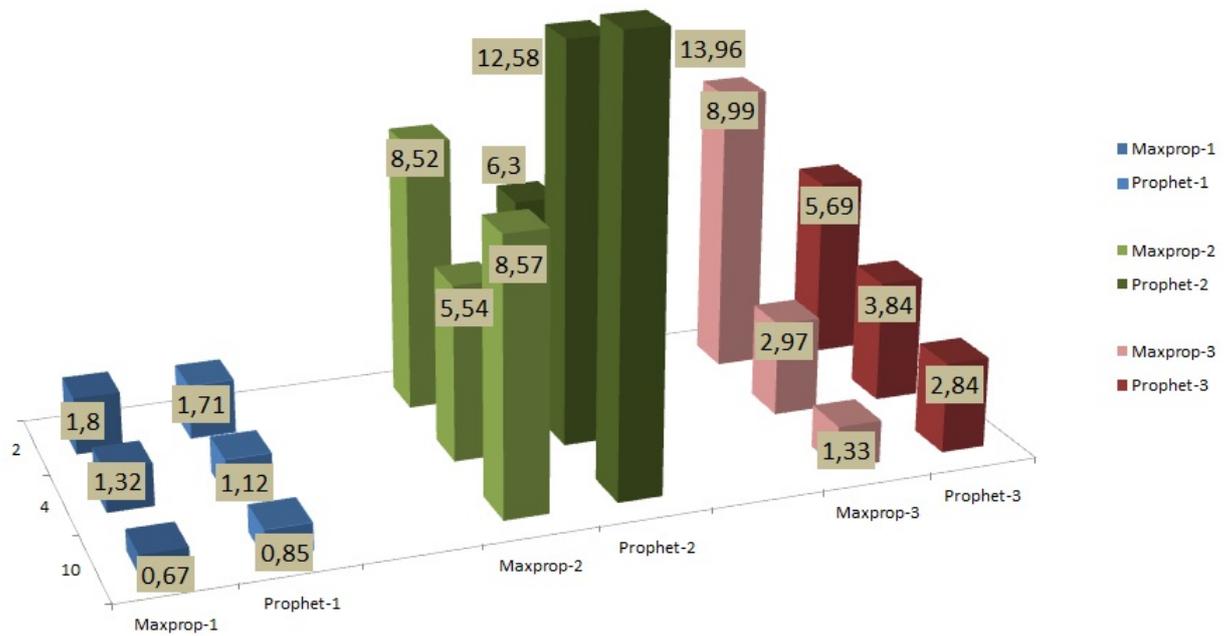


Figura 6.34: Comparativo dos valores de AMeM em função da abordagem, do protocolo e do número de VANTs para 10 PoIs

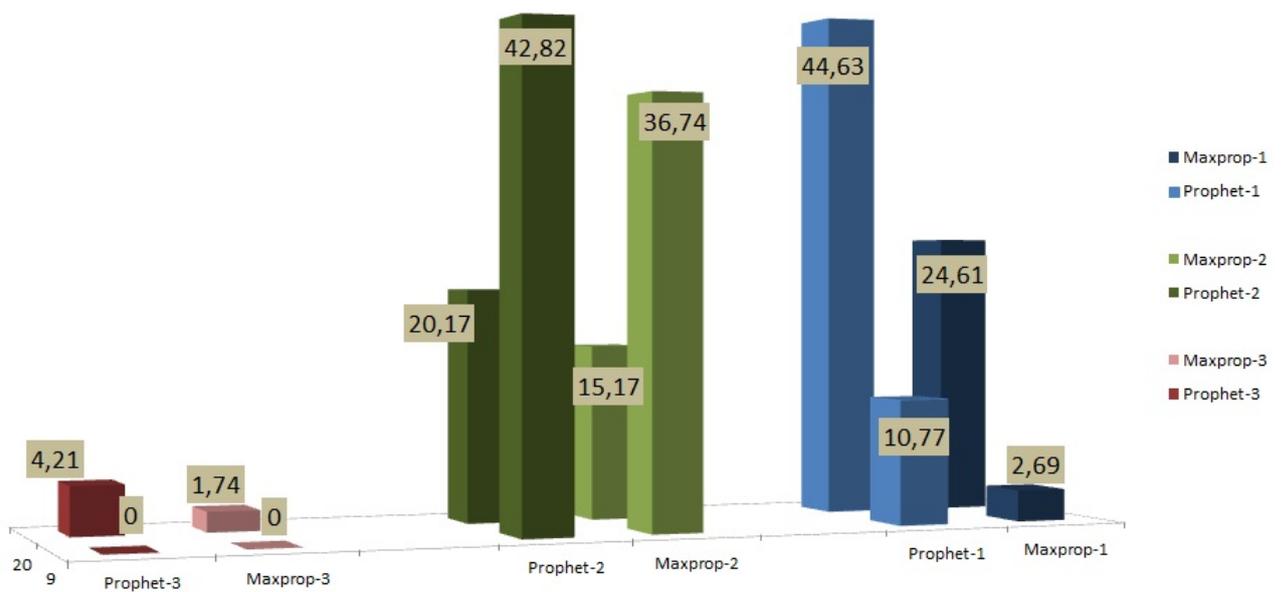


Figura 6.35: Comparativo dos valores de AMeM em função da abordagem, do protocolo e do número de VANTs para 20 PoIs

