



AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO IEEE 802.11 PARA COLETA DE DADOS EM FLORESTAS COM AUXÍLIO DE DRONES

Caroline Maul de Araujo Lima

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Pedro Braconnot Velloso

Rio de Janeiro
Junho de 2018

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO IEEE 802.11 PARA COLETA DE DADOS
EM FLORESTAS COM AUXÍLIO DE DRONES

Caroline Maul de Araujo Lima

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE
ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Pedro Braconnot Velloso, Dr.

Prof. Luís Henrique Maciel Kosmowski Costa, Dr.

Prof. Marcelo Gonçalves Rubinstein, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JUNHO DE 2018

Lima, Caroline Maul de Araujo

Avaliação de Desempenho do IEEE 802.11 para Coleta de Dados em Florestas com Auxílio de Drones/Caroline Maul de Araujo Lima. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XIII, 47 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Pedro Braconnot Velloso

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 44 – 47.

1. Internet das Coisas.
 2. Avaliação de desempenho.
 3. IEEE 802.11.
 4. Monitoramento de vida silvestre.
- I. Velloso, Pedro Braconnot. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

Soli Deo Gloria!

Agradecimentos

A Deus, autor e consumidor da minha fé. A Ele seja dada toda honra, glória e louvor, pois "Não que sejamos capazes, por nós, de pensar alguma coisa, como de nós mesmos; mas a nossa capacidade vem de Deus" (2 Coríntios 3:5).

À minha mãe Solange e ao meu pai Carlos Alberto por todo apoio, respeito, amor e força.

To my dear Randy Dillard, for helping me see the future with new eyes.

Ao professor Pedro Velloso, por toda compreensão, dedicação e apoio. Este sendo imprescindível para a conclusão deste trabalho.

Ao diretor do Parque Nacional da Tijuca Ernesto de Castro, por disponibilizar toda a infraestrutura necessária para realizar as medidas e aos funcionários do ICM-BIO, pilotos do *drone*, Marcelo Mendes e Guilherme Medeiros, por sua solicitude em auxiliar em todas as medições.

A todos da equipe do GTA, por todo conhecimento compartilhado ao longo desses 2 anos de parceria.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO IEEE 802.11 PARA COLETA DE DADOS EM FLORESTAS COM AUXÍLIO DE DRONES

Caroline Maul de Araujo Lima

Junho/2018

Orientador: Pedro Braconnot Velloso

Programa: Engenharia Elétrica

A maioria das soluções para IoT, com intuito de reduzir o consumo de energia, assume severas restrições à taxa de comunicação limitando-as para o uso de aplicações onde os sensores captam pequenas quantidades de dados. Por isso, estas soluções não são adequadas para o monitoramento de animais silvestres, que exige a transmissão de grandes quantidades de fotos capturadas por câmeras *trap* instaladas no meio das florestas. Além disso o ambiente florestal também prejudica a capacidade de transmissão. Portanto, este trabalho propõe a coleta de dados de dispositivos na floresta com o auxílio de drones. Assim, visa avaliar o desempenho de uma rede sem fio para a comunicação entre o *drone* e os dispositivos de captura de imagem usando o padrão 802.11. Para tal, são avaliadas as principais métricas de rede, tais como alcance máximo, taxa de transmissão e perda de pacotes. E, ainda, a energia consumida para realizar a transmissão. A título de comparação e para melhor caracterizar a transmissão na floresta, são avaliados os dispositivos sem fio em outros cenários: ambiente interno, área externa aberta e dentro da floresta. O resultado mais importante é a viabilidade do uso desses tipos de dispositivos de baixa capacidade computacional para aplicações florestais.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

IEEE 802.11 PERFORMANCE ASSESSMENT FOR DATA COLLECTION IN
FORESTS USING DRONES

Caroline Maul de Araujo Lima

June/2018

Advisor: Pedro Braconnot Velloso

Department: Electrical Engineering

Most IoT solutions, in order to reduce power consumption, take severe constraints on the communication rate by limiting them to the use of applications where sensors capture small amounts of data. Therefore, these solutions are not suitable for the monitoring of wild animals, which requires the transmission of large amounts of photos captured by trap cameras installed in the middle of the forests. In addition, the forest environment also impairs transmission capacity. Therefore, this work proposes the collection of data from devices in the forest with the help of drones. Thus, it aims to evaluate the performance of a wireless network for the communication between the drone and the image capture devices using the 802.11 standard. To achieve our goal, we evaluate traditional network metrics, such as maximum range, transmission rate, and packet loss. The energy consumed to carry out the transmission is also evaluated. To compare and better characterize the transmission in the forest, the wireless devices are evaluated in other scenarios: indoor, outdoor, and inside the forest. The most important result is the feasibility of using these types of devices with low computational capacity for forest applications.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xi
Lista de Abreviaturas	xii
1 Introdução	1
1.1 Internet das Coisas	1
1.2 Coleta de Dados em Floresta	2
1.3 Organização do Trabalho	4
2 Trabalhos Relacionados	6
2.1 Avaliação de desempenho de redes sem fio	6
2.2 Análise de Redes sem fio em Ambiente Florestal	7
2.3 Monitoramento com Internet das Coisas	9
3 IoTWild: Solução IoT para Coleta de dados em Floresta	10
4 Tecnologias de Comunicação para Internet das Coisas	13
4.1 As Principais Tecnologias	14
4.1.1 802.11n	14
4.1.2 Bluetooth	14
4.1.3 802.11ah	15
4.1.4 LoRa	15
4.1.5 ZigBee	16
5 Experimentos	18
5.1 Avaliação de desempenho do IEEE 802.11	18
5.1.1 Cenário: Floresta	19
5.1.2 Cenários: externo e interno	20
5.1.3 Equipamentos e Configurações	22
5.2 Consumo de energia do sistema	25

