

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Computação



Dissertação

Veículos Aéreos não Tripulados como Sorvedouro Móvel em Redes de Sensores sem Fio: Investigando os Efeitos do Planejamento de Rota na Eficiência da Rede

Jean Roberto Antunes

Pelotas, 2021

Jean Roberto Antunes

Veículos Aéreos não Tripulados como Sorvedouro Móvel em Redes de Sensores sem Fio: Investigando os Efeitos do Planejamento de Rota na Eficiência da Rede

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Orientador: Profa. Dra. Lisane Brisolara de Brisolara
Coorientador: Prof. Dr. Paulo R. Ferreira Jr.

Pelotas, 2021

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

A111v Antunes, Jean Roberto

Veículos aéreos não tripulados como sorvedouro móvel em redes de sensores sem fio : investigando os efeitos do planejamento de rota na eficiência da rede / Jean Roberto Antunes ; Lisane Brisolara de Brisolara, orientadora ; Paulo Roberto Ferreira Junior, coorientador. — Pelotas, 2021.

58 f.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Computação, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2021.

1. Redes de sensores sem fio. 2. Sorvedouro móvel. 3. VANT. 4. Consumo energético. 5. Planejamento de rotas de cobertura. I. Brisolara, Lisane Brisolara de, orient. II. Ferreira Junior, Paulo Roberto, coorient. III. Título.

CDD : 005

Jean Roberto Antunes

Veículos Aéreos não Tripulados como Sorvedouro Móvel em Redes de Sensores sem Fio: Investigando os Efeitos do Planejamento de Rota na Eficiência da Rede

Dissertação aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação, Programa de Pós-Graduação em Computação, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 20 de abril de 2021

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Lisane Brisolara de Brisolara (orientadora)
Doutora em Computação pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Paulo Roberto Ferreira Jr. (coorientador)
Doutor em Computação pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Leonardo Bidese de Pinho
Doutor em Computação pela Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Prof. Dr. Tauã Milech Cabreira
Doutor em Computação pela Universidade Federal de Pelotas.

Prof. Dr. Felipe de Souza Marques
Doutor em Computação pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Dedico este trabalho ao meu pai Jaci Eleodoro Acunha Antunes e minha família, que sempre acreditaram em mim e me deram todo apoio para que eu atingisse meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família, em especial para minha namorada Neyla, minha vida, por toda paciência e compreensão nesta etapa tão importante em minha carreira.

A professora Lisane, minha orientadora, agradeço pelas inúmeras correções, ideias, sugestões e paciência que tanto contribuíram para conclusão desta dissertação.

Ao professor Paulo, meu coorientador, agradeço por toda ajuda e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Google, pelo suporte financeiro parcial a esta pesquisa através do 2019 Google Research Awards in LatAm Program.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram ou fizeram parte desta etapa tão importante em minha vida.

A persistência é o menor caminho do êxito.

— CHARLES CHAPLIN

RESUMO

ANTUNES, Jean Roberto. **Veículos Aéreos não Tripulados como Sorvedouro Móvel em Redes de Sensores sem Fio: Investigando os Efeitos do Planejamento de Rota na Eficiência da Rede**. Orientador: Lisane Brisolara de Brisolara. 2021. 58 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2021.

As redes de sensores sem fio (RSSFs) vêm sendo utilizadas nos mais diversos domínios de aplicação. O desempenho dessas redes depende diretamente da cobertura da rede bem como da carga das baterias de seus nodos sensores, já que nodos descarregados causam lacunas na rede. A descarga de bateria dos nodos ocorre principalmente decorrente da transmissão de mensagens e do processamento de eventos em redes reativas, e definirá o tempo de vida da rede. Por este motivo, a preocupação com consumo energético vêm motivando pesquisas e a proposição de técnicas para diminuir o consumo dos nodos sensores. Algumas destas empregando o uso de sorvedouros móveis ao invés de estáticos de forma a evitar o envio de mensagens em *multi-hop* pela rede e, conseqüentemente, reduzir o consumo energético dos nodos decorrente da transmissão de mensagens. Como sorvedouro móvel normalmente é usado um veículo aéreo não tripulado (VANT) que sobrevoa e coleta eventos dos nodos sensores. Realizar o planejamento da rota do sorvedouro móvel é essencial para garantir a coleta de dados e um bom tempo de resposta aos eventos capturados pela rede. Neste trabalho é investigado o impacto do uso de um VANT como coletor de dados no tempo de vida e na cobertura das redes de sensores sem fio, comparando a RSSF com o sorvedouro móvel considerando os planejamentos de rota zig-zag e espiral, com a RSSF empregando *multi-hop* e sorvedouro fixo. Neste comparativo, diferentes densidades de rede foram avaliadas, assim como diferentes proporções entre os custos energéticos associados à comunicação e à computação. Em todos os experimentos realizados, a rede com sorvedouro móvel, seja com o planejamento de rota zig-zag ou espiral, superou a RSSF padrão com sorvedouro fixo. Os resultados mostraram que o sorvedouro móvel voando em espiral capturou mais eventos que o sorvedouro em zig-zag. Com relação ao tempo de vida da rede, as redes com sorvedouro móvel com rota em espiral e com rota em zig-zag não apresentaram diferenças estatisticamente significativas, porém o emprego do sorvedouro móvel independente da rota fez com que a rede sobrevivesse mais tempo que a rede com sorvedouro fixo.

Palavras-chave: Redes de Sensores sem Fio. Sorvedouro móvel. VANT. Consumo energético. Planejamento de Rotas de Cobertura.

ABSTRACT

ANTUNES, Jean Roberto. **Unmanned Aerial Vehicles as a Mobile Sink in Wireless Sensor Networks: Investigating the Effects of Route Planning on Network Efficiency**. Advisor: Lisane Brisolara de Brisolara. 2021. 58 f. Dissertation (Masters in Computer Science) – Technology Development Center, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2021.

Wireless sensor networks (WSNs) have been applied in the most diverse application domains. The performance of these networks depends directly on the network coverage as well as the battery charge of its sensor nodes, since discharged nodes cause gaps in the network. The battery discharge from the sensor nodes occurs mainly due to the transmission of messages and the processing of events in reactive networks, and will define the network lifetime. For this reason, the concern with energy consumption has motivated researches and the proposal of techniques to reduce the consumption of the sensor nodes. Some of these techniques employ the use of mobile instead of static sinks in order to avoid sending multi-hop messages over the network and, thus, reduce the energy consumption of the nodes resulting from the transmission of messages. As a mobile sink, an unmanned aerial vehicle (UAV) is usually used to fly over and collect events from the sensor nodes. Planning the route of the mobile sink is essential to ensure data collection and a good response time to events captured by the network. In this work, the impact of the use of a UAV as a data collector on the lifetime and coverage of wireless sensor networks is investigated, comparing the WSN with the mobile sink considering the zigzag and spiral route planning, with the WSN employing multi-hop and a static sink. In this comparison, different network densities were evaluated, as well as different proportions between the energy costs associated with communication and computing. In all the experiments carried out, the network with mobile sink, whether with zig-zag or spiral route planning, surpassed the standard WSN with fixed sink. The results showed that the mobile spiral sink captured more events than the zigzag sink. Regarding the network lifetime, the networks with a mobile sink employing a spiral route and a zigzag route did not show statistically significant differences. However, the use of the mobile sink independent of the used route planning made the network survive longer than the one with a fixed sink.

Keywords: Wireless sensor networks. Mobile sink. UAV. Energy consumption. Coverage Path Planning.

LISTA DE FIGURAS

1	Arquitetura de um RSSF. Baseada em SALAMA AHMED (2015) . . .	19
2	Hardware básico de um nodo sensor. Baseada em LOUREIRO et al. (2003)	20
3	Diagrama de classes do Eboracum - modelo da plataforma (MARQUES ET AL., 2016)	22
4	Decomposição celular exata	24
5	Decomposição celular aproximada	25
6	Padrões geométricos simples em áreas retangulares sem decomposição celular: (a) zig-zag, (b) espiral	26
7	Diagrama de Classe - Extensão do Eboracum proposta	33
8	Protocolo de Comunicação VANT e Nodo: (a) início da comunicação, (b) resposta do nodo, (c) coleta dos dados	34
9	Voo em zig-zag em cenário de RSSF com 49 nodos em grade . . .	35
10	Voo em espiral em cenário de RSSF com 49 nodos em grade . . .	36
11	Cenário de simulação: 49 nodos	39
12	Cenário de simulação: 64 nodos	39
13	Cenário de simulação: 81 nodos	40
14	Cenário de simulação: 100 nodos	40
15	Eventos capturados configuração 25% de comunicação por 75% CPU	43
16	Tempo de vida da rede config. 25% de comunicação por 75% CPU	43
17	Eventos capturados config. 50% de comunicação por 50% CPU . .	45
18	Tempo de vida da rede config. 50% de comunicação por 50% CPU	45
19	Eventos capturados config. 75% de comunicação por 25% CPU . .	47
20	Tempo de vida da rede config. 50% de comunicação por 50% CPU	47
21	Tempo de vida da rede config. 75% de comunicação por 25% CPU	48

LISTA DE TABELAS

1	Raios de comunicação e sensoriamento por densidade	37
2	Custos energéticos e capacidade de bateria	38
3	Média e desvio padrão do número de eventos para config. 25% por 75%	42
4	Média de dias e desvio padrão para config. 25% por 75%	43
5	Média e desvio padrão do número de eventos para config. 50% por 50%	44
6	Média de dias e desvio padrão para config. 50% por 50%	45
7	Média e desvio padrão do número de eventos para config. 75% por 25%	46
8	Média de dias e desvio padrão para config. 75% por 25%	47
9	Média do número de eventos senseados nas configurações avaliadas	49
10	Média de dias nas configurações avaliadas	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CPP	Coverage Path Planning,
CPU	Central Processing Unit
FIFO	First In First Out
FPPWR	Fast Path Planning with Rules
GPS	Global Positioning System
LEACH	Low-energy adaptive clustering hierarchy
RS	Remote Sensing
RSSF	Redes de Sensores sem Fio
SPP	Spiral Path Planning
TSP	Travelling salesman problem
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
VANT	Veículo Aéreo não Tripulado
WSN	Wireless Sensor Network
XML	eXtensible Markup Language

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Redes de Sensores Sem Fio	18
2.1.1	Arquitetura e Componentes	19
2.1.2	Simulação de RSSF no Eboracum	21
2.2	Planejamento de Rota para VANTs	23
3	TRABALHOS RELACIONADOS	28
4	AVALIAÇÃO PROPOSTA	32
4.1	Desenvolvimento	32
4.2	Metodologia	36
5	EXPERIMENTOS	41
5.1	25% de comunicação por 75% CPU	41
5.2	50% de comunicação por 50% CPU	44
5.3	75% de comunicação por 25% CPU	46
5.4	Discussão	47
6	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

As redes de sensores sem fio (RSSFs) são sistemas distribuídos que cooperam para o monitoramento da ocorrência de fenômenos e eventos. Esses sistemas possuem os mais diversos domínios de aplicação, dentre os quais encontram-se o monitoramento de variáveis ambientais como controles de pesticidas (SHINGHAL ET AL., 2010), o controle de sistemas de irrigação (KIM; EVANS; IVERSEN, 2008), monitoramento de animais ameaçados de extinção (XU ET AL., 2015) e o monitoramento de estabilidade de estruturas (CERIOTTI ET AL., 2009).

Os nodos sensores de uma RSSF possuem recursos limitados. Usualmente possuem baixa capacidade computacional, raio de comunicação limitado, pouca memória e funcionam à base de baterias, muitas vezes, não recarregáveis. Como os nodos sensores, frequentemente, estão espalhados em uma área grande e de difícil acesso, o tempo de vida da rede depende diretamente da manutenção da carga de suas baterias. Além disso, devido ao raio de comunicação limitado aliado às adversidades do ambiente, como áreas fragmentadas e superfícies irregulares, uma grande quantidade de nodos é necessária para monitorar grandes áreas (VALENTE ET AL., 2011).

Tradicionalmente, em uma RSSF, a informação é enviada para o sorvedouro utilizando a abordagem *multi-hop* (múltiplos saltos), o que acaba esgotando a bateria dos nodos sensores próximos ao sorvedouro devido ao excesso de encaminhamento de dados, formando buracos na cobertura da rede e também quebrando conexões entre nodos (YANG; MIAO, 2017). Outra limitação das RSSF é em relação a qualidade da comunicação. Para transmissões de longa distância ocorrem problemas de atenuação de sinal, ruídos e interferências, assim como perda de intensidade de sinal devido a altura das plantações e densidade da folhagem (ZHANG ET AL., 2018). Estes problemas na comunicação também podem quebrar conexões e deixar nodos incomunicáveis.

Coletores móveis ou sorvedouros móveis podem resolver problemas de comunicação entre nodos distantes ou que sofrem interferência do meio. Ao mesmo tempo, estes coletores podem reduzir o consumo dos nodos no que se refere a retransmissão de mensagens e, conseqüentemente, podem aumentar o tempo de vida da rede

(SAYYED; BECKER, 2015). Normalmente, veículos aéreos não tripulados (VANTs) são empregados como sorvedouros móveis. Em Popescu et al. (2019) são discutidos vários aspectos da integração entre VANTs e RSSF em uma revisão focada em aplicações de monitoramento em larga escala.

No trabalho de Valente et al. (2011) foi proposto um sistema de monitoramento em tempo real de geadas em vinhedos que utiliza um VANT como coletor de dados das RSSFs. Os experimentos foram realizados em uma região ampla e fragmentada em três *clusters*, onde cada *cluster* é uma RSSF isolada. Assim o VANT faz a coleta e permite integrar dados coletados dos clusters.

Os VANTs vêm sendo utilizados em diversos domínios de aplicação, como fotogrametria (DI FRANCO; BUTTAZZO, 2016), fazendas inteligentes (LOTTE ET AL., 2017), inspeção de estruturas (GUERRERO; BESTAOUI, 2013), gerenciamento de desastres (GRIFFIN, 2014) e detecção visual de explosivos (CASTIBLANCO ET AL., 2014). Diversas aplicações de VANTs estão relacionadas ao problema de cobertura de terreno ou CPP (do inglês, *Coverage Path Planning*). Este é um subtópico do planejamento de movimento que consiste em determinar um caminho que garanta a passagem do agente por todos os pontos de um determinado ambiente (CHOSSET, 2001). Muitas vezes, os VANTs executam as missões de cobertura de terreno utilizando padrões de voo geométricos (ANDERSEN, 2014), tais como zig-zag e espiral (CABREIRA; BRISOLARA; FERREIRA JR., 2019).

Atualmente, o uso de VANTs como sorvedouros de dados móveis em RSSFs tem sido alvo de diversas pesquisas. A recente revisão apresentada em Popescu et al. (2019) também indica a exploração na literatura de diferentes estratégias de planejamento de rota para VANTs empregados como sorvedouros móveis. As pesquisas se diferenciam quanto aos objetivos, tais como ampliar o número de nodos coletados durante o voo, reduzir o consumo do VANT, reduzir o tamanho da rota, dentre outros aspectos, ou ainda quanto a arquitetura da rede e/ou algoritmos empregados.

No estudo de Yang; Miao (2017), é proposto um método para planejamento de rota utilizando um VANT como coletor móvel. O método consiste em dividir a região de interesse em *clusters*, determinar a ordem de acesso de cada região e escolher os pontos de encontro por onde o sorvedouro coletará os dados de cada *cluster*. O trabalho realizou uma simulação em um cenário medindo um hectare com nodos distribuídos de forma aleatória. O método proposto foi comparado com o algoritmo conhecido como LEACH (do inglês, *Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy*) (HEINZELMAN; CHANDRAKASAN; BALAKRISHNAN, 2000) quanto ao consumo energético e tempo de vida da rede. Os resultados deste comparativo mostraram que o método proposto por Yang; Miao (2017) superou o algoritmo LEACH, aumentando o tempo de vida da rede em 5.2% e diminuindo o consumo de energia dos nodos.