7. Conclusão

Em um cenário de emergência, o centro de comando é o responsável pela gestão de recursos e equipes, necessários para a busca, resgate e atendimento das vítimas desse cenário. A comunicação entre o centro de comando e as diversas equipes envolvidas nessa tarefa é de suma importância para que essas ações de resgate sejam levadas a termo, de forma rápida e eficiente. No entanto, devido a fatores ambientais ou ao colapso da própria infraestrutura de comunicação da região atingida, as equipes podem ter grande dificuldade para estabelecer e manter uma linha de comunicação entre si e/ou com o centro de comando, podendo até ficarem incomunicáveis. Em cenários como esse, onde a busca por vítimas e o respectivo salvamento deve ocorrer da forma mais imediata possível, espera-se que as informações trafeguem de forma rápida e com o mínimo possível de perdas.

As redes sem fio podem fornecer conectividade nesses cenários de forma rápida, entretanto podem ocorrer desconexões frequentes e imprevisíveis devido à mobilidade dos nós da rede. Nesse caso, as redes DTN, devido às suas características, podem ser a abordagem de rede mais adequada a ser empregada. Essas redes necessitam de protocolos específicos que consigam tratar de forma adequada as desconexões e a consequente falta de conectividade. Por isso, diversos protocolos de roteamento para redes DTN foram desenvolvidos, sendo alguns dos protocolos mais usuais o *Epidemic*, o *Prophet*, o *Spray and Wait* e o *Maxprop*. Contudo, os cenários de emergência demandam que as comunicações ocorram da maneira mais eficaz possível, preferencialmente em tempo real, o que nem sempre é possível de ser conseguido com a utilização de redes puramente oportunísticas.

Desta forma, para tentar garantir um desempenho ainda maior em um cenário de emergência, que devido à sua dinâmica pode sofrer constantes mudanças, inclusive com locais que antes podiam estar acessíveis e em pouco tempo passam a estar completamente isolados, torna-se interessante a abordagem de utilizar VANTs como nós móveis desse sistema. Os VANTs podem ser de vários tamanhos e possuem sistemas de propulsão também

bastante diversificados. Em um cenário de emergência, alguns dos principais requisitos para a escolha de um VANT em particular são sua autonomia, simplicidade de operação e robustez. Levando-se em consideração esses fatores e as características desejáveis para atender as principais demandas da arquitetura de rede proposta, escolhemos utilizar um VANT do tipo asa voadora para parametrizar as simulações aqui realizadas.

Assim sendo, propôs-se aqui uma arquitetura de rede onde VANTs são utilizados para prover conectividade utilizando protocolos de roteamento DTN entre o centro de comando e controle (CC) e os pontos de interesse (PoIs), os quais se encontram distribuídos em uma região que vivencia uma situação de emergência. Nesta arquitetura DTN para apoio às comunicações entre as equipes envolvidas no salvamento, verificou-se que as rotas utilizadas por esses VANTs, assim como sua distribuição pela região afetada, pode ser fator decisivo na agilidade e qualidade dessa comunicação. Em função disso, o problema de planejamento de rotas para que os VANTs sobrevoem de forma eficiente cada um desses PoIs foi modelado como uma variante do *Problema do Caixeiro Viajante*, ou TSP (*Travelling Salesman Problem*), na qual múltiplos “caixeiros” são possíveis.

Para distribuição dos VANTs, aqui modelados como “múltiplos caixeiros”, adotou-se uma estratégia de particionamento da região de cobertura da DTN, realizada através do algoritmo *k-means*. No caso, o número de regiões é igual ao número de VANTs disponíveis para a operação. Por simplicidade, considerou-se que o número de VANTs será sempre menor ou igual ao número de PoIs. Além disso, duas diferentes abordagens para a interconexão dessas subregiões foram propostas. Em seguida, o posicionamento e, por conseguinte, as distâncias entre os nós de cada região foram tratados como um grafo completo e simétrico, sobre o qual foi aplicada uma heurística de solução para o TSP conhecida como algoritmo de Christofides. Nos experimentos realizados, essa heurística se mostrou como a que possui melhor relação custo computacional *versus* proximidade da solução ótima.

Por fim, uma abordagem mais simples, para efeito de comparação, também foi proposta. Foi chamada de Abordagem de Referência e consiste da aplicação da solução do TSP para a região completa, sem subdividi-la. Os VANTs são, então, igualmente espaçados ao longo da rota obtida, rota essa que passa por todos os PoIs e retorna ao CC.

As três abordagens para solução do problema com múltiplos VANTs foram avaliadas num cenário realista, relacionado com o desastre ocorrido em janeiro de 2011 na região de Nova Friburgo - RJ. Dois cenários foram gerados a partir do mapa dessa região: um contendo 10 PoIs e contemplando a real situação ocorrida nesse desastre, e outro contendo 20 PoIs aleatoriamente espalhados nessa região. A simulação da DTN e da mobilidade

dos VANTs sobre ela foi realizada com o *software* de simulação de redes oportunísticas The One. Os quatro protocolos de roteamento DTN aqui citados - Epidêmico, Maxprop, Prophet e Spray and Wait - foram avaliados para cada cenário, variando-se o número de VANTs em cada caso. Nas simulações foram avaliadas a latência da rede, a sobrecarga de mensagens, a taxa de entregas de mensagens nos destinos e uma métrica especialmente proposta no contexto deste trabalho: o atraso (intervalo de tempo) entre entregas de mensagens no CC, chamada de AMeM.