6	Resultados	28
6.1	Desempenho da rede	28
6.1.1	Alcance máximo	28
6.1.2	Vazão da rede	30
6.1.3	Taxa de Perda de Pacotes	34
6.1.4	Posicionamento do drone <i>versus</i> desempenho da rede	36
6.1.5	Tempo de transmissão de imagens	36
6.2	Consumo energético	37
6.2.1	Drone e Raspberry Pi	37
6.2.2	Módulo WiFi	38
7	Conclusões	41
7.1	Trabalhos Futuros	42
	Referências Bibliográficas	44

Lista de Figuras

3.1	Cenário base da aplicação IoTWild	11
4.1	802.11 se destaca em termos de taxa de transmissão	17
5.1	Foto capturada na floresta com as câmeras de monitoramento, tamanho aproximado 600 kB	19
5.2	Área que compõem o Parque Nacional da Tijuca	19
5.3	Trilha usada para os experimentos	20
5.4	Cenários dos Experimentos	21
5.5	Câmera armadilha usada para monitoramento de animais	23
5.6	Montagem do equipamento para testes	25
5.7	Módulo de desenvolvimento x versão mínima do módulo ESP-12F	27
6.1	RSSI x Alcance	29
6.2	Vazão x tamanho de pacote em ambiente externo	31
6.3	Vazão x tamanho de pacote em ambiente interno	32
6.4	Vazão x tamanho de pacote em ambiente fechado com barreiras	33
6.5	Vazão x tamanho de pacote dentro da floresta	33
6.6	Vazão x tamanho de pacote experimento com drone	34
6.7	Perdas para o menor e maior tamanho de pacote	35
6.8	Vazão decai consideravelmente quando o <i>drone</i> é mal posicionado	36
6.9	Consumo de energia <i>Raspberry</i> executando programas básicos do sistema operacional e programa para coleta de dados	38
6.10	Consumo de energia do módulo de desenvolvimento ESP-12F, IEEE 802.11, atuando como cliente	39
6.11	Consumo de energia do módulo ESP-12F versão mínima, IEEE 802.11, atuando como cliente	40

Lista de Tabelas

4.1	Comparação entre as tecnologias mais populares usadas em Internet das Coisas	16
5.1	Resumo dos Experimentos Realizados	22
5.2	Consumo aproximado do módulo ESP-12F conforme dados do fabricante	26
6.1	Alcance máximo	30
6.2	Experimento 5: Floresta com <i>Drone</i>	34
6.3	Tempo de transmissão de imagens com relação ao seu tamanho	37

Lista de Abreviaturas

6LoWPAN	<i>IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Networks</i> , p. 13
BER	<i>Bit Error Rate</i> , p. 35
BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i> , p. 14
CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i> , p. 35
CPU	<i>Central Processing Unit</i> , p. 26
I2S	<i>Inter-IC Sound</i> , p. 26
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> , p. 3
IPSP	<i>Internet Protocol Support Profile</i> , p. 15
IP	<i>Internet Protocol</i> , p. 22
IoT	<i>Internet of Things</i> , p. 1
LED	<i>Light-Emitting Diode</i> , p. 27
LPWAN	<i>Low-Power Wide-Area Network</i> , p. 6
MIMO	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i> , p. 14
PAN	<i>Personal Area Network</i> , p. 16
PCB	<i>Printed Circuit Board</i> , p. 22
PMF	<i>Probability Mass Function</i> , p. 35
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> , p. 26
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i> , p. 8
SIG	<i>Special Interest Group</i> , p. 14
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i> , p. 22

UDP *User Datagram Protocol*, p. 7

USB *Universal Serial Bus*, p. 22

Capítulo 1

Introdução

O monitoramento da biodiversidade é de importância mundial, uma vez que mudanças bruscas podem afetar toda a humanidade. Diversos países estão comprometidos em implementar um plano estratégico para a Convenção de Diversidade Biológica 2011-2020, o que demandará a exploração de novas ferramentas para o acompanhamento e proteção da biodiversidade mundial [1].