O trabalho de Yue; Jiang (2018) propõe um algoritmo de planejamento de rota

denominado SPP (do inglês, *Spiral Path Planning*) baseado em decomposição em espiral. O algoritmo proposto tem objetivo de realizar um planejamento de rota rápido de forma a coletar os dados de sensores implantados uniformemente em uma área circular com um raio de 100 km. Os experimentos realizados pelos autores avaliaram tempo de execução do algoritmo e tamanho do caminho gerado. No trabalho de Zhan; Zeng; Zhang (2018) foram realizados estudos de forma a planejar a trajetória do VANT com foco em maximizar o número de nodos visitados em um tempo de voo de 400 segundos. Os experimentos do trabalho foram realizados em uma área de interesse quadrada, medindo 4km x 4km, com os nodos dispostos aleatoriamente. Em ambos os trabalhos o VANT planeja a rota conhecendo a posição dos nodos. No entanto, a menos que os nodos sejam equipados com GPS (do inglês, *Global Positioning System*), esta localização pode não estar disponível.

Dentre os trabalhos encontrados que exploram diferentes algoritmos de caminhos para VANTs coletores de dados, a grande maioria dos trabalhos usa como comparativo métricas como tamanho do caminho ou número dos nodos coletados, sem considerar o consumo de energia dos nodos sensores ou o tempo de vida da rede. Embora um dos benefícios do emprego de VANTs integrados a RSSF seja a redução da sobrecarga de comunicação dos nodos, apenas o trabalho de (YANG; MIAO, 2017) avaliou o impacto das estratégias no tempo de vida da rede, os demais se preocupam em otimizar a energia do VANT para maximizar a cobertura do voo.

A descarga nos nodos de uma RSSF, atualmente, não pode ser considerada apenas referente à comunicação (FERREIRA; BRISOLARA; INDRUSIAK, 2015a), pois devido ao avanço tecnológico estes sensores também podem incluir capacidades de processamento (POPESCU ET AL., 2019). Nas redes reativas, quando um evento acontece este gera um carga de processamento aos nodos da região, causando impacto em suas baterias. Assim, técnicas de otimização para RSSF reativas precisam considerar também a carga de processamento (PEREIRA ET AL., 2020). A análise do tempo de vida da rede apresentada em Yang; Miao (2017) limita-se a RSSF compostas por nodos que só detectam e transmitem dados sem processá-los localmente. Não foram encontrados trabalhos que avaliem diferentes algoritmos de planejamento de rota na coleta dos sensores, considerando descarga decorrentes tanto da comunicação como da computação.

Diante deste contexto, o objetivo do presente trabalho é avaliar o impacto do uso do VANT como sorvedouro móvel em RSSFs utilizando os padrões geométricos de voo zig-zag e espiral na descarga de bateria dos nodos sensores e conseqüentemente no tempo de vida da rede. Os experimentos conduzidos neste trabalho consideraram diferentes densidades de RSSF, assim como diferentes custos energéticos associados à comunicação e à computação, permitindo avaliar quando o VANT como sorvedouro móvel pode aumentar o tempo de vida das RSSFs em comparação à rede tradicional

em *multihop*. Este trabalho também emprega a métrica número de eventos processados, considerada importante na avaliação de desempenho de redes reativas, onde um maior número de eventos processados e coletados significa uma maior cobertura de fenômenos e menos eventos perdidos.

Este trabalho está organizado da seguinte maneira. O Capítulo 2 revisa conceitos de RSSF e o ambiente de simulação empregado (Seção 2.1), bem como os planejamentos de rota para VANTs discutidos neste trabalho (Seção 2.2). O Capítulo 3 apresenta e discute os principais trabalhos relacionados. No Capítulo 4, é apresentado o desenvolvimento dos modelos de simulação empregados (Seção 4.1) e a metodologia deste trabalho, bem como os cenários de avaliação experimental utilizados (Seção 4.2). Os resultados dos experimentos realizados são discutidos no Capítulo 5. O Capítulo 6 reforça as conclusões e indica os possíveis trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo revisa os principais conceitos e fundamentações teóricas relevantes para a compreensão e desenvolvimento do presente trabalho. Inicialmente, são apresentadas definições importantes sobre as redes de sensores sem fio, ilustrando sua arquitetura, componentes e o *framework* utilizado para os experimentos com estas redes. Neste capítulo também é realizada uma revisão sobre os planejamentos de rota utilizados pelos VANTs, com enfoque, principalmente, nos planejamentos empregados nos experimentos deste trabalho.

2.1 Redes de Sensores Sem Fio

O avanço tecnológico das áreas de sistemas distribuídos e comunicação sem fio nos últimos tempos, tem possibilitado o crescimento da área de Redes de Sensores Sem Fio (RSSF). Estes sistemas podem ser utilizados no monitoramento e senso-reamento dos mais diversos domínios de aplicação e vêm sendo alvo de diversas pesquisas.

RSSFs são sistemas distribuídos compostos por nodos sensores de medição com elementos de computação e comunicação que permitem ao administrador da rede controlar, observar e reagir a eventos e fenômenos físicos em um determinado ambiente (SOHRABY; MINOLI; ZNATI, 2007). As RSSFs podem ser homogêneas ou heterogêneas em relação aos tipos, dimensões e funcionalidades dos nodos sensores (LOUREIRO ET AL., 2003). Uma rede é considerada homogênea quando todos os nodos da rede possuem as mesmas configurações (CPU, bateria, raio de transmissão e senso-reamento) e considerada heterogênea quando estas configurações são diferentes.

As RSSFs podem realizar o monitoramento do ambiente de duas formas: proativa e reativa (AKYILDIZ; VURAN, 2010). No sistema de monitoramento proativo, o monitoramento da rede é realizado continuamente e os dados coletados são processados em tempo real. Neste tipo de monitoramento, os nodos sensores tendem a gastar uma maior quantidade de energia, visto que o processador destes nodos precisa se manter

em constante funcionamento. Já na abordagem abordagem reativa, o monitoramento é orientado a eventos, ou seja, o processador do nodo sensor não precisa se manter em constante atividade. Quando esse tipo de abordagem é utilizada, o processador se mantém inativo e consumindo uma baixa quantidade de energia, e só será ativado quando for gerado algum evento no raio de cobertura.

2.1.1 Arquitetura e Componentes

As RSSFs são compostas por uma quantidade variada de nodos sensores capazes de realizar sensoriamento, processamento e comunicação. Estes nodos são geralmente estacionários e alimentados por baterias de capacidade limitada e seu funcionamento consiste em coletar dados do ambiente a ser monitorado via sensores, processar localmente a informação e transmitir essa informação de nodo para nodo até o sorvedouro, normalmente utilizando a abordagem *multi-hop*. Como pode ser observado na Figura 1, as conexões entre os nodos permitem que os eventos capturados sejam transmitidos até o sorvedouro, que por sua vez, pode ter acesso à Internet permitindo que os eventos coletados possam ser analisados remotamente.

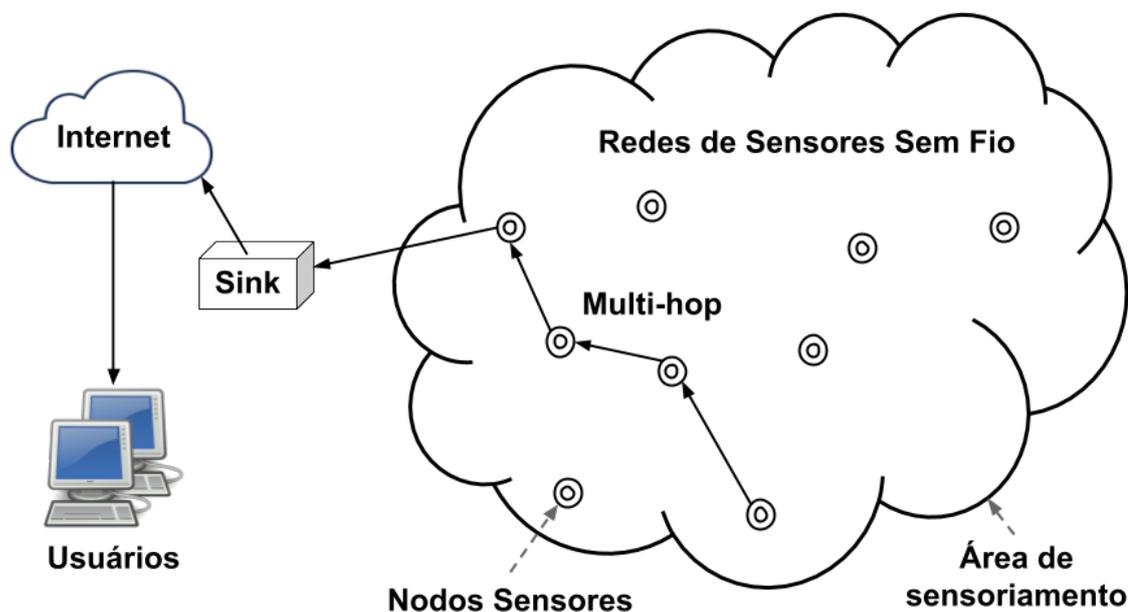


Figura 1 – Arquitetura de um RSSF. Baseada em SALAMA AHMED (2015)

Os nodos sensores podem ser distribuídos sobre a área de interesse na forma randômica ou na forma de grade (*mesh*). Na forma randômica, os nodos são distribuídos de maneira aleatória sobre a área de interesse. Já na forma em grade, os nodos são distribuídos uniformemente formando uma espécie de grade, com intuito de garantir a cobertura completa da área de interesse. Independente da forma como os nodos são distribuídos, é preciso respeitar o alcance de comunicação de cada nodo, visto que conexões precisam ser realizadas entre estes, e considerando que a informação capturada pelo nodo precisa chegar até o sorvedouro através de conexões de

multi-hop (GONZALEZ, 2016).

Os nodos sensores se comunicam entre si e com o sorvedouro usando comunicação sem fio, usualmente via radiofrequência. Para isso, cada nodo sensor da rede é composto de um transceptor (dispositivo que combina um transmissor e um receptor). Os raios de comunicação e sensoramento dos nodos são limitados à tecnologia empregada nesse transceptor e às diversidades do ambiente a ser monitorado. Além disso, estes dispositivos são equipados com memória, microprocessador, sensor e bateria, conforme ilustrado na Figura 2. Esses dispositivos podem ter diferentes dimensões dependendo da sua área de aplicação e do estado da arte da tecnologia atual (LOUREIRO ET AL., 2003).

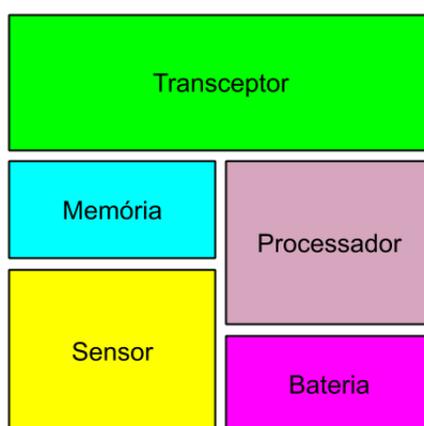


Figura 2 – Hardware básico de um nodo sensor. Baseada em LOUREIRO et al. (2003)

Como os nodos sensores são geralmente estacionários e alimentados por uma bateria de capacidade limitada, a bateria é considerada o recurso mais crítico de um nodo sensor, pois sua capacidade de energia é um dos fatores determinantes para que o nodo sensor possa continuar ativo na rede. Portanto, como o tempo de funcionamento total da rede é determinado pelo instante em que nenhum dos nodos consegue enviar informações para o sorvedouro, a quantidade de bateria do nodo sensor é o principal critério para manter a RSSF em funcionamento (BRAGA, 2018).

Devido as limitações das baterias, aliadas ao deficit tecnológico destas quando comparado aos avanços tecnológicos crescentes no processamento (DABIRI ET AL., 2017), estratégias que visam economizar bateria dos nodos sensores vêm sendo investigadas. Algumas destas usando técnicas de balanceamento de carga (PEREIRA; BRISOLARA; FERREIRA, 2020), outras investigando os efeitos da mobilidade dos nodos na cobertura de sensoriamento (GONZÁLEZ; FERREIRA; BRISOLARA, 2016) e mais recentemente, o uso de VANTs com rotas planejadas, como coletor de dados móveis em RSSFs (ANTUNES; BRISOLARA; FERREIRA, 2020).

2.1.2 Simulação de RSSF no Eboracum

O Eboracum (MARQUES ET AL., 2016) é um *framework* para avaliação e modelagem de RSSFs, bem como investigação de estratégias de gerenciamento de recursos destas redes. Este *framework* estende o simulador VisualSense (ROSELLÓ ET AL., 2009) que é fornecido como parte do projeto Ptolemy (PTOLEMY.ORG, 2014a), permitindo a modelagem do hardware de RSSF e aspectos da aplicação, incluindo a carga de trabalho gerada pelo ambiente. Desta forma, o Eboracum pode ser estendido para suportar diferentes tipos de nodos, eventos e diversas estratégias dinâmicas de adaptabilidade.

O foco do *framework* é na modelagem e simulação de RSSF reativas, visando modelar e simular estas redes em um alto nível de abstração. Esta simulação permite analisar o comportamento da rede executando uma aplicação reativa focando, principalmente, na observação da descarga da bateria dos nodos da rede (MARQUES ET AL., 2016).

O Eboracum é definido em duas camadas: a camada da plataforma e a camada de aplicação. Na camada de plataforma os conceitos do VisualSense são estendidos de forma a descrever as capacidades de sensoriamento e comunicação dos nodos. Estes nodos podem ser sensores ou sorvedouros e são conectados por um canal de comunicação sem fio. O canal empregado é o *PowerLossChannel* do VisualSense, o qual modela atenuação de sinal do radio e delimita o alcance do sinal a uma área circular uniforme ao redor do nodo. É importante reforçar que o simulador é de alto nível de abstração e não considera vários aspectos da comunicação como perda de pacotes, conflito e interferências do meio físico. Para modelar a cobertura de sensoriamento dos nodos sensores, o simulador emprega um canal do VisualSense chamado *LimitedRangeChannel*, e através da propriedade *range* deste canal define-se uma área de cobertura circular ao redor do nodo sensor.

A Figura 3 ilustra o diagrama de classes da camada de plataforma. A principal primitiva dessa camada é o *Wireless Node*, representada pela classe *WirelessNode*. Essa classe possui as subclasses *BasicWirelessSensorNode*, que representa os nodos sensores, e *NetworkMainGateway*, que representa o sorvedouro. A classe *SimpleWSNNode*, derivada de *BasicWirelessSensorNode*, representa o comportamento de detecção de eventos e processamento das tarefas associadas aos eventos capturados pelo nodo sensor. A CPU dos nodos sensores é representada pela classe *SensorCPU*, a qual possui a interface *SimpleFIFOBasedCPU* que define o comportamento de uma CPU baseada em uma FIFO (do inglês, *First In First Out*). Outros modelos de CPU podem ser suportados, mediante extensões da classe *SensorCPU*. Os nodos sensores empregados neste trabalho são instâncias de *SimpleWSNNode* e empregam a CPU baseada em FIFO implementada pela classe *SimpleFIFOBasedCPU*.