A partir dos resultados obtidos, considera-se que, de forma geral, todos os protocolos apresentam valores de latência muito próximos nas três abordagens, exceto o protocolo *Spray and Wait* devido às suas características de funcionamento. Da mesma forma, excetuando este protocolo, todos os demais protocolos apresentaram taxas de entrega com pouca variação entre si. Com relação ao *overhead*, o Prophet foi o protocolo que apresentou as menores taxas em todos os experimentos, sendo superado somente pelo protocolo *Spray and Wait*.

Entre as abordagens, as menores taxas de latência foram registradas na Abordagem 1, que tem o CC como ponto de contato entre os clusters de PoI (subregiões). A Abordagem 2, que elenca PoIs de contato entre as subregiões e engloba o CC em uma dessas subregiões, apresentou resultados de latência melhores do que os da Abordagem 3 (abordagem de referência) e piores do que os da Abordagem 1. Quanto ao AMeM, a Abordagem 3 apresentou sempre os menores intervalos, seguidos pela Abordagem 2. A Abordagem 1 manteve valores de AMeM superiores e quase estáveis, quando comparado com as outras 2 abordagens.

Podemos concluir então que, pelos resultados apresentados, o protocolo Prophet é o mais adequado para os cenários avaliados. Isso se dá em função da baixa sobrecarga que ele exerce na rede, o que acaba também por favorecer os resultados das outras métricas. Entretanto, os protocolos Epidêmico e Maxprop são opções melhores caso o espaço em *buffer* não seja um problema. Em contrapartida, o *Spray and Wait* deve ser evitado devido às suas limitações de funcionamento em algumas dessas abordagens.

Como trabalhos futuros, pretende-se estudar como combinar a solução adotada na Abordagem 3 com as demais abordagens, de maneira a reduzir os valores da métrica AMeM. Em outras palavras, deseja-se estudar como estipular um número de clusters menor que o número de VANTs disponíveis e, em função disso, como alocar múltiplos VANTs para um mesmo cluster. Como consequência, espera-se também obter uma solução para quando o número de VANTs for maior que o número de PoIs. Além disso, pretende-se também avaliar como a mobilidade dos PoIs pode afetar as abordagens estu-

dadas, mobilidade essa que estaria relacionada com o deslocamento das equipes de busca e resgate, ou mesmo das vítimas.

Anexos

A. Implementação em Java para solução do TSP através de PLI utilizando a ferramenta Gurobi

```
/* Copyright 2019, Gurobi Optimization, LLC */

// Solve a traveling salesman problem on a randomly generated set of
// points using lazy constraints. The base MIP model only includes
// 'degree-2' constraints, requiring each node to have exactly
// two incident edges. Solutions to this model may contain subtours -
// tours that don't visit every node. The lazy constraint callback
// adds new constraints to cut them off.

import gurobi.*;

public class Tsp extends GRBCallback {
    private GRBVar[][] vars;

    public Tsp(GRBVar[][] xvars) {
        vars = xvars;
    }

    // Subtour elimination callback. Whenever a feasible solution is found,
    // find the subtour that contains node 0, and add a subtour elimination
    // constraint if the tour doesn't visit every node.

    protected void callback() {
        try {
            if (where == GRB.CB_MIPSOL) {
                // Found an integer feasible solution - does it visit every node?
            }
        }
    }
}
```

```

    int n = vars.length;
    int[] tour = findsubtour(getSolution(vars));

    if (tour.length < n) {
        // Add subtour elimination constraint
        GRBLinExpr expr = new GRBLinExpr();
        for (int i = 0; i < tour.length; i++)
            for (int j = i+1; j < tour.length; j++)
                expr.addTerm(1.0, vars[tour[i]][tour[j]]);
        addLazy(expr, GRB.LESS_EQUAL, tour.length-1);
    }
}
} catch (GRBException e) {
    System.out.println("Error code: " + e.getErrorCode() + ". " +
        e.getMessage());
    e.printStackTrace();
}
}

// Given an integer-feasible solution 'sol', return the smallest
// sub-tour (as a list of node indices).

protected static int[] findsubtour(double[][] sol)
{
    int n = sol.length;
    boolean[] seen = new boolean[n];
    int[] tour = new int[n];
    int bestind, bestlen;
    int i, node, len, start;

    for (i = 0; i < n; i++)
        seen[i] = false;

    start = 0;
    bestlen = n+1;
    bestind = -1;
    node = 0;

```

```

while (start < n) {
    for (node = 0; node < n; node++)
        if (!seen[node])
            break;
    if (node == n)
        break;
    for (len = 0; len < n; len++) {
        tour[start+len] = node;
        seen[node] = true;
        for (i = 0; i < n; i++) {
            if (sol[node][i] > 0.5 && !seen[i]) {
                node = i;
                break;
            }
        }
        if (i == n) {
            len++;
            if (len < bestlen) {
                bestlen = len;
                bestind = start;
            }
            start += len;
            break;
        }
    }
}

int result[] = new int[bestlen];
for (i = 0; i < bestlen; i++)
    result[i] = tour[bestind+i];
return result;
}

// Euclidean distance between points 'i' and 'j'

protected static double distance(double[] x,
                                   double[] y,

```

```

        int i,
        int j) {

    double dx = x[i]-x[j];
    double dy = y[i]-y[j];
    return Math.sqrt(dx*dx+dy*dy);
}

public static void main(String[] args) {

    if (args.length < 1) {
        System.out.println("Usage: java Tsp ncities");
        System.exit(1);
    }

    int n = Integer.parseInt(args[0]);

    try {
        GRBEnv env = new GRBEnv();
        GRBModel model = new GRBModel(env);

        // Must set LazyConstraints parameter when using lazy constraints

        model.set(GRB.IntParam.LazyConstraints, 1);

        double[] x = new double[n];
        double[] y = new double[n];

        for (int i = 0; i < n; i++) {
            x[i] = Math.random();
            y[i] = Math.random();
        }

        // Create variables

        GRBVar[][] vars = new GRBVar[n][n];

        for (int i = 0; i < n; i++)

```

```

for (int j = 0; j <= i; j++) {
    vars[i][j] = model.addVar(0.0, 1.0, distance(x, y, i, j),
                              GRB.BINARY,
                              "x"+String.valueOf(i)+"_"+String.valueOf(j));
    vars[j][i] = vars[i][j];
}

// Degree-2 constraints

for (int i = 0; i < n; i++) {
    GRBLinExpr expr = new GRBLinExpr();
    for (int j = 0; j < n; j++)
        expr.addTerm(1.0, vars[i][j]);
    model.addConstr(expr, GRB.EQUAL, 2.0, "deg2_"+String.valueOf(i));
}

// Forbid edge from node back to itself

for (int i = 0; i < n; i++)
    vars[i][i].set(GRB.DoubleAttr.UB, 0.0);

model.setCallback(new Tsp(vars));
model.optimize();

if (model.get(GRB.IntAttr.SolCount) > 0) {
    int[] tour = findsubtour(model.get(GRB.DoubleAttr.X, vars));
    assert tour.length == n;

    System.out.print("Tour: ");
    for (int i = 0; i < tour.length; i++)
        System.out.print(String.valueOf(tour[i]) + " ");
    System.out.println();
}

// Dispose of model and environment
model.dispose();
env.dispose();

```

```
    } catch (GRBException e) {  
        System.out.println("Error code: " + e.getErrorCode() + ". " +  
            e.getMessage());  
        e.printStackTrace();  
    }  
}  
}
```

Referências

- Abbas, O. A. (2008). Comparisons between data clustering algorithms. *International Arab Journal of Information Technology (IAJIT)*, 5(3).
- Abelem, A. J. G., Albuquerque, C. V. N., Saade, D. C. M., Aguiar, J. L., Elisângela Santana Duarte, Da Fonseca, J. E. M., & Magalhães, L. C. S. (2007). Redes mesh: Mobilidade, qualidade de serviço e comunicação em grupo. *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas distribuídos (SBRC), Pará, PA, Brasil*.
- Agatz, N., Bouman, P., & Schmidt, M. (2018). Optimization approaches for the traveling salesman problem with drone. *Transportation Science*, 52(4), 965–981.
- Agrawal, D., & Zeng, Q.-A. (2015). *Introduction to wireless and mobile systems*. Cengage Learning.
- Albuquerque, J. C. d., Lucena, S. C. d., Campos, C. A. V., Simões, J. E., & Moura, P. N. d. S. (2019). Análise de heurísticas de tsp para planejamento de rota de vants em cenários de emergência. In *L sbpo 2018*.
- Ali, S., Qadir, J., & Baig, A. (2010). Routing protocols in delay tolerant networks-a survey. In *2010 6th international conference on emerging technologies (icet)* (pp. 70–75).
- Apvrille, L., Tanzi, T., & Dugelay, J.-L. (2014). Autonomous drones for assisting rescue services within the context of natural disasters. In *General assembly and scientific symposium (ursi gass), 2014 xxxith ursi* (pp. 1–4).
- Arlindo Bastos de Miranda, I. E. S. d. A. (2009). Análise do emprego de veículos aéreos não tripulados (vant) nas ações e operações da pm. *Universidade do Estado da Bahia, monografia do curso de especialização e segurança pública*.
- Arora, S. (1996). Polynomial time approximation schemes for euclidean tsp and other geometric problems. In *Proceedings of 37th conference on foundations of computer science* (pp. 2–11).
- Austin, R. (2011). *Unmanned aircraft systems: Uavs design, development and deployment* (Vol. 54). John Wiley & Sons.
- B. Dantzig, G., R. Fulkerson, D., & M. Johnson, S. (1954, 01). Solution of a large-scale traveling salesman problem. *Operations Research*, 2, 393-410. doi: 10.1287/opre.2.4.393
- Beard, R. W., Kingston, D., Quigley, M., Snyder, D., Christiansen, R., Johnson, W., . . . Goodrich, M. (2005). Autonomous vehicle technologies for small fixed-wing uavs. *Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication*, 2(1), 92–108.
- Bekmezci, I., Sahingoz, O. K., & Temel, Ş. (2013a). Flying ad-hoc networks (fanets): A survey. *Ad Hoc Networks*, 11(3), 1254–1270.