A camada de aplicação suportada pelo Eboracum foca em aspectos não funcio-

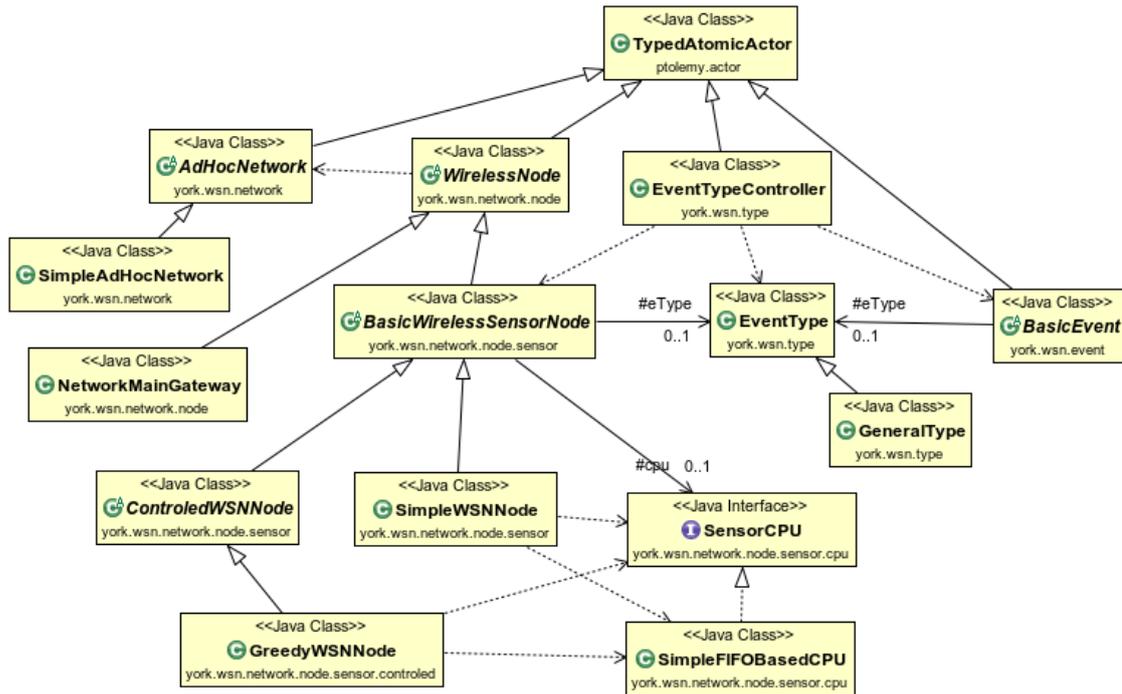


Figura 3 – Diagrama de classes do Eboracum - modelo da plataforma (MARQUES ET AL., 2016)

nais do *framework* (MARQUES ET AL., 2016). Nessa camada são definidas as primitivas que modelam os eventos e suas características como tempo de duração, local de ocorrência dentro do cenário a ser monitorado e funcionalidade do evento. Os eventos gerados pelo simulador podem ser estáticos, se não variarem no tempo. Atômicos, quando ocorrem em um determinado momento e não se repetem ou periódicos quando ocorrem em determinados períodos de tempo.

Baseado nestes aspectos, o Eboracum provê diversas primitivas que podem ser empregadas para modelar aplicações reativas, incluindo primitivas que permitem modelar estes aspectos através de modelos estocásticos, baseados em distribuições de probabilidade (MARQUES ET AL., 2016).

O Eboracum fornece um modelo de simulação que permite analisar o comportamento de uma RSSF executando uma dada aplicação reativa, permitindo avaliar a eficiência de uma determinada solução, focando principalmente em aspectos de eficiência energética, avaliando a descarga de bateria dos nodos sensores.

De forma a simular o processamento dos eventos capturados pelos nodos sensores, os nodos são providos de uma CPU. Um evento pode ser associado a um grafo de tarefas e cada tarefa pode ter custos computacionais diferentes. Tais custos vão determinar quanto tempo a CPU ficará ocupada e quanto de energia será gasta com o processamento de cada tarefa (GONZALEZ, 2016).

Para simular a descarga de bateria durante a simulação, os nodos têm a carga de suas baterias recalculadas baseado em seus modos de operação (processando,

comunicando e inativo). Quando o nodos está processando um evento, o número de ciclos de CPU executados é multiplicado pelo custo de energia dessa operação. Já o custo de comunicação, está relacionado somente com o envio de mensagens. Logo, somente quando o nodo transmite uma mensagem que há descarga de bateria. Porém, como uma mensagem precisa de vários *hops* para chegar até o sorvedouro, o custo de comunicação tende a ser bastante significativo. Quando o nodo está em modo inativo, somente os componentes responsáveis pelo sensoriamento estão trabalhando.

Para a parte visual das simulações, o Eboracum utiliza a interface gráfica do Ptolemy II, a qual permite que os projetistas construam seus próprios modelos, utilizando os componentes de suas bibliotecas, bem como incluindo primitivas suportadas pelo *framework* (GONZALEZ, 2016). No entanto, construir os cenários de simulação a partir da interface fornecida pelo Ptolemy pode ser uma tarefa custosa no quesito tempo, visto que as simulações podem ter muitos nodos com diversos tipos de configurações como posicionamento, custos associados a computação e comunicação, entre outras.

De forma a automatizar o processo de criação dos cenários de simulação, o Eboracum fornece a classe *BenchmarkGenerator*, que pode ser utilizada para gerar modelos de simulação com as configurações fornecidas pelo projetista. Ao utilizar esse modelo de configuração, o usuário deve definir o tipo de nodo a ser utilizado, o número de nodos, o tipo de distribuição dos mesmos na área de interesse, o posicionamento dos nodos e do sorvedouro, os custos de energia de processamento e comunicação associados ao evento, o tipo e número de eventos bem como sua distribuição espacial e temporal. Com esses recursos definidos, o modelo de simulação é gerado em um arquivo XML, para posterior execução no ambiente Vergil (PTOLEMY.ORG, 2014b).

2.2 Planejamento de Rota para VANTs

Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) são plataformas aéreas sem pilotos a bordo. Estas plataformas podem ser operadas manualmente ou remotamente por humanos ou ter o planejamento da rota automatizado usando sistemas inteligentes integrados com sensores acoplados ao veículo.

O planejamento de rota na robótica tem como subtópico o problema de cobertura de terreno (ou CPP, do inglês, *Coverage Path Planning*), onde dada uma determinada área de interesse, o problema de CPP consiste em planejar uma rota para o robô explorar completamente a área de interesse, considerando as restrições de movimento do veículo bem como possíveis obstáculos dentro da área de interesse (CABREIRA ET AL., 2018).

Dentre as técnicas utilizadas na cobertura do terreno, destacam-se as de decomposição celular. Estas, consistem em dividir a área de interesse em regiões mais sim-

ples, também conhecidas como células, de forma a simplificar a cobertura em cada sub-região (CHOSSET, 2001).

No contexto de planejamento de rota para VANTs relacionados ao problema de cobertura de terreno destacam-se as técnicas de decomposição celular exata e aproximada (CABREIRA ET AL., 2018). Na decomposição celular exata, a área de interesse é dividida em sub-regiões (também conhecidas como células), de forma a reduzir a concavidade dessas regiões, simplificando a cobertura do terreno. Após a área de interesse ser dividida em sub-regiões, é criado um grafo de adjacência a partir destas sub-regiões, por onde o VANT vai acessar as regiões, uma a uma, com movimentos geométricos simples como zig-zag ou spiral. A Figura 4 ilustra um exemplo de decomposição celular exata. As áreas na cor cinza sinalizam locais onde o VANT não pode sobrevoar e as linhas tracejadas delimitam as sub-regiões por onde o VANT irá realizar a cobertura do terreno, no caso do exemplo com o movimento zig-zag.

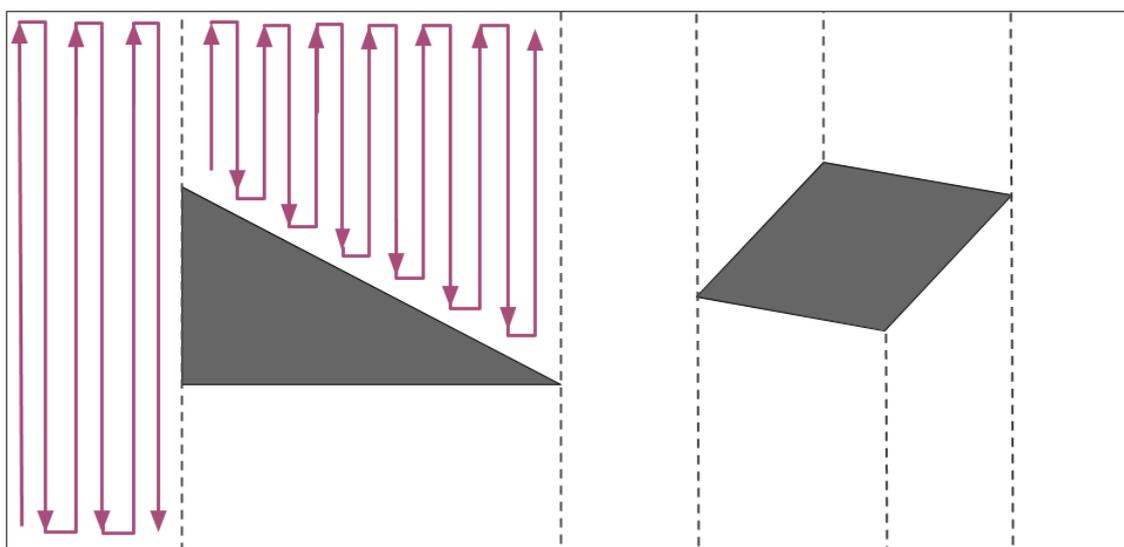


Figura 4 – Decomposição celular exata

Na técnica de decomposição celular aproximada, a área de interesse é dividida em células de mesmo tamanho com formato pré-definido (ex: quadrado, triângulo ou forma hexagonal). Tradicionalmente, a célula tem o mesmo tamanho do robô, no caso de cobertura terrestre, e para coberturas realizadas por VANTs, possui o tamanho aproximado da cobertura do sensor acoplado ao veículo. A Figura 5 ilustra a técnica de decomposição celular aproximada sendo executada. Após dividida a área de interesse, as células são classificadas como ocupadas, quadrados cinza sobre a zona proibida, ou livres, quadrados brancos com linhas tracejadas. Em seguida é montado o grafo de adjacência das células livres por onde o robô irá realizar a cobertura do terreno com o algoritmo de planejamento de rota desejado, no caso do exemplo da figura foi utilizado o movimento zig-zag. Os pontos em preto dentro das células livres representam os pontos de parada do VANT.

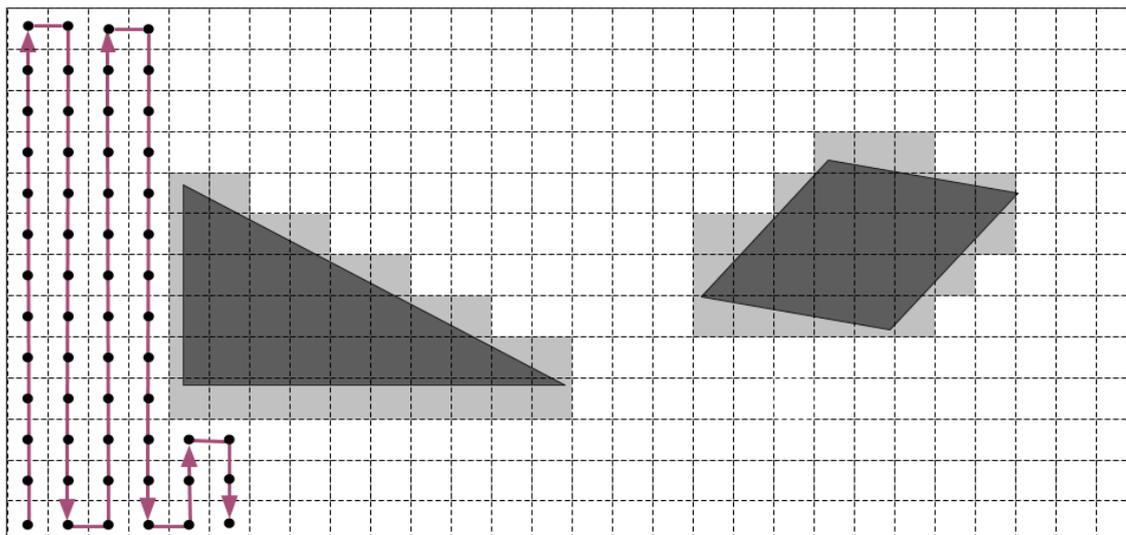


Figura 5 – Decomposição celular aproximada

Em missões de cobertura de terreno de áreas de interesse não complexas, com formatos regulares como polígonos convexos ou áreas de interesse retangulares, utilizando um único VANT, não há necessidade de se utilizar nenhum tipo de técnica de decomposição celular. Ao invés disso, é possível utilizar padrões geométricos simples, como zig-zag ou espiral para a missão de cobertura (CABREIRA; BRISOLARA; FERREIRA JR., 2019). Nestes padrões de voo, o movimento do VANT consiste em andar em linha reta realizando manobras em ângulos de 90° . A Figura 6 ilustra dois padrões geométricos sendo utilizados em áreas quadradas.

De forma geral, os padrão geométricos simples de voo possuem um baixo custo computacional aliado com a facilidade de implementação na plataforma aérea. No entanto, plataformas que se utilizam destes padrões de voo tendem a ter uma resistência de voo limitada para executar missões de cobertura (CABREIRA; BRISOLARA; FERREIRA JR., 2019).

Além do planejamento de rota, os algoritmos de cobertura precisam considerar diversas métricas para garantir o sucesso da cobertura do terreno, como a complexidade da área de interesse, a presença de zonas de voo proibidas bem como a possibilidade de aplicar alguma das técnicas de decomposição celular. Além disso, os algoritmos de cobertura devem gerar rotas de cobertura de acordo com os requisitos da aplicação (CABREIRA; BRISOLARA; FERREIRA JR., 2019). Por exemplo, em aplicações de fotogrametria um dos requisitos da aplicação é garantir a quantidade de superposição lateral e frontal das imagens para criar o ortomosaico do terreno. Outro requisito deste tipo de aplicação é em relação a altitude do voo. Em altitudes mais baixas de voo, são obtidas imagens com menos informação do terreno e mais píxeis, configurando uma melhor resolução, enquanto em altitudes mais elevadas obtém-se imagens com resoluções menores mas com mais informações sobre o terreno.

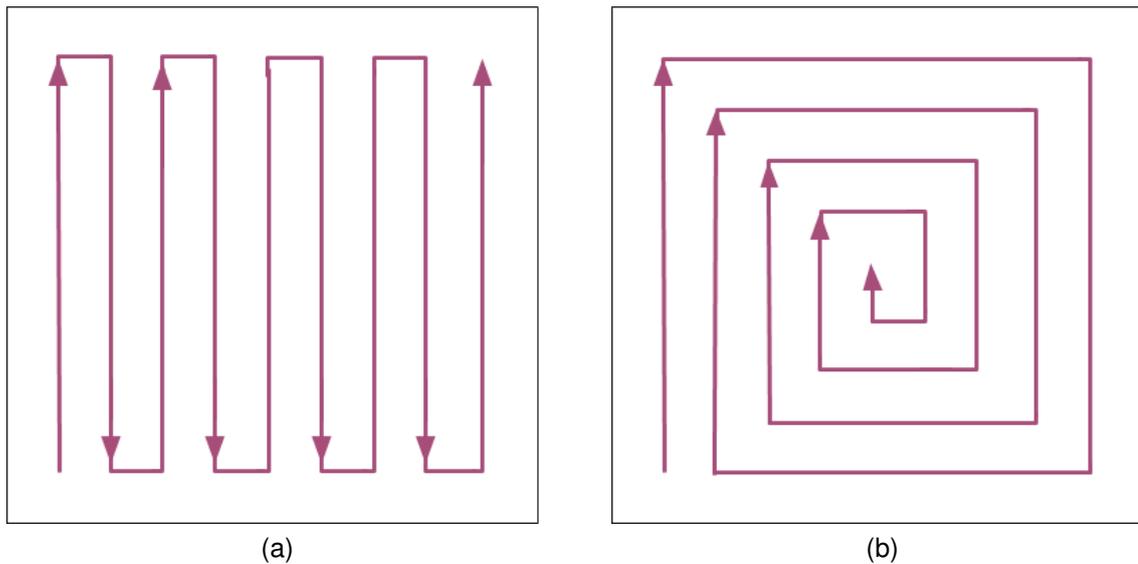


Figura 6 – Padrões geométricos simples em áreas retangulares sem decomposição celular: (a) zig-zag, (b) espiral

As métricas utilizadas para avaliar a melhor abordagem de planejamento de cobertura estão relacionadas com os requisitos da aplicação (CABREIRA; BRISOLARA; FERREIRA JR., 2019). Dependendo do tipo de cobertura, simples ou contínua, diferentes métricas podem ser avaliadas. Na cobertura simples, onde o VANT varre a área de interesse somente uma vez, as métricas de avaliação encontradas na literatura são quanto ao tamanho do caminho percorrido pelo VANT (ÖST, 2012), o número de manobras de virada realizadas (TORRES ANAYA ET AL., 2016), a maximização da cobertura da área (LI; WANG; SUN, 2016), o tempo para completar a missão (ARTEMENKO ET AL., 2016) e a velocidade ideal do VANT em segmentos retos com foco em minimizar o consumo de energia (DI FRANCO; BUTTAZZO, 2016; CABREIRA ET AL., 2018). Já na cobertura contínua, onde o VANT varre a área de interesse diversas vezes, são avaliadas métricas como frequência de visitas em cada nodo e número de eventos detectados pelo VANT (CABREIRA; BRISOLARA; FERREIRA JR., 2019).