- Bekmezci, I., Sahingoz, O. K., & Temel, Ş. (2013b). Flying ad-hoc networks (fanets): a survey. *Ad Hoc Networks*, *11*(3), 1254–1270.
- Bektas, T. (2006a). The multiple traveling salesman problem: an overview of formulations and solution procedures. *Omega*, *34*(3), 209–219.
- Bektas, T. (2006b, 06). The multiple traveling salesman problem: An overview of formulations and solution procedures. *Omega*, *34*, 209-219. doi: 10.1016/j.omega.2004.10.004
- Bouckaert, R. R., Frank, E., Hall, M., Kirkby, R., Reutemann, P., Seewald, A., & Scuse, D. (2013). Weka manual for version 3-7-8. *Hamilton, New Zealand*.
- Braunstein, B., Trimble, T., Mishra, R., Manoj, B., Lenert, L., & Rao, R. (2006). Challenges in using distributed wireless mesh networks in emergency response. In *Proceedings of the 3rd international iscram conference* (pp. 30–38).
- Burgess, J., Gallagher, B., Jensen, D., & Levine, B. N. (2006). Maxprop: Routing for vehicle-based disruption-tolerant networks. In *Proc. ieee infocom* (Vol. 6, pp. 1–11).
- Bürkle, A., Segor, F., & Kollmann, M. (2011). Towards autonomous micro uav swarms. *Journal of intelligent & robotic systems*, *61*(1-4), 339–353.
- Chakrabarty, A., & Langelaan, J. W. (2009). Energy maps for long-range path planning for small-and micro-uavs. In *Guidance, navigation and control conference* (Vol. 2009, p. 6113).
- Chenji, H., Zhang, W., Stoleru, R., & Arnett, C. (2013). Distressnet: A disaster response system providing constant availability cloud-like services. *Ad Hoc Networks*, *11*(8), 2440–2460.
- Collie, S. (2019). Disponível em: <<https://newatlas.com/dji-geolocation-update/49643/>>. Acessado em: 26 março 2019.
- Constantinescu, S.-G. (2013). Uavs use for the support of emergency response teams specific missions. *INCAS Bulletin*, *5*(1).
- de Albuquerque, J. C., de Lucena, S. C., & Campos, C. A. V. (2014). Investigação sobre o uso de vants em redes dtn para cenários de emergência. *XIX Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços– WGRS*.
- de Albuquerque, J. C., de Lucena, S. C., & Campos, C. A. V. (2016). Evaluating data communications in natural disaster scenarios using opportunistic networks with unmanned aerial vehicles. In *Intelligent transportation systems (itsc), 2016 ieee 19th international conference on* (pp. 1452–1457).
- de Araujo, S. B. (2009). Manual de planejamento de emergência. *Higher Education*, 1–8.
- de Freitas, E. P., Heimfarth, T., Netto, I. F., Lino, C. E., Pereira, C. E., Ferreira, A. M.,

- ... Larsson, T. (2010). Uav relay network to support wsn connectivity. In *Ultra modern telecommunications and control systems and workshops (icumt), 2010 international congress on* (pp. 309–314).
- Demmer, M., & Fall, K. (2007). Dtlr: delay tolerant routing for developing regions. In *Proceedings of the 2007 workshop on networked systems for developing regions* (p. 5).
- DHgate, a. (2019). Disponível em:<<https://www.dhgate.com/product/original-jjrc-h36-mini-drone-2-4g-4ch-6-axis/394397768.html>>. *Acessado em: 26 março 2019.*
- Dilmaghani, R. B., Manoj, B., & Rao, R. R. (2006). Emergency communication challenges and privacy. In *Proceedings of the 3rd international iscram conference, b. van de walle and m. turoff, eds. newark, nj.*
- Dilmaghani, R. B., & Rao, R. R. (2008). A wireless mesh infrastructure deployment with application for emergency scenarios. In *5th international iscram conference.*
- Dorigo, M., Maniezzo, V., & Coloni, A. (1996). Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 26(1), 29–41.
- dos Santos, E. V., Mota, V. F. S., & Neto, D. O. G. (2008). Introduzindo tolerância a interrupções em redes ad hoc móveis. *Universidade Federal de Minas Gerais, Trabalho de conclusão de curso de Engenharia de Aplicações de Rede.*
- Fall, K., Iannaccone, G., Kannan, J., Silveira, F., & Taft, N. (2010). A disruption-tolerant architecture for secure and efficient disaster response communications. *Proceedings of ISCRAM.*
- Ferreira, A. F. E. (2011). Um modelo de apoio a percepção situacional na resposta a emergências.
- Foster, C. S. (2017). Mobile communications and decision support applications. *Homeland Security Technologies for the 21st Century*, 221.
- FutabaRC. (2019). Disponível em:<<https://www.futabarc.com/systems/futk9542-18mzwc/futk9542-gallery4-lg.jpg>>. *Acessado em: 26 março 2019.*
- Garcia-Macias, J. A., & Gomez, J. (2007). Manet versus wsn. In *Sensor networks and configuration* (pp. 369–388). Springer.
- Gelenbe, E., & Gorbil, G. (2012). Wireless networks in emergency management. In *Proceedings of the first acm international workshop on practical issues and applications in next generation wireless networks* (pp. 1–6).
- GeoMidpoint. (2019). Disponível em:<<http://www.geomidpoint.com/random/>>. *Acessado em: 26 março 2019.*
- Gomes, T., Tapolcai, J., Esposito, C., Hutchison, D., Kuipers, F., Rak, J., ... others (2016). A survey of strategies for communication networks to protect against large-