A solução adotada para o planejamento de rota utilizando o VANT depende da quantidade de informação disponível sobre o ambiente (CABREIRA; BRISOLARA; FERREIRA JR., 2019). Quando o VANT tem toda informação disponível e conhece o layout do cenário, pode-se aplicar um planejamento de cobertura do tipo *offline*. Este tipo de planejamento é normalmente dividido nas etapas de decomposição, planejamento e execução. Inicialmente, é aplicada a técnica de decomposição celular sobre a área de interesse de forma a discretizar e dividir esta área. Na segunda etapa, o planejamento de cobertura com toda informação necessária sobre o ambiente a ser coberto procura por uma solução de acordo com métricas de desempenho predefinidas. Por fim, o planejamento resultante é executado.

No contexto onde a informação muda constantemente ou não está completamente disponível para o VANT, é possível executar uma tomada de decisão aleatória aplicando um planejamento de cobertura *online* (CABREIRA; BRISOLARA; FERREIRA JR., 2019). Neste tipo de planejamento, o VANT carrega sensores a bordo para coletar dados sobre a área de interesse no intervalo entre o planejamento e a execução da rota planejada, usando esta informação para dirigir o VANT na missão de cobertura.

No presente trabalho, VANTs são adotados como coletores de dados móveis de RSSFs utilizando os padrões geométricos zig-zag e espiral para o planejamento da rota. Como os cenários avaliados são quadrados sem nenhuma zona de voo proibida e um único VANT foi empregado nas simulações, nenhuma técnica de decomposição foi utilizada. Ao invés disso, o VANT navega sobre a área de interesse utilizando os padrões de voo zig-zag ou espiral capturando os eventos dos nodos sensores.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Atualmente, veículos aéreos não tripulados (VANTs) como coletores de dados em RSSFs vêm sendo alvo de diversas pesquisas, como discutido na revisão apresentada em Popescu et al. (2019). Estas pesquisas usualmente concentram esforços em resolver problemas de comunicação entre nodos, principalmente em longa distância, bem como reduzir o consumo energético dos nodos evitando um esquema de comunicação *multihop* até o sorvedouro. Alguns trabalhos resumem-se a discutir os desafios e benefícios do VANT como um nodo móvel nas RSSF, considerando uma dada aplicação alvo como em Zhang et al. (2018) e Valente et al. (2011), mas sem explorar a definição de rotas para o coletor. As pesquisas que abordam o planejamento de rota se diferenciam quanto aos objetivos tais como, aumentar o número de nodos visitados durante o voo, reduzir o tamanho do caminho percorrido pelo VANT ou ainda reduzir o consumo de energia do próprio VANT. Este capítulo discute os principais trabalhos encontrados na literatura.

A pesquisa realizada por Zhang et al. (2018) mostra a combinação entre VANT, RSSF e sensoriamento remoto (do inglês, *Remote Sensing (RS)*) como uma tendência promissora para o monitoramento de colheita e solo. O sistema apresentado na pesquisa propõe uma RSSF com capacidade de armazenar em memória os eventos coletados no ambiente para que um VANT possa capturá-los durante o voo. O VANT utilizado na proposta, além de ter um nodo móvel para coletar os eventos da RSSF e transmitir para o sorvedouro, também é equipado com uma câmera para capturar imagens em alta resolução. Segundo os autores, essa combinação entre VANT, RSSF e RS vai contribuir significativamente no gerenciamento de variáveis no campo de agricultura e na gestão de grupo de máquinas agrícolas.

O emprego do VANT como coletor de dados de uma RSSF usada para monitoramento em tempo-real de geadas em vinhedos foi proposto e avaliado em Valente et al. (2011). Os experimentos deste trabalho foram realizados em uma região ampla e fragmentada em três clusters. Neste sistema, cada cluster representa uma RSSF isolada, sem conexão com as demais redes. O VANT é utilizado para coletar os dados destes clusters e enviar para estação base, que por sua vez, é dotada de uma conexão de

serviços de dados móveis (3G), permitindo assim que os dados enviados à estação base pelo VANT possam ser transmitidos a longas distâncias para o usuário final.

Para resolver o problema de baixa escalabilidade e o consumo de energia desbalanceado da RSSF, Yang; Miao (2017) defendem o emprego do VANT como coletor de dados e propõem um método de planejamento de rota para o coletor. O método consiste de particionar a região de interesse em *clusters*, determinar a ordem de acesso de cada região e escolher os pontos de encontro onde o VANT coletará os dados de cada *cluster*. Os experimentos realizados pelos autores consideram um cenário medindo um hectare (100 m x 100 m) e com nodos distribuídos de forma aleatória. O método proposto foi comparado quanto ao consumo energético e tempo de vida da rede com o algoritmo *Low-energy Adaptive Clustering Hierarchy* (LEACH) (HEINZELMAN; CHANDRAKASAN; BALAKRISHNAN, 2000), um protocolo baseado em clusterização que se utiliza de rotação aleatória dos *cluster-heads* para distribuir uniformemente o consumo energético entre os nodos da RSSF. Os resultados deste comparativo mostraram que o método proposto por Yang; Miao (2017) superou o algoritmo LEACH, aumentando o tempo de vida da rede em 5,2% e diminuindo o consumo de energia dos nodos.

O trabalho de Yue; Jiang (2018) propõe um algoritmo de planejamento de rota denominado *Spiral Path Planning* (SPP) baseado em decomposição em espiral. O algoritmo proposto tem objetivo de realizar um planejamento de rota rápido de forma a coletar os dados de sensores de uma RSSF implantados uniformemente em uma área circular. Através de experimentos, os autores compararam o algoritmo SPP com o *Fast Path Planning with Rules* (FPPWR), uma solução proposta por Wang et al. (2015) que visa medir o esforço computacional necessário para resolver os problemas de otimização em uma estratégia baseada em TSP (do inglês, *Travelling Salesman Problem*). Nos experimentos realizados usando o MATLAB, foram avaliados o tempo de execução do algoritmo e o tamanho do caminho gerado nos cenários com 10, 20, 30, 40, 50, 100, 200, 300, 400, 500, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 10000, 20000, 30000, 40000 e 50000 nodos distribuídos em uma área circular com 100 km de raio. Os resultados experimentais mostraram que o algoritmo SPP obteve um tamanho de caminho menor que o FPPWR em cenários com poucos nodos. No entanto, conforme o número de nodos cresce, o resultado é invertido e o algoritmo FPPWR tem um menor tamanho de caminho que o SPP. No quesito tempo de execução, o SPP obteve um tempo menor para cenários com poucos nodos e manteve o tempo na mesma magnitude que o FPPWR nos cenários com mais nodos.

Visando maximizar o número de nodos sensores visitados pelo VANT em um determinado tempo de voo, no trabalho de Zhan; Zeng; Zhang (2018), um algoritmo de planejamento de rota foi proposto. Os experimentos foram realizados no MATLAB e consideraram uma rede com 40 nodos distribuídos de forma aleatória em uma área

de interesse quadrada, medindo 4x4 km e uma velocidade máxima de voo de 50 m/s. Para o comparativo, o planejamento proposto no trabalho foi comparado com os algoritmos strip-based, zig-zag e trajetória baseada em distância, que utiliza a localização dos nodos para planejar a rota do VANT. Os resultados experimentais mostraram que a solução proposta supera significativamente os três algoritmos em todos os diferentes tempos de voo avaliados. Outro experimento variando o tamanho do raio de comunicação dos nodos em um tempo de 200s foi conduzido pelo autor, onde para todos os diferentes raios avaliados, o algoritmo proposto no trabalho superou os três concorrentes. Em ambos os trabalhos, Yue; Jiang (2018) e Zhan; Zeng; Zhang (2018), o VANT planeja a rota conhecendo a posição dos nodos. No entanto, a menos que os nodos sejam equipados com GPS esta localização pode não estar disponível.

Dentre os trabalhos encontrados que exploram diferentes algoritmos de planejamento de caminhos para VANTs coletores de dados, a grande maioria dos trabalhos usa como comparativo métricas como tamanho do caminho ou número dos nodos coletados como em Yue; Jiang (2018) e Zhan; Zeng; Zhang (2018), sem considerar o consumo de energia dos nodos ou o tempo de vida da rede. Há ainda trabalhos que abordam a otimização de consumo do VANT de forma a maximizar a cobertura do voo (POPESCU ET AL., 2019) (ZHAN; ZENG; ZHANG, 2018). Embora um dos benefícios do emprego de VANTs integrados a RSSF seja a redução da sobrecarga de comunicação dos nodos, apenas o trabalho de Yang; Miao (2017) avaliou o impacto das estratégias no tempo de vida da rede, considerando assim o impacto da coleta de dados na bateria de nodos. Diferentemente do Yang; Miao (2017), nesta dissertação, os algoritmos empregados não baseiam-se em clusters, assim não implicando em reorganização da rede ou de tabelas de roteamento. O presente trabalho compara o impacto no tempo de vida da rede quando do emprego dos padrões de voo geométricos zig-zag e espiral, que já são empregados na comunidade de VANTs, através de experimentos variando a densidade das redes e utilizando cenários com nodos distribuídos em grade ou seja, uniformemente distribuídos, em uma área de interesse quadrada.

Devido ao avanço tecnológico, os nodos sensores também podem contar com capacidade de processamento (POPESCU ET AL., 2019), o que conseqüentemente acaba por descarregar mais rápido a bateria desses nodos. Por este motivo, o tempo de vida da rede não pode ser avaliado utilizando como critério apenas tarefas de comunicação (FERREIRA; BRISOLARA; INDRUSIAK, 2015b). Contudo, a análise do tempo de vida da rede apresentado por Yang; Miao (2017) é limitada por uma RSSF composta de nodos que somente detectam e transmitem eventos sem processá-los localmente. Logo, não foram encontrados estudos que avaliem algoritmos de planejamento de rota na coleta de dados de RSSF considerando diferentes custos de comunicação e computação. Além de discutir o impacto dos planejamentos de rota

zig-zag e espiral no tempo de vida da rede, este trabalho explora ainda diferentes custos de comunicação e computação de forma a analisar quando o uso do VANT como coletor de dados pode trazer benefícios às RSSFs com nodos em grade.

4 AVALIAÇÃO PROPOSTA

O presente trabalho tem por objetivo avaliar o impacto do uso do VANT como coletor móvel de dados no tempo de vida das redes de sensores sem fio, considerando os algoritmos de planejamento de rotas zig-zag e espiral. Neste capítulo primeiramente, será apresentada a implementação da abordagem proposta no simulador Eboracum (Seção 4.1) e a metodologia empregada nos experimentos (Seção 4.2).

4.1 Desenvolvimento

Para realizar as avaliações propostas neste trabalho, foi empregado o *framework* de modelagem e simulação de RSSF chamado Eboracum (MARQUES ET AL., 2016). Este *framework* foi estendido para suportar a modelagem do nodo móvel coletor, ou seja, o VANT, juntamente com os planejamentos de rota empregados, bem como para suportar as comunicações empregadas para coleta feita pelo VANT. Nesta extensão, duas novas classes foram criadas e incluídas no *framework*: *UAV* e *UAVWSNNode*.

A classe *UAV* para representar o VANT, que por sua vez estende a classe abstrata *WirelessNode*, que é a primitiva que representa os nodos da RSSF no *framework* definindo sua capacidade de comunicação. A classe *UAV* possui um *buffer* para armazenar os eventos capturados pelos nodos. Este *buffer* é um *HashMap*, que é uma estrutura do Java que armazena um conjunto de pares de chave-valor, utilizado para armazenar o nome e o horário em que o evento aconteceu.

A classe *UAVWSNNode* representa um nodo capaz de se comunicar com o VANT, através de um canal de comunicação, e de armazenar os eventos capturados através de um *buffer*, também representado por um *HashMap*, capaz de armazenar os eventos para que o VANT possa coletá-los. Esta classe estende o *BasicWirelessSensorNode* (que por sua vez estende a *WirelessNode*), representando um nodo com capacidade de sensoriamento e com CPU para processar as tarefas associadas aos eventos capturados. A Figura 7 ilustra o diagrama de classe e mostra as principais relações das classes criadas com classes já providas pelo *framework*.

De forma a permitir a troca de mensagens entre VANT e nodo sensor, um protocolo

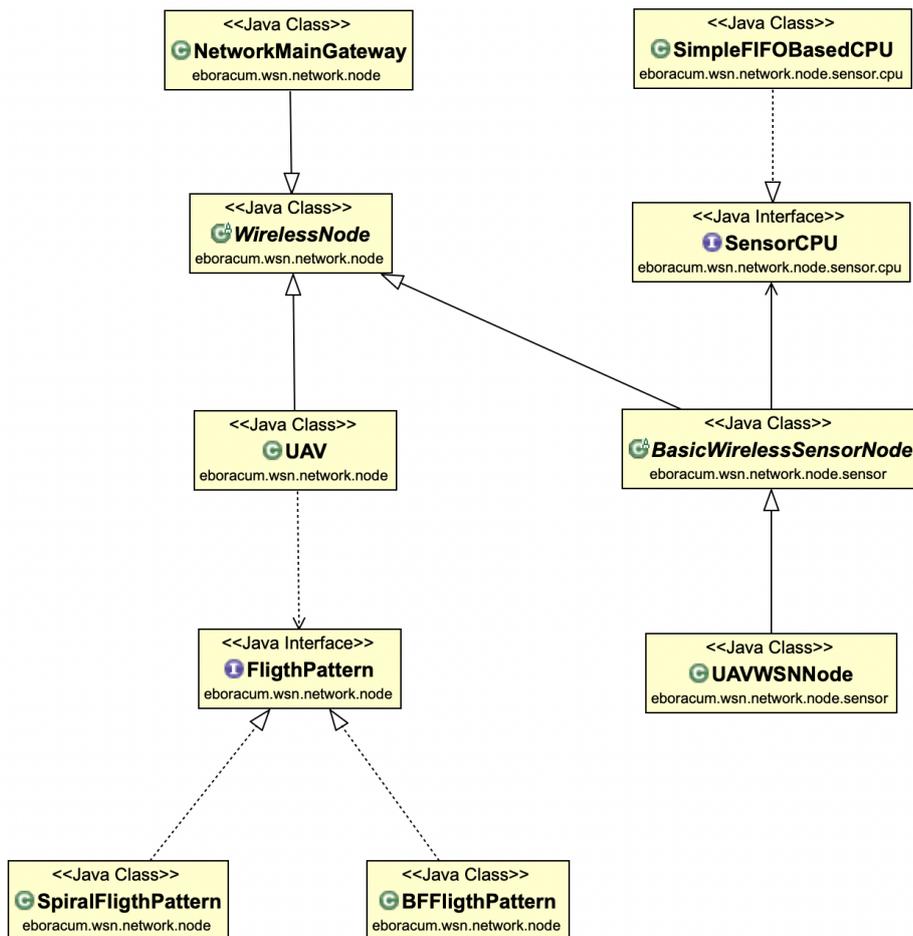


Figura 7 – Diagrama de Classe - Extensão do Eboracum proposta

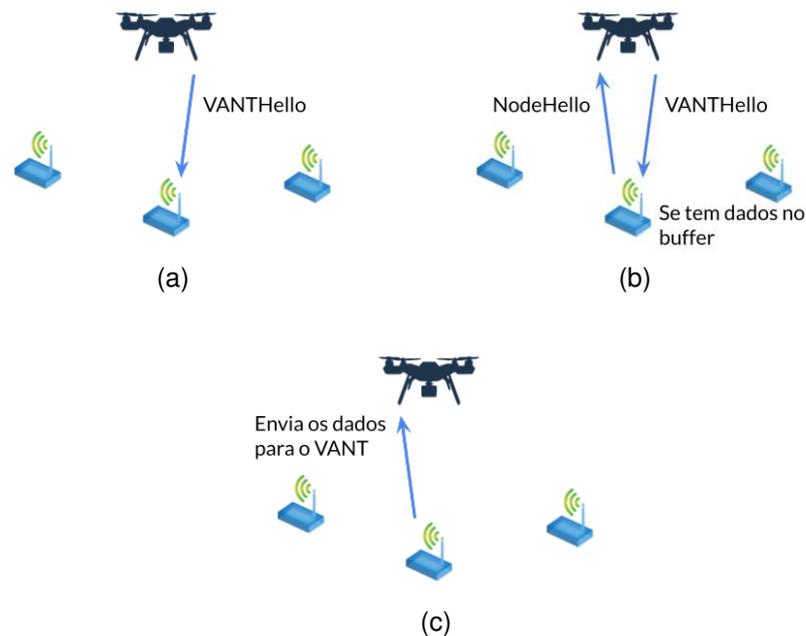


Figura 8 – Protocolo de Comunicação VANT e Nodo: (a) início da comunicação, (b) resposta do nodo, (c) coleta dos dados

de comunicação simples foi implementado, o qual define um *handshake*¹ entre estes componentes. A Figura 8 ilustra as etapas deste protocolo. Inicialmente, enquanto o VANT está realizando a cobertura do terreno, mensagens de *VANTHello* são enviadas pelo seu canal de comunicação (Fig. 8a). O nodo sensor, representado pela classes *UAVWSNNode*, tem a capacidade de escutar essa mensagem pelo seu canal de comunicação. Logo, se o nodo escutou a mensagem *VANTHello* e possui dados no seu buffer, ele envia a mensagem *NodeHello* para o VANT (Fig. 8b). Somente após esse *handshake*, o nodo sensor modelado como uma instância de *UAVWSNNode* poderá enviar os eventos capturados para o VANT (Fig. 8c).