- scale natural disasters. In *Resilient networks design and modeling (rndm), 2016 8th international workshop on* (pp. 11–22).
- Google. (2013). *loon for all*. URL <https://www.google.com/loon/>.
- Governo, E. (2019). Disponível em: <<https://www.pilotopolicial.com.br/bope-comeca-a-utilizar-vant-em-operacoes-especiais-no-rio/>>. *Acessado em: 26 março 2019*.
- Griffin, B. D. (2009). Emergency management terms and concepts. *Higher Education*, 1–8.
- Gurobi. (2018). *Implementação do tsp no gurobi solver*. <http://examples.gurobi.com/traveling-salesman-problem/>. (Acessado em: 17 janeiro. 2018)
- Gurobi Optimization, I. (2018). *Gurobi 7.5 performance benchmarks*.
- Harald. (2018). *Implementação do algoritmo de christofides*. <https://github.com/faisal22/Christofides>. (Acessado em: 17 janeiro. 2018)
- Hasnain, Z., Hubbard, J. E., & Cunningham, M. A. (2016). A proposed architecture for coordinating first response through small unmanned aerial systems. In *Unmanned aircraft systems (icuas), 2016 international conference on* (pp. 1066–1074).
- Hayat, S., Yanmaz, E., & Bettstetter, C. (2015). Experimental analysis of multipoint-to-point uav communications with ieee 802.11 n and 802.11 ac. In *2015 ieee 26th annual international symposium on personal, indoor, and mobile radio communications (pimrc)* (pp. 1991–1996).
- Hayat, S., Yanmaz, E., & Muzaffar, R. (2016). Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: A communications viewpoint. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(4), 2624–2661.
- Hertz, G. R., Denteneer, D., Max, S., Taori, R., Cardona, J., Berlemann, L., & Walke, B. (2010). Ieee 802.11 s: the wlan mesh standard. *Wireless Communications, IEEE*, 17(1), 104–111.
- Hoebcke, J., Moerman, I., Dhoedt, B., & Demeester, P. (2006). Redes ad hoc móveis. *RTI, Redes, Telecom e Instalações*, 6(69), 64–74.
- Hurkens, C. A., & Woeginger, G. J. (2004). On the nearest neighbor rule for the traveling salesman problem. *Operations Research Letters*, 32(1), 1–4.
- Jiang, P., Bigham, J., & Bodanese, E. (2011). Adaptive service provisioning for emergency communications with dtn. In *Wireless communications and networking conference (wcnc), 2011 ieee* (pp. 2125–2130).
- Junior, G., Carlos Alberto de Araujo, A., & Luiz, M. (2010). Capacitação em defesa civil: sistema de comando em operações–sco. *Apostila de Capacitação a Distância*. s/d.
- Karp, R. M., & Papadimitriou, C. H. (1982). On linear characterizations of combinatorial optimization problems. *SIAM Journal on Computing*, 11(4), 410–432.
- Kawaguti, L. (2019). Disponível em: <<https://www.forte.jor.br/2010/11/08/exercito-testa->

- vant-nacional-em-manobra-militar/>. *Acessado em: 26 março 2019.*
- Keränen, A., Ott, J., & Kärkkäinen, T. (2009). The ONE Simulator for DTN Protocol Evaluation. In *Simutools '09: Proceedings of the 2nd international conference on simulation tools and techniques*. New York, NY, USA: ICST.
- Kopp, C. (1999). Ad hoc networking. *Systems Journal*, 33–40.
- Lagkas, T., Argyriou, V., Bibi, S., & Sarigiannidis, P. (2018). Uav iot framework views and challenges: Towards protecting drones as “things”. *Sensors*, 18(11), 4015.
- Lancia, G., & Serafini, P. (2018). Traveling salesman problems. In *Compact extended linear programming models* (pp. 155–164). Springer.
- Latah, M. (2016). Solving multiple tsp problem by k-means and crossover based modified aco algorithm. *IJERT*, 5(2), 430–4.
- Li, F., & Wang, Y. (2007). Routing in vehicular ad hoc networks: A survey. *Vehicular Technology Magazine, IEEE*, 2(2), 12–22.
- Lima, D. A. d. (2018). Aplicação do modelo do caixeiro-viajante de programação linear no roteamento de veículos de uma indústria gráfica.
- Lin, X., Yajnanarayana, V., Muruganathan, S. D., Gao, S., Asplund, H., Maattanen, H.-L., ... Wang, Y.-P. E. (2018). The sky is not the limit: Lte for unmanned aerial vehicles. *IEEE Communications Magazine*, 56(4), 204–210.
- Lindgren, A., Doria, A., & Schelen, O. (2003). Probabilistic routing in intermittently connected networks. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 7(3), 19–20.
- Liu, F., & Zeng, G. (2009). Study of genetic algorithm with reinforcement learning to solve the tsp. *Expert Systems with Applications*, 36(3), 6995–7001.
- Longhitano, G. A. (2010). Vants para sensoriamento remoto: aplicabilidade na avaliação e monitoramento de impactos ambientais causados por acidentes com cargas perigosas). In *Conferência das nações unidas, rio+20, rio de janeiro, brasil*.
- Lora, A. (2019). Disponível em:< <https://loro-alliance.org/about-lorawan>>. *Acessado em: 26 março 2019.*
- Manoj, B. S., & Baker, A. H. (2007). Communication challenges in emergency response. *Communications of the ACM*, 50(3), 51–53.
- Manyam, S. G., Rasmussen, S., Casbeer, D. W., Kalyanam, K., & Manickam, S. (2017). Multi-uav routing for persistent intelligence surveillance & reconnaissance missions. In *Unmanned aircraft systems (icuas), 2017 international conference on* (pp. 573–580).
- Martin Campillo, A., Crowcroft, J., Yoneki, E., & Marti, R. (2012). Evaluating opportunistic networks in disaster scenarios. *Journal of Network and Computer Applications*.