Para permitir avaliar diferentes algoritmos de planejamento de rota para o VANT, a classe *UAV* foi associada a uma interface nomeada *FligthPattern*. Esta interface define a assinatura do método responsável por implementar a trajetória do VANT. Este método deverá ser obrigatoriamente implementado nas classes derivadas desta interface, permitindo que diferentes estratégias de movimento possam ser facilmente inseridas no *framework*. Para avaliar o padrão zig-zag e espiral, as classes *BFFligthPattern* e *SpiralFligthPattern* foram criadas, as quais implementam o movimento do VANT seguindo o planejamento de rota em zig-zag e espiral, respectivamente.

O padrão geométrico de voo zig-zag implementado pela classe *BFFligthPattern* está ilustrado na Figura 9. Este padrão consiste em voar em linha reta realizando manobras de 90° graus dobrando para o lado direito a cada vez que o VANT chega

¹Handshake ou aperto de mão é o processo pelo qual dois ou mais dispositivos afirmam que se reconhecem e estão prontos para iniciar a comunicação.

a extremidade do lado direito da área de interesse e dobrando à esquerda quando o VANT chega a extremidade do lado esquerdo. Quando o VANT chega ao ponto final, ele faz o voo inverso, voando em linha reta e dobrando a direita quando chega a extremidade esquerda e a esquerda quando chega a extremidade direita até o ponto inicial, localizado no canto superior esquerdo do cenário (Figura 9).

O padrão de voo espiral é implementado na classe *SpiralFlighPattern* e encontra-se ilustrado na Figura 10. O padrão espiral consiste de voar em linha reta realizando manobras 90° dobrando para o lado direito diminuindo seu raio em direção ao ponto final (centro da área de interesse), e quando o VANT chega ao ponto final, ele realiza o caminho inverso, voando em linha reta e dobrando a esquerda, aumentando seu raio até o ponto inicial (Figura 10). As figuras 9 e 10 ilustram os planejamentos de voo em zig-zag e espiral, respectivamente, em uma RSSF composta por 49 nodos dispostos em grade.

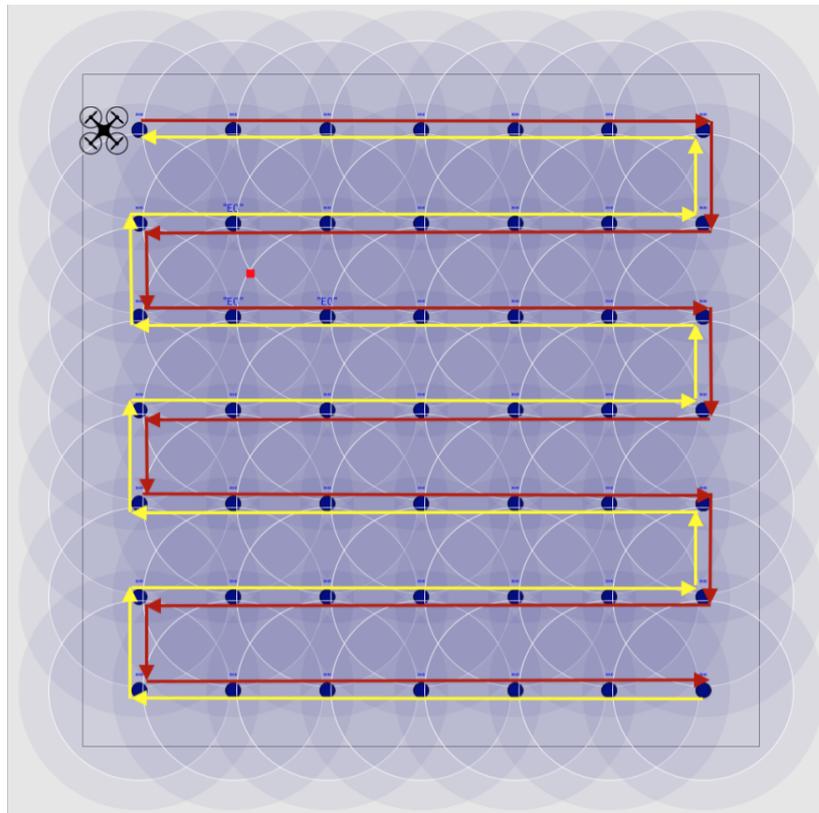


Figura 9 – Voo em zig-zag em cenário de RSSF com 49 nodos em grade

De forma a executar os experimentos, foi desenvolvido um novo *benchmark* de simulação no Eboracum. Este *benchmark* cria cenários de simulação adotando instâncias do *UAVWSNNode* como nodos da RSSF e de *UAV* como sorvedouro móvel. Em cada cenário de simulação são definidos parâmetros como densidade da RSSF, bateria inicial dos nodos, raio de comunicação e de sensoriamento, custo de comunicação e de CPU dos nodos e o planejamento de cobertura utilizado pelo VANT. O

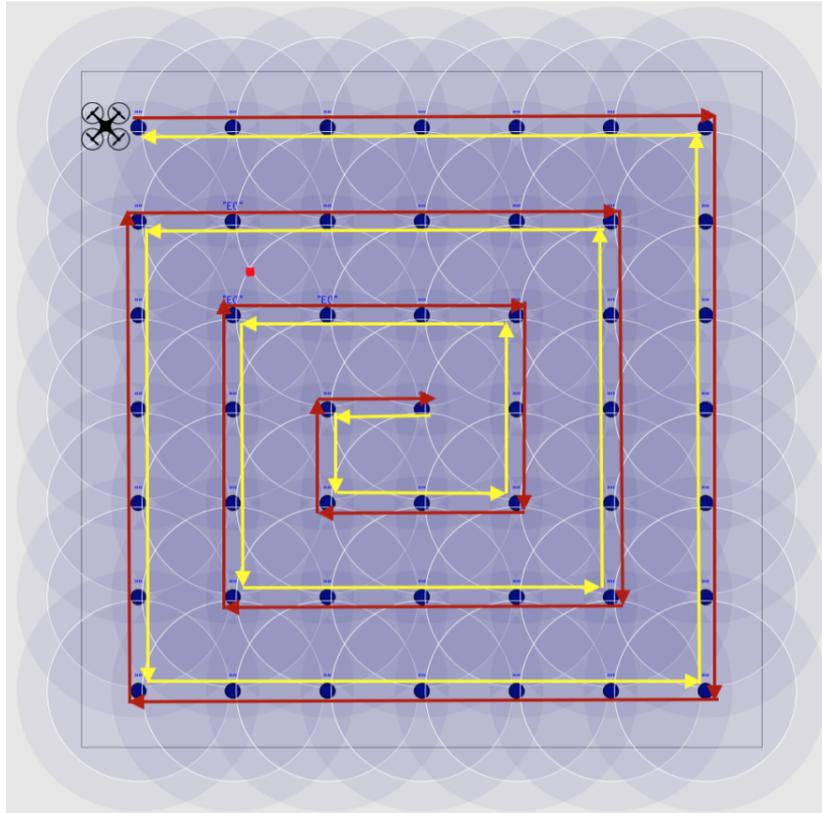


Figura 10 – Voo em espiral em cenário de RSSF com 49 nodos em grade

benchmark desenvolvido também define a probabilidade de distribuição dos eventos no espaço e tempo, conforme descrito na Seção 4.2. Com esses parâmetros definidos, o modelo de simulação é gerado em um arquivo no formato XML (do inglês, *Extensible Markup Language*), para posterior execução e simulação.

4.2 Metodologia

Nessa seção, será apresentada a metodologia adotada para avaliar o VANT como coletor de dados de RSSFs utilizando os planejamentos de cobertura zig-zag e espiral. As métricas utilizadas no comparativo foram o número de eventos capturados pelo sensores que foram notificados ao sorvedouro e o tempo de vida da rede em dias. Através de experimentos, foram comparadas RSSFs adotando VANTs como coletores de dados com a RSSF padrão que emprega comunicação *multihop*, variando o número de nodos mas com um sorvedouro fixo.

Os experimentos do trabalho foram conduzidos em um cenário quadrado de 810km^2 de área ($900\text{ m} \times 900\text{ m}$). As RSSFs utilizadas para os experimentos são reativas, ou seja, quando há ocorrência de um evento o nodo é acionado. Os eventos são randomicamente distribuídos dentro da área de interesse seguindo uma distribuição de probabilidade normal invertida. Essa distribuição faz com que os eventos se concentrem nas bordas da área de interesse. Não há ocorrência de eventos simultâ-

Tabela 1 – Raios de comunicação e sensoriamento por densidade

49 nodos	
Raio comunicação	160
Raio sensoriamento	120
64 nodos	
Raio comunicação	125
Raio sensoriamento	85
81 nodos	
Raio comunicação	100
Raio sensoriamento	70
100 nodos	
Raio comunicação	105
Raio sensoriamento	75

neos e o tempo entre eventos sucessivos é definido por uma distribuição de Poisson com intervalo de 6 segundos.

Nos experimentos, foram investigados quatro diferentes densidades de redes 49 (grade de 7x7), 64 (grade de 8x8), 81 (grade de 9x9) e 100 nodos (grade de 10x10), conforme ilustrado na Figura 11, Figura 12, Figura 13 e Figura 14, respectivamente. Diferentes raios de comunicação e sensoriamento foram utilizados para cada densidade de rede, a Tabela 1 sumariza estes raios. Em cada densidade avaliada, foram explorados três diferentes custos entre comunicação e computação (CPU) de forma a avaliar quando o uso do VANT aumenta o tempo de vida da rede. As relações entre os custos foram 25% de carga de CPU por 75% de carga de comunicação, 50% de CPU por 50% de comunicação e 75% de CPU por 25% de comunicação. Para cada custo avaliado, experimentos foram executados com uma RSSF padrão com sorvedouro fixo e RSSFs com sorvedouro móvel. Nos cenários de RSSF padrão, o sorvedouro está localizado no lado esquerdo e fora da área de interesse, como ilustrado nas Figuras 11, 12, 13 e 14, e os dados deverão ser encaminhados pelos nodos até o sorvedouro usando comunicação *multihop*. Nas RSSFs utilizando VANT como sorvedouro móvel para coleta de dados dos sensores, avaliou-se o emprego do planejamento de rota zig-zag e espiral. Nestes casos o VANT iniciará seu percurso partindo do nodo sensor do canto superior esquerdo da grade e não será usado o sorvedouro estático.

Os experimentos realizados no trabalho focam na eficiência da rede, que depende da energia consumida pelos nodos sensores e da capacidade da bateria adotada por estes. Na Tabela 2 é apresentada a capacidade da bateria considerada nos experimentos, bem como os custos energéticos ou a taxas de descarga empregados. O consumo do nodo é estimado considerando modo de operação que este encontra-se a cada ciclo e a taxa de descarga associada ao modo. No modo de operação inativo, o nodo mantém sua capacidade de sensoriamento e recepção de mensagens e tem

Tabela 2 – Custos energéticos e capacidade de bateria

Parâmetro	Valor
Capacidade de bateria	2700000 mAs
Taxa descarga inativo	0,3 mAs
Custos para proporção de 25% de CPU por 75% de comunicação	
Taxa descarga computação	1 mAs
Taxa descarga comunicação	3 mAs
Custos para proporção de 50% de CPU por 50% de comunicação	
Taxa descarga computação	3 mAs
Taxa descarga comunicação	3 mAs
Custos para proporção de 75% de CPU por 25% de comunicação	
Taxa descarga computação	3 mAs
Taxa descarga comunicação	1 mAs

um consumo de 0,3mAs. Já no modo processando, o consumo ocorre decorrente ao processamento das tarefas associadas ao tratamento do evento detectado, enquanto que o modo de comunicação refere-se ao envio de mensagens pelo nodo. Foram avaliadas três diferentes relações de custos entre comunicação e computação. A relação entre custos 25% de carga de CPU por 75% de carga de comunicação, considera o custo de 1 mAs para CPU e 3 mAs para comunicação. Já na relação entre custos 50% por 50%, considera-se o mesmo custo de 3 mAs para comunicação e para descarga da CPU. Na relação de custos 75% de CPU por 25% de comunicação, considera o custo de 3 mAs para CPU e 1 mAs para comunicação. Além dos custos de CPU e de comunicação, os nodos também descarregam suas baterias quando inativos (*idle*) e esta descarga também é considerada pelo simulador. A Tabela 2 sumariza os custos empregados em cada proporção explorada.

Em todos os experimentos realizados no trabalho a mesma configuração foi executada 30 vezes e a média do número de eventos capturados e do tempo de vida da rede em dias foi computado, assim como a variância destas médias. A partir destes resultados, o teste t com 95% de confiança foi realizado e em todos os experimentos a hipótese nula foi rejeitada, ou seja, todos os resultados são estatisticamente diferentes.

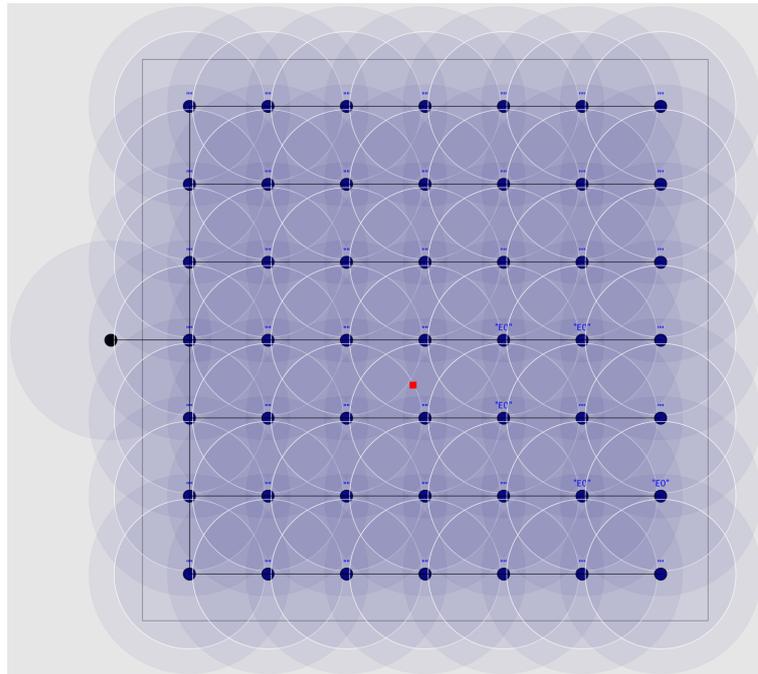


Figura 11 – Cenário de simulação: 49 nodos

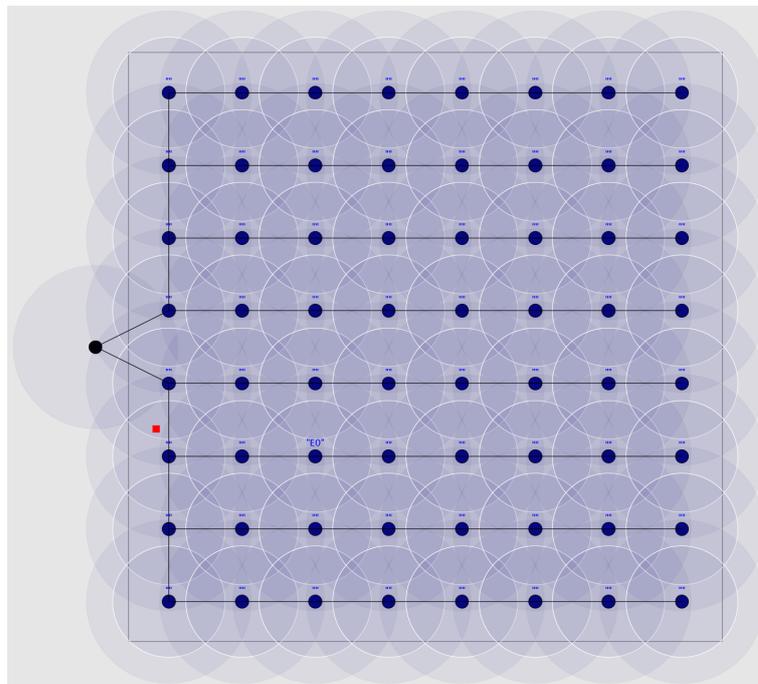


Figura 12 – Cenário de simulação: 64 nodos

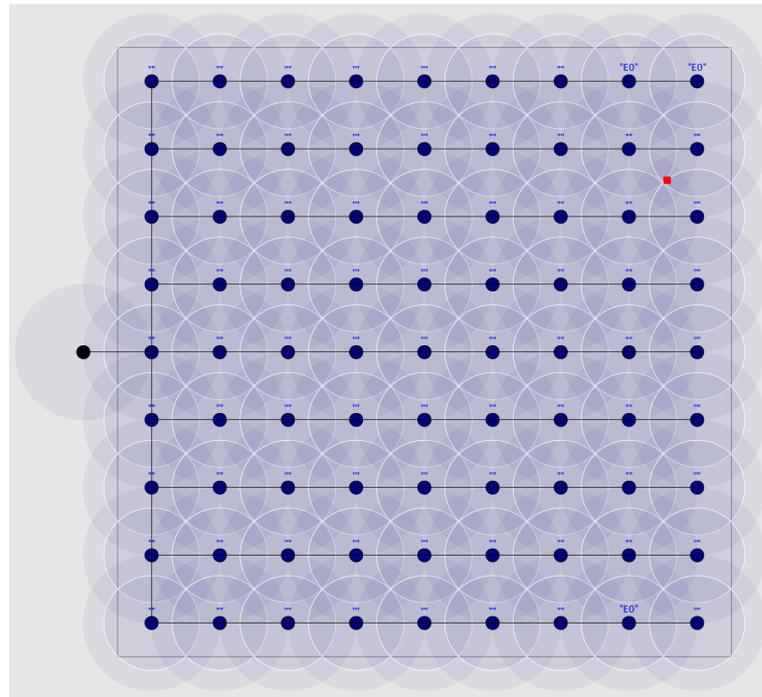


Figura 13 – Cenário de simulação: 81 nodos

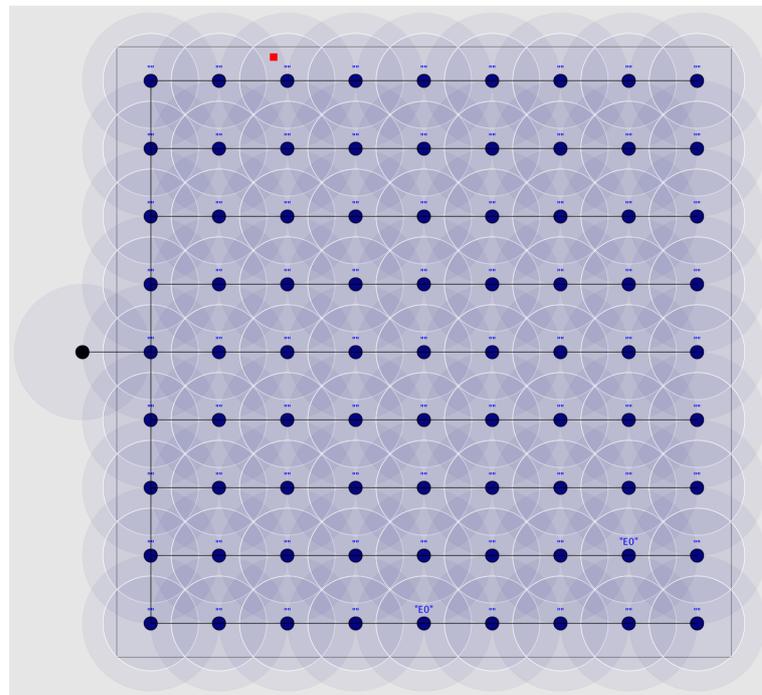


Figura 14 – Cenário de simulação: 100 nodos

5 EXPERIMENTOS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados experimentais conduzidos e que suportam o comparativo entre a RSSF padrão com a RSSF com o sorvedouro móvel. A RSSF padrão é considerada a rede com sorvedouro estático, onde as mensagens devem empregar *multihop* para alcançarem o sorvedouro. Nas RSSF com o sorvedouro móvel variou-se o planejamento de rota do VANT, avaliando o emprego do algoritmo espiral e do zig-zag.

Os resultados obtidos estão organizados em seções de acordo com a proporção entre os custos de comunicação e computação utilizados para realizar o comparativo entre a RSSF padrão com a RSSF com o sorvedouro móvel. Na Seção 5.1 serão apresentados os resultados dos experimentos para as três configurações (RSSF padrão, RSSF com sorvedouro voando em espiral e RSSF com sorvedouro voando em zig-zag), considerando custo de comunicação de 25% e de computação de 75%. Na Seção 5.2 e Seção 5.3, são apresentados os dados para os cenários usando proporções idênticas de custo e custo de comunicação de 75% e de computação de 25%, respectivamente. Por fim, na seção 5.4 é apresentada uma discussão geral considerando os resultados obtidos para todas as configurações exploradas.

5.1 25% de comunicação por 75% CPU

Considerando os custos de 25% para comunicação e 75% para computação, a eficiência das três configurações de rede (RSS padrão, RSSF com VANT usando espiral, RSSF com VANT usando zig-zag) foram comparadas em número de eventos capturados. A Figura 15 ilustra estes resultados para as três redes variando a densidade entre 49, 64, 81 e 100 nodos. A Tabela 3 sumariza os dados obtidos para as três configurações nas quatro densidades, informando a média do número de eventos sensoreados e desvio padrão destas médias para cada configuração de rede avaliada.

No cenário de 49 nodos, a RSSF empregando o planejamento de rota espiral superou àquela empregando o zig-zag e à RSSF padrão, capturando 25,6% mais eventos que o zig-zag e 69,6% a mais que a RSSF padrão. A rede padrão também foi supe-

Tabela 3 – Média e desvio padrão do número de eventos para config. 25% por 75%

Dens.	Espiral		Zig-zag		RSSF padrão	
	Média	D. padrão	Média	D. padrão	Média	D. padrão
49	438376,2	916,9	326153,1	191,7	258534,5	1605,4
64	648156,1	1180,8	569563,8	232,3	505487	2401,2
81	794763,7	768,5	783736	1502,3	572270,1	2693,7
100	951705,1	743,9	897079,9	2409,1	758073,8	3199,1

rada pela RSSF com sorvedouro móvel empregando o planejamento de rota zig-zag, a qual capturou 26,2% mais eventos. Para o cenário de 64 nodos, a RSSF com coletor voando em espiral superou à RSSF com VANT em zig-zag e a RSSF padrão, capturando 12,3% e 28,2% mais eventos, respectivamente. Já a RSSF com VANT em zig-zag superou a RSSF padrão em 12,7% no cenário com 64 nodos. No cenário de 81 nodos, o desempenho da rede com VANT voando em espiral e RSSF com VANT em zig-zag aproximaram-se, o espiral superando o zig-zag em apenas 1,4%. Comparados à RSSF padrão, o sorvedouro móvel com espiral capturou 38,9% mais eventos, enquanto o sorvedouro móvel com zig-zag capturou 37% mais eventos. No último cenário, com 100 nodos, a RSSF com sorvedouro em espiral superou a configuração com VANT em zig-zag, capturando 5,7% mais eventos, assim como superou a RSSF Padrão capturando em 25,6% mais eventos. Assim como nos cenários de menor densidade, a RSSF com sorvedouro movendo-se em zig-zag superou a RSSF padrão no cenário de 100 nodos em grade, capturando 18,3% mais eventos.

Analisando o gráfico da Figura 15 e comparando as linhas das três configurações de RSSF avaliadas, observa-se que há uma tendência do espiral obter um resultado melhor que o zig-zag e RSSF padrão e que a diferença entre espiral e zig-zag tende a diminuir com o aumento da densidade. A RSSF padrão, empregando *multihop* para comunicação, obteve um menor número de eventos detectados em todos os cenários. Devido aos gastos energéticos com comunicação, esta rede terá um tempo de vida reduzido, o que impacta no número de eventos detectados pela mesma.

Os resultados experimentais quanto ao tempo de vida da rede para esta configuração de custo estão ilustrados na Figura 16. É possível observar que as redes que utilizam o planejamento de rota espiral e zig-zag sobreviveram o mesmo número de dias nos cenários de 49 e 100 nodos de densidade, apresentando uma pequena diferença no número de dias nas densidades de 64 e 81. Na densidade de 64 nodos, a RSSF que utiliza o planejamento espiral sobreviveu 0,2% mais dias que a RSSF com VANT voando em zig-zag, já no cenário de 81 nodos a RSSF que utiliza o planejamento de rota espiral sobreviveu 0,16% mais dias que a RSSF que utiliza o zig-zag. Quando comparado com a RSSF padrão, no cenário de 49 nodos, as RSSF com VANT em espiral e zig-zag apresentaram um tempo de vida de 42,9% maior, graças a economia de

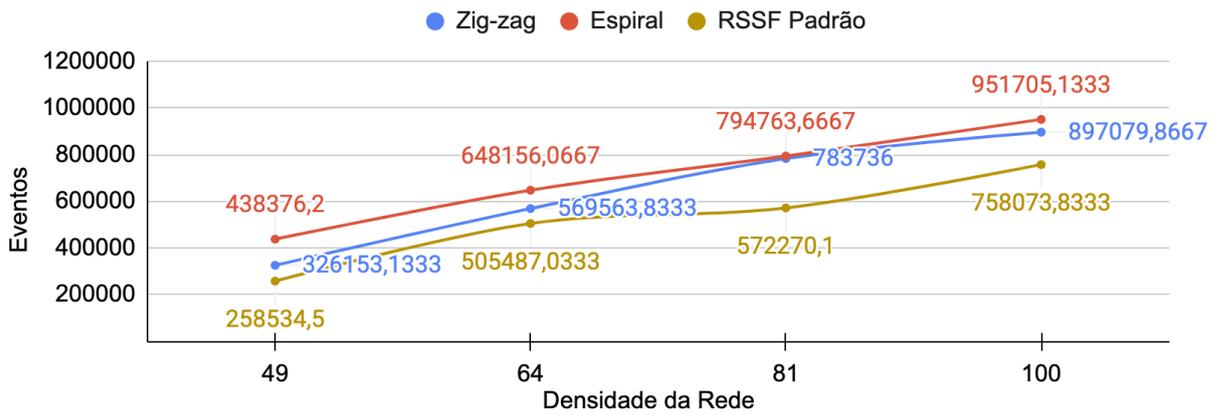


Figura 15 – Eventos capturados configuração 25% de comunicação por 75% CPU

Tabela 4 – Média de dias e desvio padrão para config. 25% por 75%

Dens.	Espiral		Zig-zag		RSSF padrão	
	Média	D. padrão	Média	D. padrão	Média	D. padrão
49	10	0	10	0	7	0
64	16	0,2	16	0	13	0
81	22,1	0,3	22	0,2	14,9	0,3
100	27	0	27	0	19	0

energia com transmissões em *multihop*. No cenário de 64 nodos, a RSSF que utiliza o planejamento espiral superou em 23,3% a RSSF padrão enquanto a RSSF que utiliza zig-zag superou a padrão em 23,1%. No cenário de 81 nodos, a RSSF com o planejamento de rota espiral sobreviveu 47,8% mais que a abordagem padrão enquanto a RSSF com zig-zag sobreviveu 47,6% mais que a RSSF padrão. Para o cenário de 100 nodos, a RSSF com espiral e a RSSF com zig-zag sobreviveram 42,1% mais tempo que a padrão. A Tabela 4 sumariza os resultados desta configuração.

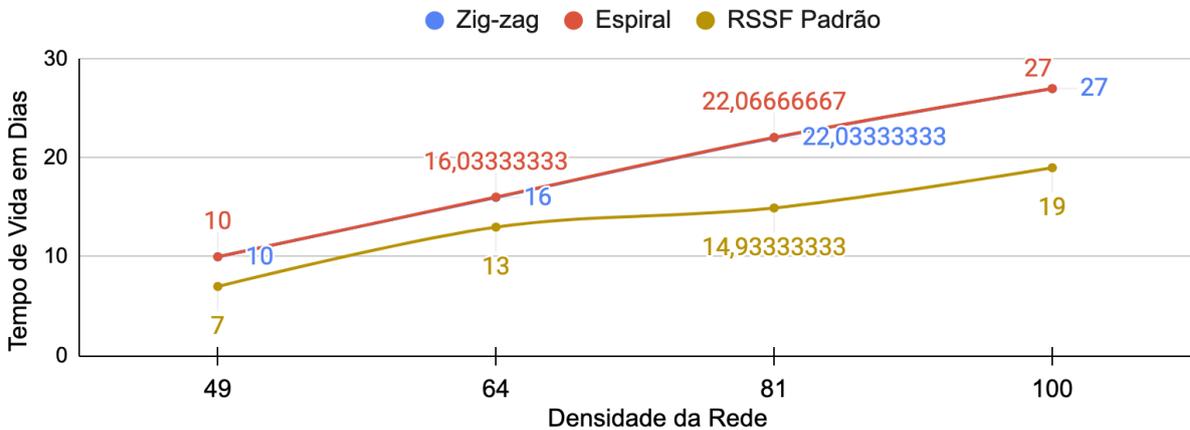


Figura 16 – Tempo de vida da rede config. 25% de comunicação por 75% CPU

Tabela 5 – Média e desvio padrão do número de eventos para config. 50% por 50%

Dens.	Espiral		Zig-zag		RSSF padrão	
	Média	D. padrão	Média	D. padrão	Média	D. padrão
49	413824,2	796,2	307703	192,2	173990,1	891,6
64	613607,2	938,9	537715,5	198,7	382940,3	1612,7
81	753881,7	512	741175	1387,5	351423,3	1808,9
100	904283,7	1006,6	850484,8	2001,3	527432,3	1791,1

5.2 50% de comunicação por 50% CPU

Neste conjunto de experimentos, foi utilizado o mesmo custo de comunicação e computação. A Tabela 5 sumariza os resultados obtido nesta configuração. Na primeira densidade avaliada, 49 nodos, a RSSF com sorvedouro com rota em espiral superou a RSSF onde a rota em zig-zag foi empregada pelo sorvedouro bem como a RSSF padrão, capturando 26,7% e 137,9% mais eventos, respectivamente. Nesta situação, a RSSF com VANT em zig-zag superou a RSSF padrão, capturando 76,9% mais eventos. Para o cenário de 64 nodos de densidade, a RSSF com o VANT como coletor com ambos os planejamentos de rota também superaram a RSSF padrão. A RSSF com sorvedouro com rota em espiral superou em 12,4% a RSSF onde o zig-zag foi empregado e em 60,2% a RSSF padrão. No cenário de mesma densidade, a RSSF com sorvedouro com rota zig-zag superou a RSSF padrão em 40,4%. No cenário de 81 nodos, a RSSF com sorvedouro com rota em espiral continuou superando as outras duas configurações. Quando a RSSF com sorvedouro em espiral é comparada com RSSF com zig-zag, a espiral capturou 1,7% mais eventos e 114,5% mais eventos que a RSSF padrão. Neste cenário, o coletor com planejamento de rota zig-zag superou a RSSF padrão, capturando 110,9% mais eventos. No último cenário de simulação avaliado, com 100 nodos de densidade, a RSSF com VANT voando com rota espiral superou a RSSF com zig-zag em 5,9%, e a RSSF padrão em 71,5%, a RSSF com coletor em rota zig-zag capturou 61,3% mais eventos que a RSSF padrão. A Figura 17 ilustra os resultados de média de números de eventos sensoreados nas três configurações de rede avaliadas, considerando as quatro densidades.