- Merwaday, A., Tuncer, A., Kumbhar, A., & Guvenc, I. (2016). Improved throughput coverage in natural disasters: Unmanned aerial base stations for public-safety communications. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, *11*(4), 53–60.
- Mete, H. O., & Zabinsky, Z. B. (2010). Stochastic optimization of medical supply location and distribution in disaster management. *International Journal of Production Economics*, *126*(1), 76–84.
- Michaelis, D. (2019). Disponível em:< <http://michaelis.uol.com.br>>. Acesso em, 19(03).
- Miller, R. (2006). *Hurricane katrina: Communications & infrastructure impacts* (Tech. Rep.). National Defense Univ Fort McNair DC.
- Mohammed, M. A., Ghani, M. K. A., Hamed, R. I., Mostafa, S. A., Ibrahim, D. A., Jameel, H. K., & Alallah, A. H. (2017). Solving vehicle routing problem by using improved k-nearest neighbor algorithm for best solution. *Journal of Computational Science*, *21*, 232–240.
- Morgenthaler, S., Braun, T., Zhao, Z., Staub, T., & Anwander, M. (2012). Uavnet: A mobile wireless mesh network using unmanned aerial vehicles. In *Globecom workshops (gc wkshps), 2012 ieee* (pp. 1603–1608).
- Mota, V. F., Silva, T. H., & Nogueira, J. M. S. (2009). Introduzindo tolerância a interrupção em redes ad hoc móveis para cenários de emergência. *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas distribuídos (SBRC), Recife, PE, Brasil*.
- Mousa, A., El-Shorbagy, M., & Farag, M. (2017). K-means-clustering based evolutionary algorithm for multi-objective resource allocation problems. *Appl. Math*, *11*(6), 1681–1692.
- Nilsson, C. (2003). Heuristics for the traveling salesman problem. *Linkoping University*, 1–6.
- Okada, N. (2004). Urban diagnosis and integrated disaster risk management. *Journal of Natural Disaster Science*, *26*(2), 49–54.
- Oliveira, A. F. M. d. A. (2015). *Extensões do problema do caixeiro viajante* (Unpublished master's thesis).
- Palazzi, C., Roseti, C., Luglio, M., Gerla, M., Sanadidi, M., & Stepanek, J. (2004). Satellite coverage in urban areas using unmanned airborne vehicles (uavs). In *Vehicular technology conference, 2004. vtc 2004-spring. 2004 ieee 59th* (Vol. 5, pp. 2886–2890).
- Perez-Carabaza, S., Besada-Portas, E., Lopez-Orozco, J. A., & Jesus, M. (2018). Ant colony optimization for multi-uav minimum time search in uncertain domains. *Applied Soft Computing*, *62*, 789–806.
- Poor, R. D. (2000, February 22). *Self-organizing network*. Google Patents. (US Patent

6,028,857)

- Qian, Z., Wang, G., Wang, J., & Shi, Y. (2015). Route planning of uav based on improved ant colony algorithm. In *International conference on logistics engineering, management and computer science (lemcs 2015)*.
- Ramon, J., & Bruynooghe, M. (1998). A framework for defining distances between first-order logic objects. In *International conference on inductive logic programming* (pp. 271–280).
- Reinelt, G. (1991). Tsplib—a traveling salesman problem library. *ORSA journal on computing*, 3(4), 376–384.
- REIS, J. T., Madruga, R. A., & SAUSEN, T. M. (2011). Sistematização de ocorrências de desastres naturais na região sul do brasil em 2011. *Congresso Brasileiro sobre Desastres Naturais, Rio Claro, SP, Brasil*.
- Roberge, V., Tarbouchi, M., & Labonté, G. (2018). Fast genetic algorithm path planner for fixed-wing military uav using gpu. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 54(5), 2105–2117.
- Saade, D., Albuquerque, C., Magalhaes, L., Passos, D., Duarte, J., & Valle, R. (2007). Redes em malha: Solução de baixo custo para popularização do acesso à internet no brasil. *XXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações-SBrT*, 1–6.
- Sahingoz, O. K. (2014). Networking models in flying ad-hoc networks (fanets): Concepts and challenges. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 74(1-2), 513–527.
- Sakurai, M., & Watson, R. T. (2015). Securing communication channels in severe disaster situations-lessons from a japanese earthquake. In *Isoram*.
- Santos, R., & Ochoa, S. F. (2011). Disseminating shared information in disaster relief efforts: A communication computable model. In *Systems, man, and cybernetics (smc), 2011 ieee international conference on* (pp. 3446–3451).
- Sarris, Z., & ATLAS, S. (2001). Survey of uav applications in civil markets (june 2001). In *The 9 th ieee mediterranean conference on control and automation (med'01)*.
- senator h i. mackdonald. (1998). an innovative robot aircraft for atmospheric monitoring parliament house.
- Sheu, J.-B. (2007). An emergency logistics distribution approach for quick response to urgent relief demand in disasters. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 43(6), 687–709.
- Shi, W., Zhou, H., Li, J., Xu, W., Zhang, N., & Shen, X. (2018). Drone assisted vehicular networks: Architecture, challenges and opportunities. *IEEE Network*, 32(3), 130–137.
- Singh, A., Yadav, A., & Rana, A. (2013). K-means with three different distance metrics. *International Journal of Computer Applications*, 67(10).