Para este cenário, como pode ser observado na Tabela 6, o tempo de vida da rede entre os algoritmos foram muito similares, somente nas densidades de 49 e 81 nodos que os sorvedouros com planejamentos de rota obtiveram resultados diferentes entre si. No cenário de 49 nodos, o sorvedouro com rota em zig-zag superou o sorvedouro com rota em espiral em 0,72% e no cenário de 81 nodos o algoritmo espiral sobreviveu 0,32% mais dias que o planejamento zig-zag. Quando comparado os coletores com planejamentos de rota a abordagem de RSSF padrão, é que foram obtidos resultados mais significantes. No cenário de 49 nodos, o sorvedouro com rota espiral superou a RSSF padrão em 97,25% enquanto o sorvedouro com rota em zig-

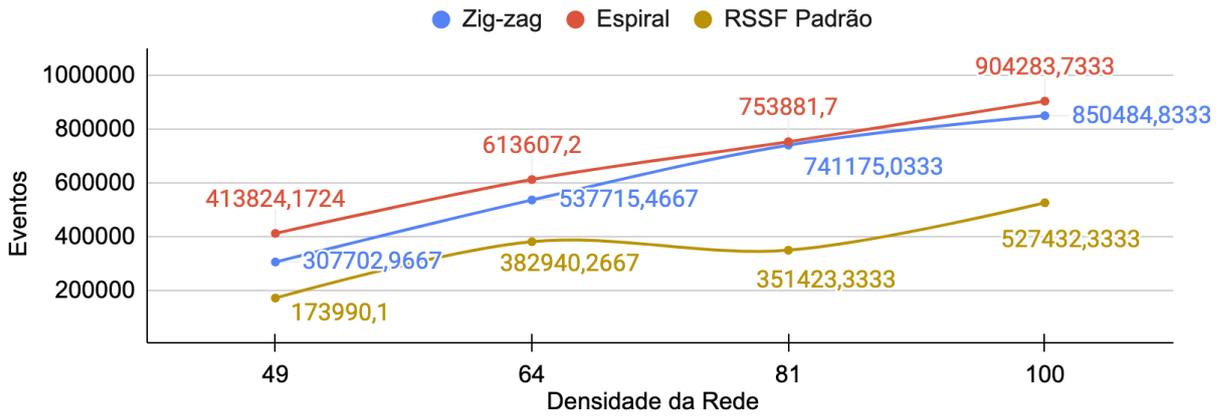


Figura 17 – Eventos capturados config. 50% de comunicação por 50% CPU

Tabela 6 – Média de dias e desvio padrão para config. 50% por 50%

Dens.	Espiral		Zig-zag		RSSF padrão	
	Média	D. padrão	Média	D. padrão	Média	D. padrão
49	9,9	0,4	9,9	0,3	5	0
64	16	0	16	0	10	0
81	21,5	0,5	21,4	0,5	9	0
100	26	0	26	0	13,7	0,5

zag superou em 98,7%. No cenário de 64 nodos de densidade, ambos os algoritmos superaram a abordagem padrão, sobrevivendo 60% mais dias. Para o cenário de 81 nodos, o sorvedouro móvel com planejamento de rota espiral superou a abordagem padrão, sobrevivendo 138,5% mais tempo, enquanto a abordagem zig-zag sobreviveu 137,9% mais tempo que a abordagem padrão. No último cenário avaliado, ambos os sorvedouros com planejamentos de rota sobreviveram 89,8% mais tempo que a RSSF padrão. A Figura 20 ilustra os resultados.

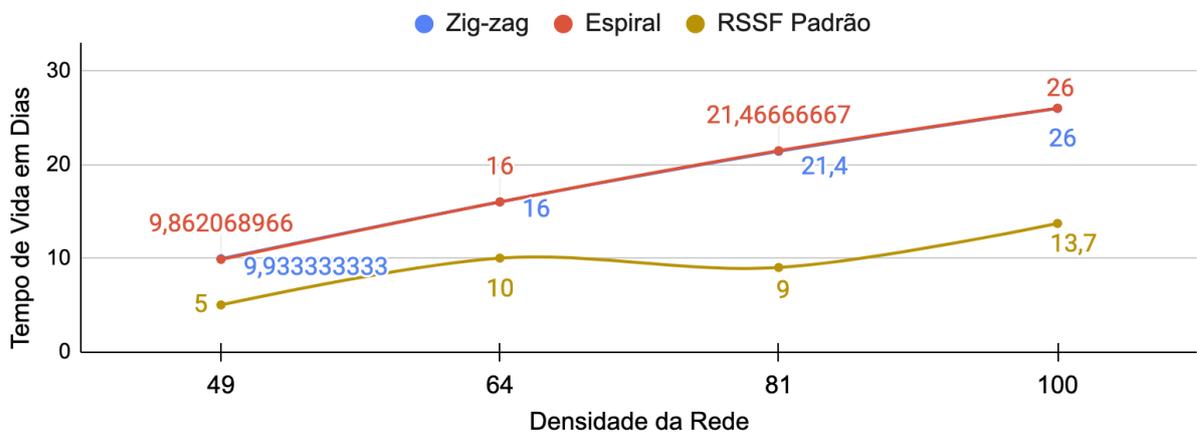


Figura 18 – Tempo de vida da rede config. 50% de comunicação por 50% CPU

Tabela 7 – Média e desvio padrão do número de eventos para config. 75% por 25%

Dens.	Espiral		Zig-zag		RSSF padrão	
	Média	D. padrão	Média	D. padrão	Média	D. padrão
49	949636,2	1087	704041,4	643,9	253159,3	542,6
64	1299269,7	1373,1	1131318,7	420,7	600649,1	978,1
81	1293267,2	733,8	1270789,3	2301,2	454839,3	680,5
100	1366044	910,7	1277526,7	3298,2	732734,3	1090

5.3 75% de comunicação por 25% CPU

Para esta relação de custos a diferença entre as abordagens de planejamentos de rota e RSSF padrão foram maiores que as avaliadas nos cenários anteriores, como pode ser visualizado na Tabela 7. No cenário de 49 nodos, a RSSF com sorvedouro móvel utilizando o planejamento de rota em espiral superou o sorvedouro móvel que utiliza o algoritmo zig-zag, capturando 25,9% mais eventos e 275,1% mais eventos que a RSSF padrão. Neste mesmo cenário, a RSSF com planejamento de rota zig-zag superou a abordagem padrão em 178,1%. No cenário de 64 nodos, a RSSF com o planejamento de rota zig-zag superou a abordagem padrão capturando 88,4% mais eventos. No entanto, quando comparado com a RSSF com planejamento em espiral, a RSSF com zig-zag capturou 12,9% menos eventos e a RSSF com planejamento de rota espiral superou a RSSF padrão com 116,3% mais eventos capturados. No cenário de 81 nodos, a RSSF com sorvedouro com rota espiral superou a RSSF com rota em zig-zag e a RSSF padrão, capturando 184,3% mais eventos que a RSSF padrão e 1,7% mais eventos que a RSSF com sorvedouro em rota zig-zag. Para este cenário, o sorvedouro com rota em zig-zag superou a RSSF padrão em 179,4%. No último cenário avaliado, com densidade de rede de 100 nodos, a RSSF com sorvedouro em rota espiral superou a RSSF com rota em zig-zag e a abordagem padrão, capturando 6,5% mais eventos que o coletor com zig-zag e 86,4% mais eventos que a RSSF padrão. Neste cenário, o coletor com zig-zag superou a abordagem padrão em 74,4%. Os resultados desta configuração estão ilustrados na Figura 19.

Neste cenário também foi avaliado o tempo de vida destas RSSFs. Como pode ser observado na Tabela 8, em todas as densidades avaliadas, o tempo de vida da rede foi o mesmo quando o sorvedouro utilizando os planejamentos de rota espiral e zig-zag são comparados. Entretanto, quando os coletores com os algoritmos de planejamento de rota são comparados com a abordagem padrão, diferentes resultados foram obtidos. No primeiro cenário, com densidade da rede de 49 nodos, os sorvedouros móveis sobreviveram 200% mais dias que a RSSF padrão. Para a densidade de 64 nodos, os coletores com planejamento de rota sobreviveram 113,3% mais que a abordagem padrão. No cenário de 81 nodos, os coletores móveis com planejamento de rota em espiral e zig-zag sobreviveram 166,7% mais tempo que a RSSF padrão, e no último

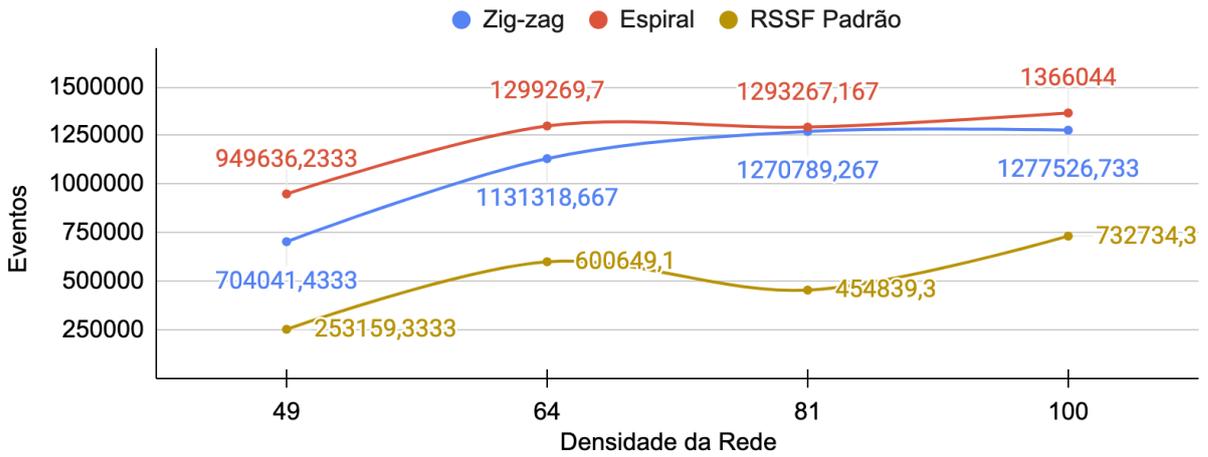


Figura 19 – Eventos capturados config. 75% de comunicação por 25% CPU

Tabela 8 – Média de dias e desvio padrão para config. 75% por 25%

Dens.	Espiral		Zig-zag		RSSF padrão	
	Média	D. padrão	Média	D. padrão	Média	D. padrão
49	21	0	21	0	7	0
64	32	0	32	0	15	0
81	32	0	32	0	12	0
100	32	0	32	0	19	0

cenário, com densidade da rede de 100 nodos, os sorvedouros móveis superaram em 68,4% a abordagem padrão. A Figura 21 ilustra estes resultados.

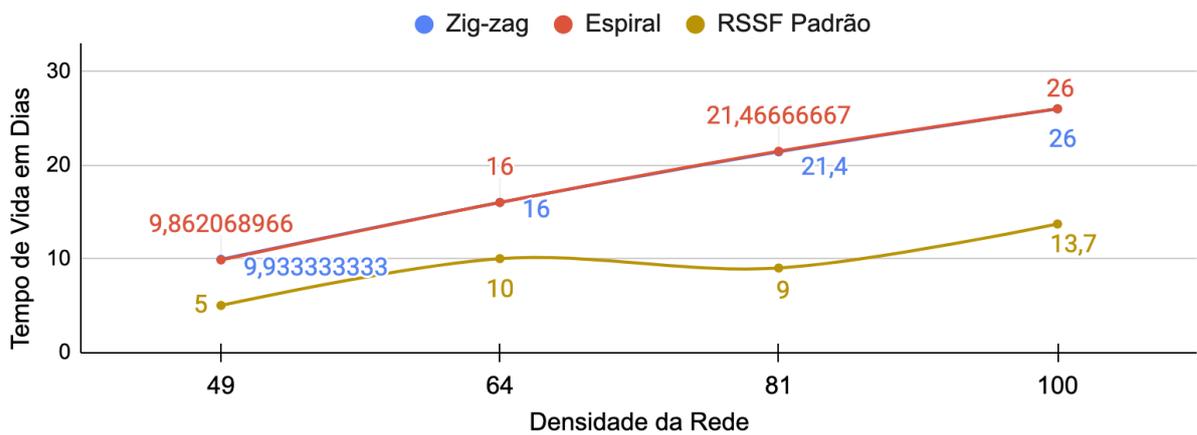


Figura 20 – Tempo de vida da rede config. 50% de comunicação por 50% CPU

5.4 Discussão

A Tabela 9 apresenta os resultados de média de número de eventos para todos os experimentos, permitindo comparar os resultados obtidos para as três relações de custo exploradas. Considerando esta métrica, o sorvedouro com rota espiral supe-

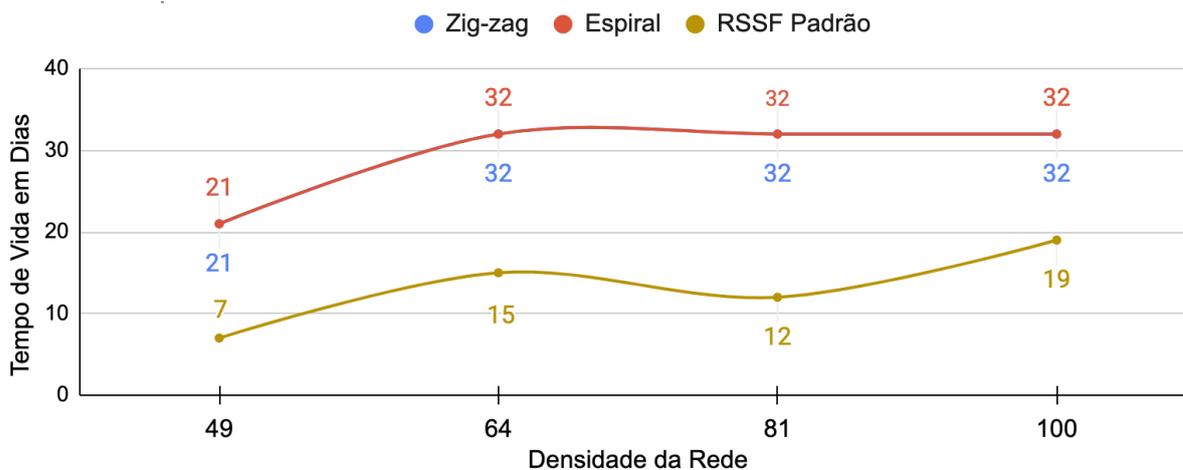


Figura 21 – Tempo de vida da rede config. 75% de comunicação por 25% CPU

rou o sorvedouro em zig-zag e a RSSF padrão nas três diferentes relações de custo exploradas e em todas as densidades de rede avaliadas, como resumido na Tabela 9. Nesta tabela, é possível observar que quanto maior é a carga de comunicação, a diferença no número de eventos sensoreados entre as RSSF com coletores móveis e a RSSF padrão aumentam.

Estes resultados apresentados na Tabela 9 também mostram que o sorvedouro voando em espiral coleta um maior número de eventos em média que o sorvedouro em zig-zag em todas as configurações experimentadas. Isso ocorre pois o tempo de voo necessário para uma cobertura ou uma volta completa na trajetória em espiral é menor que o tempo de voo do zig-zag. Esta diferença no tempo de voo reflete no número total de eventos coletados, bem como no número de eventos coletados por dia nas RSSF com sorvedouro em espiral e em zig-zag. Assim, mais coletas foram realizadas pelo sorvedouro com a trajetória em espiral, durante a simulação. É importante destacar que o tempo de simulação não é fixo e depende dos eventos gerados pelo modelo estocástico e conseqüente descarga da bateria dos nodos.

A Tabela 10 sumariza os resultados de tempo de vida da rede para todo o conjunto de experimentos realizados. Em todos os cenários, as RSSF com o sorvedouro móvel permaneceram vivas por mais dias que a RSSF padrão. A melhora obtida pelo emprego do sorvedouro móvel é maior quanto maior for o custo de comunicação em relação ao de processamento. No entanto, comparando os sorvedouros com rota em espiral e zig-zag, estes tiveram resultados similares. Somente em poucos casos as RSSF com coletor utilizando o planejamento de rota espiral sobreviveram mais dias que a RSSF com coletor em rota zig-zag.