- Sivakumar, A., & Tan, C. (2009). Formation control for lightweight uavs under realistic communications and wind conditions. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*. Chicago: AIAA.
- Sivakumar, A., & Tan, C. K.-Y. (2010). Uav swarm coordination using cooperative control for establishing a wireless communications backbone. In *Proceedings of the 9th international conference on autonomous agents and multiagent systems: volume 3-volume 3* (pp. 1157–1164).
- Skydrones. (2019). Disponível em: <<https://skydrones.com.br/zangao-v/>>. Acessado em: 26 março 2019.
- Sofge, D., Schultz, A., & De Jong, K. (2002). Evolutionary computational approaches to solving the multiple traveling salesman problem using a neighborhood attractor schema. In *Workshops on applications of evolutionary computation* (pp. 153–162).
- Song, X., Zhang, Q., Sekimoto, Y., & Shibasaki, R. (2014). Prediction of human emergency behavior and their mobility following large-scale disaster. In *Proceedings of the 20th acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining* (pp. 5–14).
- Sonmez, A., Kocyigit, E., & Kugu, E. (2015). Optimal path planning for uavs using genetic algorithm. In *2015 international conference on unmanned aircraft systems (icuas)* (pp. 50–55).
- Souza, R. (2019). Disponível em: <<https://aerobraganca.files.wordpress.com/2011/03/trex600.jpg>>. Acessado em: 26 março 2019.
- Spyropoulos, T., Psounis, K., & Raghavendra, C. S. (2005). Spray and wait: an efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks. In *Proceedings of the 2005 acm sigcomm workshop on delay-tolerant networking* (pp. 252–259).
- Stanczak, J., Koziół, D., Kovács, I. Z., Wigard, J., Wimmer, M., & Amorim, R. (2018). Enhanced unmanned aerial vehicle communication support in lte-advanced. In *2018 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)* (pp. 1–6).
- Steiniger, S., & Hunter, A. J. (2012). Openjump horae—a free GIS and toolbox for home-range analysis. *Wildlife Society Bulletin*, 36(3), 600–608.
- Tan, L.-Z., Tan, Y.-Y., Yun, G.-X., & Zhang, C. (2017). An improved genetic algorithm based on k-means clustering for solving traveling salesman problem. In *Computer science, technology and application: Proceedings of the 2016 international conference on computer science, technology and application (CSTA2016)* (pp. 334–343).
- Turoff, M. (2015). The paradox of emergency management. In *IsScram*.
- Uchida, N., Kawamura, N., Williams, N., Takahata, K., & Shibata, Y. (2013). Proposal

- of delay tolerant network with cognitive wireless network for disaster information network system. In *Advanced information networking and applications workshops (waina), 2013 27th international conference on* (pp. 249–254).
- Uriti, M. S., & Kumar, S. A. S. (2017). Partially optimistic uav route planning & formation planning using ant colony optimization algorithm. *International Research Journal of Engineering and Technology - IRJET*.
- Uriti, S., & kumar, S. A. S. (2017). Partially optimistic uav route planning formation planning using ant colony optimization algorithm. *IRJET*, 4(10).
- Vahdat, A., & Becker, D. (2000). Epidemic routing for partially-connected ad hoc networks. *Technical Report CS-2000-06, Duke University*.
- Venkataraman, V., Acharya, H. B., Shah, H., & Lam, S. (2009). Delay tolerant networking-a tutorial. *Department of Computer Science, The University of Texas*.
- Yarali, A., Ahsant, B., & Rahman, S. (2009). Wireless mesh networking: A key solution for emergency and rural applications. In *Advances in mesh networks, 2009. mesh 2009. second international conference on* (pp. 143–149).
- Yoon, J., Jin, Y., Batsoyol, N., & Lee, H. (2017). Adaptive path planning of uavs for delivering delay-sensitive information to ad-hoc nodes. In *2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)* (pp. 1–6).
- Yousefi, S., Mousavi, M. S., & Fathy, M. (2006). Vehicular ad hoc networks (vanets): challenges and perspectives. In *Its telecommunications proceedings, 2006 6th international conference on* (pp. 761–766).
- Zeadally, S., Hunt, R., Chen, Y.-S., Irwin, A., & Hassan, A. (2012). Vehicular ad hoc networks (vanets): status, results, and challenges. *Telecommunication Systems*, 50(4), 217–241.
- Zhengxiang, Q., Guocheng, W., & Jingen, W. (2015). Uav route planning based on dual populations genetic ant colony algorithm. *5th International Conference on Information Engineering for Mechanics and Materials - ICMM*.
- Ziviani, N. (2013). *Projeto de algoritmos com implementações em java ec+*.