Os experimentos realizados indicam que, as redes empregando o sorvedouro móvel ou seja um VANT como coletor de dados, independente do algoritmo de planejamento de rota adotado superam a rede padrão que utiliza comunicação *multihop* tanto

Tabela 9 – Média do número de eventos sensoreados nas configurações avaliadas

Densidade RSSF	Espiral	Zig-zag	RSSF padrão
25% de comunicação por 75% CPU			
49	438376,2	326153,1	258534,5
64	648156,1	569563,8	505487
81	794763,6	783736	572270,1
100	951705,1	897079,9	758073,8
50% de comunicação por 50% CPU			
49	413824,2	307702,9	173990,1
64	613607,2	537715,5	382940,3
81	753881,7	741175	351423,3
100	904283,7	850484,8	527432,3
75% de comunicação por 25% CPU			
49	949636,2	704041,4	253159,3
64	1299269,7	1131318,7	600649,1
81	1293267,2	1270789,3	454839,3
100	1366044	1277526,7	732734,3

em número de eventos quanto em tempo de vida da rede. Embora o emprego do VANT em espiral tenha apresentado resultados superiores aos do zig-zag em número de eventos, no tempo de vida, ambos não apresentaram diferença significativa.

Tabela 10 – Média de dias nas configurações avaliadas

Densidade RSSF	Espiral	Zig-zag	RSSF padrão
25% de comunicação por 75% CPU			
49	10	10	7
64	16	16	13
81	22,1	22	14,9
100	27	27	19
50% de comunicação por 50% CPU			
49	9,9	9,9	5
64	16	16	10
81	21,5	21,4	9
100	26	26	13,7
75% de comunicação por 25% CPU			
49	21	21	7
64	32	32	15
81	32	32	12
100	32	32	19

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi analisado o impacto do uso de veículos aéreos não tripulados como sorvedouros móveis em redes de sensores sem fio reativas. Para esta análise, o emprego do VANT com o planejamentos de rota zig-zag e com planejamento espiral foram comparados entre si e com a RSSF padrão utilizando um sorvedouro fixo e comunicação *multihop*. Para suportar a avaliação proposta, o sorvedouro móvel juntamente com as estratégias de planejamento de rota foram implementados no Eboracum, que é um *framework* para modelagem e simulação de RSSFs, que avalia a descarga da bateria dos nodos baseado na definição de custos para tarefas de comunicação, computação e ciclo inativo.

Experimentos utilizando diferentes cenários foram realizados, variando a densidade da rede, em 49 (grade de 7x7), 64 (grade de 8x8), 81 (grade de 9x9) e 100 nodos (grade de 10x10). Para cada cenário, variou-se também a relação de custos entre comunicação e computação demandada pelos nodos sensores da rede, explorando três diferentes proporções de custos, 25% de comunicação por 75% de CPU, 50% por 50% e 75% de comunicação por 25% de CPU.

A partir dos resultados experimentais obtidos foi possível observar que a utilização do VANT como sorvedouro móvel foi melhor para a performance da rede considerando tempo de vida da rede e número de eventos que esta foi capaz de processar, para todos os cenários avaliados neste trabalho. Nas proporções entre comunicação e computação exploradas, foi possível observar que quanto mais energia é gasta com comunicação na RSSF, mais a RSSF com o sorvedouro móvel supera a abordagem de RSSF padrão. Em todos os experimentos avaliando a métrica de número de eventos capturados, o sorvedouro com planejamento de rota em espiral superou o sorvedouro com rota em zig-zag, no entanto, quando a métrica foi o tempo de vida da rede, ambos os algoritmos de planejamento de rota não apresentaram diferenças significativas. Os principais resultados desta dissertação foram publicado em (ANTUNES; BRISOLARA; FERREIRA, 2020).

Para avaliar o emprego do sorvedouro móvel, os nodos da rede foram equipados com uma memória para salvar os dados para coleta, o que não é necessário na rede

padrão pois os dados são repassados usando o *multihop*. Como trabalho futuro, é interessante explorar o tamanho da memória requerida, variando a frequência dos eventos e investigando se os diferentes algoritmos de planejamento de rota trarão impacto na memória requerida.

Nos experimentos realizados no trabalho, a latência e a perda de pacotes não foram consideradas, pois o simulador empregado abstrai muitos aspectos da comunicação. No entanto, sabe-se que em cenários reais ocorrem perdas de pacotes e algumas aplicações podem exigir que um evento seja notificado a estação base em um determinado tempo. Como trabalho futuro, extensões podem ser realizadas no simulador visando permitir avaliações de perdas e também da latência das mensagens.

Nos experimentos realizados com a RSSF padrão, o sorvedouro é localizado no centro do lado esquerdo do cenário, considerando que a região monitorada é uma área de vegetação (plantação) e que o sorvedouro fica em uma área externa à área de interesse. O posicionamento empregado pode não ser vantajoso para eficiência da rede, já que o sorvedouro consegue se comunicar somente com nodos sensores que estão na borda da rede no lado esquerdo. Como o posicionamento do sorvedouro estático interfere na eficiência da rede, como trabalho futuro, é interessante realizar experimentos com o sorvedouro estático posicionado nos cantos extremos (pior caso) e no centro da área de interesse (melhor caso), ampliando a discussão apresentada neste trabalho.

Os experimentos realizados neste trabalho consideraram redes com nodos dispostos em grade e exploraram quatro densidades diferentes. Pretende-se ampliar os cenários avaliados de forma a explorar outros cenários, redes mais densas e com nodos distribuídos de maneira aleatória. O custo de computação varia muito de acordo com a aplicação. Assim outro ponto interessante a ser explorado nos trabalhos futuros é a caracterização dos custos empregados na simulação, baseando-se em uma aplicação específica e considerando sua execução em uma rede constituída de dispositivos utilizados no mercado atualmente.

Nosso grupo de pesquisa tem investigado técnicas de balanceamento de carga em RSSF reativas, que distribuem a carga de computação. É interessante comparar a melhoria na eficiência apresentada pelo emprego do sorvedouro móvel com a melhoria obtida com as técnicas de balanceamento de carga propostas no grupo. Além de discutir, quando ou em que tipo de aplicação cada uma destas otimizações obterão melhores resultados.

Na comunidade de planejamento de rota também podemos encontrar outras propostas de planejamento, inclusive com contribuições de nosso grupo de pesquisa. Assim, pretende-se também explorar outros algoritmos de planejamentos de rota, que utilizem técnicas de decomposição celular com a implantação de rede com zonas de voo proibidas, ou ainda que procurem maximizar a cobertura economizando a energia

do VANT.

REFERÊNCIAS

AKYILDIZ, I. F.; VURAN, M. C. **Wireless sensor networks**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010. v.4.

ANDERSEN, H. L. **Path Planning for Search and Rescue Mission using Multicopters**. 2014. Master 's Thesis — Instituttfor Teknisk Kybernetikk, Trondheim, Noruega.

ANTUNES, J. R.; BRISOLARA, L. B.; FERREIRA, P. R. UAVs as Data Collectors in the WSNs: Investigating the Effects of Back-and-Forth and Spiral Coverage Paths in the Network Lifetime. In: X BRAZILIAN SYMPOSIUM ON COMPUTING SYSTEMS ENGINEERING (SBESC), 2020., 2020. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2020. p.1–8.

ARTEMENKO, O.; DOMINIC, O. J.; ANDRYEYEV, O.; MITSCHLE-THIEL, A. Energy-Aware Trajectory Planning for the Localization of Mobile Devices Using an Unmanned Aerial Vehicle. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER COMMUNICATION AND NETWORKS (ICCCN), 2016., 2016. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2016. p.1–9.

BRAGA, M. L. **Aplicação de Algoritmos Genéticos na Configuração de Parâmetros em Técnica Bioinspirada para Balanceamento de Carga em RSSF**. 2018. 54p. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) — Programa de Pós-Graduação em Computação, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

CABREIRA, T. M.; BRISOLARA, L. B.; FERREIRA JR., P. R. Survey on Coverage Path Planning with Unmanned Aerial Vehicles. **Drones**, [S.l.], v.3, n.1, 2019.

CABREIRA, T. M.; FRANCO, C. D.; FERREIRA, P. R.; BUTTAZZO, G. C. Energy-Aware Spiral Coverage Path Planning for UAV Photogrammetric Applications. **IEEE Robotics and Automation Letters**, [S.l.], v.3, n.4, p.3662–3668, Oct 2018.

CASTIBLANCO, C. et al. Air Drones for Explosive Landmines Detection. In: ROBOT2013: FIRST IBERIAN ROBOTICS CONFERENCE, 2014, Cham. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2014. v.253, p.107–114.

CERIOTTI, M. et al. Monitoring heritage buildings with wireless sensor networks: The Torre Aquila deployment. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION PROCESSING IN SENSOR NETWORKS, 2009., 2009. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2009. p.277–288.

CHOSSET, H. Coverage for robotics - A survey of recent results. **Ann. Math. Artif. Intell.**, [S.l.], v.31, n.1, p.113–126, 10 2001.

DABIRI, F. et al. **Lightweight Embedded Systems**. [S.l.: s.n.], 2017. p.16–1.

DI FRANCO, C.; BUTTAZZO, G. Coverage Path Planning for UAVs Photogrammetry with Energy and Resolution Constraints. **Journal of Intelligent Robotic Systems**, [S.l.], v.83, 02 2016.

FERREIRA, P. R.; BRISOLARA, L.; INDRUSIAK, L. S. Decentralised Load Balancing in Event-Triggered WSNs Based on Ant Colony Work Division. In: 2009 , 2015. **Anais...** SEAA, 2015. p.69–75.

FERREIRA, P. R.; BRISOLARA, L.; INDRUSIAK, L. S. Decentralised Load Balancing in Event-Triggered WSNs Based on Ant Colony Work Division. In: EUROMICRO CONFERENCE ON SOFTWARE ENGINEERING AND ADVANCED APPLICATIONS, 41., 2015. **Anais...** SEAA, 2015. p.69–75.

GONZALEZ, A. V. **Redes de Sensores com Nodos Moveis** :Investigando Efeitos da Mobilidade na Cobertura de Sensoriamento e no Balanceamento de Carga. 2016. 66p. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) — Programa de Pós-Graduação em Computação, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

GONZÁLEZ, A. V.; FERREIRA, P. R.; BRISOLARA, L. B. Mobile Nodes as a Dynamic Management Strategy to Improve Coverage in Wireless Sensor Networks. In: VI BRAZILIAN SYMPOSIUM ON COMPUTING SYSTEMS ENGINEERING (SBESC), 2016., 2016. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2016. p.180–185.

GRIFFIN, G. The Use of Unmanned Aerial Vehicles for Disaster Management. **GEO-MATICA**, [S.l.], v.68, p.265–281, 12 2014.

GUERRERO, J. A.; BESTAOUI, Y. UAV Path Planning for Structure Inspection in Windy Environments. **Journal of Intelligent & Robotic Systems**, [S.l.], v.69, n.1, p.297–311, Jan 2013.

HEINZELMAN, W. R.; CHANDRAKASAN, A.; BALAKRISHNAN, H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In: ANNUAL HAWAII IN-

INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM SCIENCES, 2000. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2000. v.2, p.10.

KIM, Y.; EVANS, R. G.; IVERSEN, W. M. Remote Sensing and Control of an Irrigation System Using a Distributed Wireless Sensor Network. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, [S.l.], v.57, n.7, p.1379–1387, July 2008.

LI, D.; WANG, X.; SUN, T. Energy-optimal coverage path planning on topographic map for environment survey with unmanned aerial vehicles. **Electronics Letters**, [S.l.], v.52, n.9, p.699–701, 2016.

LOTTE, P. et al. UAV-based crop and weed classification for smart farming. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION (ICRA), 2017., 2017. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2017. p.3024–3031.

LOUREIRO, A. A. et al. Redes de sensores sem fio. In: XXI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES (SBRC), 2003. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2003. p.179–226.

MARQUES, M. R. S.; BRISOLARA, L.; FERREIRA, P. R.; INDRUSIAK, L. S. Eboracum: An extensible framework for high-level modeling and evaluation of reactive and adaptable WSNs. In: IEEE 21ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMERGING TECHNOLOGIES AND FACTORY AUTOMATION (ETFA), 2016., 2016. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2016. p.1–8.

ÖST, G. **Search path generation with UAV applications using approximate convex decomposition.**

PEREIRA, I. A.; BRISOLARA, L. B. D.; ROBERTO, P.; JR, F. Application-Level Load Balancing for Reactive Wireless Sensor Networks : An Approach Based on Constraint Optimization Problems. In: BRAZILIAN CONFERENCE ON INTELLIGENT SYSTEMS, 2020, Rio Grande. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2020. p.1–15.

PEREIRA, I. A.; BRISOLARA, L. B. de; FERREIRA, P. R. Application-Level Load Balancing for Reactive Wireless Sensor Networks: An Approach Based on Constraint Optimization Problems. In: INTELLIGENT SYSTEMS, 2020, Cham. **Anais...** Springer International Publishing, 2020. p.63–76.

POPESCU, D. et al. A Survey of Collaborative UAV–WSN Systems for Efficient Monitoring. **Sensors**, [S.l.], v.19, n.21, 2019.

PTOLEMY.ORG. **System Design, Modeling, and Simulation using Ptolemy II.** Acesso em: 2020-12-15, Disponível em: <https://ptolemy.berkeley.edu/books/Systems>.

PTOLEMY.ORG. **Vergil**. Acesso em: 2021-04-21, Disponível em: <https://ptolemy.berkeley.edu/java/vergil/index.htm>.

ROSELLÓ, V.; PORTILLA, J.; KRASTEVA, Y. E.; RIESGO, T. Wireless sensor network modular node modeling and simulation with VisualSense. In: ANNUAL CONFERENCE OF IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2009., 2009. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2009. p.2685–2689.

SAYYED, A.; BECKER, L. B. A Survey on Data Collection in Mobile Wireless Sensor Networks (MWSNs). In: COOPERATIVE ROBOTS AND SENSOR NETWORKS 2015, 2015, Cham. **Anais...** Springer International Publishing, 2015. p.257–278.

SHINGHAL et al. Wireless sensor networks in agriculture: For potato farming. **International Journal of Engineering Science and Technology**, [S.l.], v.2, 08 2010.

SOHRABY, K.; MINOLI, D.; ZNATI, T. **Wireless sensor networks**: technology, protocols, and applications. [S.l.]: John wiley & sons, 2007.

TORRES ANAYA, M.; PELTA, D.; VERDEGAY, J.; TORRES, J. Coverage path planning with unmanned aerial vehicles for 3D terrain reconstruction. **Expert Systems with Applications**, [S.l.], v.55, 02 2016.

VALENTE, J. et al. An Air-Ground Wireless Sensor Network for Crop Monitoring. **Sensors**, [S.l.], v.11, p.6088–6108, 12 2011.

WANG, C. et al. Efficient Aerial Data Collection with UAV in Large-Scale Wireless Sensor Networks. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, [S.l.], v.2015, p.1–19, 11 2015.

XU, J. et al. Animal monitoring with unmanned aerial vehicle-aided wireless sensor networks. In: IEEE 40TH CONFERENCE ON LOCAL COMPUTER NETWORKS (LCN), 2015., 2015. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2015. p.125–132.

YANG, Y.; MIAO, Y. A path planning method for mobile sink in farmland wireless sensor network. In: IEEE 2ND INFORMATION TECHNOLOGY, NETWORKING, ELECTRONIC AND AUTOMATION CONTROL CONFERENCE (ITNEC), 2017., 2017. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2017. p.1157–1160.

YUE, W.; JIANG, Z. Path Planning for UAV to Collect Sensors Data Based on Spiral Decomposition. **Procedia Comput. Sci.**, NLD, v.131, n.C, p.873–879, May 2018.

ZHAN, C.; ZENG, Y.; ZHANG, R. Trajectory Design for Distributed Estimation in UAV-Enabled Wireless Sensor Network. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, [S.l.], v.67, n.10, p.10155–10159, Oct 2018.

ZHANG, Y.; CHEN, D.; WANG, S.; TIAN, L. A promising trend for field information collection: An air-ground multi-sensor monitoring system. **Information Processing in Agriculture**, [S.l.], v.5, n.2, p.224 – 233, 2018.