De maneira geral, muitas ferramentas já vem sendo usadas para tal objetivo. Entre elas, se destacam as câmeras e *drones*. No Parque Nacional da Tijuca, por exemplo, pesquisadores usam *camera trap* (câmeras armadilha) para monitorar a vida selvagem. Já na cidade de Petrópolis-RJ, o órgão de Defesa Civil usa veículos aéreos não-tripulados para nortear equipes de bombeiros para as áreas de queimadas e, ainda, avaliar e antecipar o regresso do fogo em áreas florestais [2].

Porém, em sua maioria, as ferramentas já usadas demandam ainda grande intervenção humana, o que em ambientes florestais é um grande problema devido à dificuldade de acesso a esses locais. Dentre essas dificuldades, se destaca o recolhimento dos dados de câmeras e sensores de monitoramento instalados na floresta, o que requer visitas periódicas para a coleta dos dados obtidos. Por isso a importância do estudo de novas alternativas que facilitem e aprimorem o monitoramento da vida selvagem em locais de difícil acesso. Neste contexto, o paradigma de Internet das Coisas tem demonstrado ser uma alternativa promissora.

1.1 Internet das Coisas

Um crescente número de objetos, físicos, estão sendo conectados a Internet em uma taxa sem precedentes, solidificando a ideia de Internet das Coisas (IoT) [3]. Essa ideia, apesar de existir há pelo menos 15 anos, tem sido explorada com afinco nos últimos anos, uma vez que permite uma maior conexão entre pessoas e coisas, facilitando monitoramento de ambientes, bem como, seu controle. Os cenários de aplicação compreendem desde os mais remotos lugares, a casas e fábricas em grandes

idades (*Smart Cities*) [3]. Muito além de conectar coisas a Internet, aplicações IoT podem atuar em diversos domínios, podendo ter notável papel na melhora da qualidade de vida e de serviços. Por exemplo, o transporte (*Smart Logistics*) [4], os equipamentos médicos (*Smart Health*) [5], a automação industrial (*Smart Factory*) [6], os dispositivos de detecção de desastres naturais (*Disaster Management*) [7], são alguns entres tantos outros exemplos, onde há a necessidade constante de supervisão ou, onde, a tomada de decisão humana pode ser difícil, e sistemas IoT podem ser aplicados.

A ideia IoT é permitir que objetos vejam, ouçam, pensem e realizem trabalhos a partir da comunicação entre eles, de forma a compartilhar informações. Ou seja, transforma objetos ordinários nos chamados objetos inteligentes; e para isso usa sistemas embarcados, computação pervasiva, tecnologias de comunicação, rede de sensores, protocolos e aplicações da internet, entre outros [3].

As aplicações IoT, em geral, usam diversos dispositivos: sensores, atuadores, repetidores, *gateways*, entre outros, por isso são projetados para serem de baixo custo, isso em detrimento do desempenho. Assim, esses dispositivos são, também, conhecidos por seu baixo poder computacional. Projetados para ter baixo consumo energético, são pensados para serem adequados a qualquer tipo de ambiente, tendo ou não ponto de energia elétrica disponível [3]. Assim, mesmo que alimentados por bateria permanecem funcionando por longos períodos. Essas características, então, os distinguem do seus pares tradicionais que apesar de alcançarem grandes taxas, tem alto consumo de energia.

Portanto, esses dispositivos IoT podem ser usados como uma forma de solucionar o problema do monitoramento em floresta. Uma vez que este monitoramento requer um grande número de dispositivos tendo em vista que grandes áreas precisam ser cobertas, e por não haver nenhuma outra forma de alimentação a não ser a feita por baterias.

1.2 Coleta de Dados em Floresta

Tradicionalmente, o monitoramento de animais silvestres é realizado através de câmeras que são instaladas no interior das florestas, em lugares previamente definidos, a fim de registrar a presença deste animais através de fotos ou vídeos [1]. Para tanto, estas câmeras, comumente denominadas câmera armadilha, são dotadas de um sensor de presença que dispara a câmera assim que detecta a presença de algo. Apesar de amplamente utilizado, este procedimento de monitoramento implica um elevado custo operacional de instalação das câmeras e sobretudo de coleta dos dados. Em geral, as áreas de monitoramento se localizam em unidades de conservação, em regiões extensas e de difícil acesso. Usualmente, a coleta de dados é realizada de

forma puramente manual que exige a presença de pessoas para recuperar cada uma das câmeras e retirar os dados. Além de representar um custo bastante elevado, este método não é nada eficiente, visto que não leva em conta por exemplo, se a câmera que será visitada tirou alguma foto, se ela apresentou algum defeito, ou mesmo se ainda estava com bateria. Por fim, dependendo do tamanho do parque e da área monitorada, este procedimento pode levar muitos dias. Daí a importância de se estudar e elaborar um sistema automatizado de coleta de dados para o monitoramento de animais silvestres em unidades de conservação.

A ideia consiste em aplicar o conceito de IoT, ou seja, dotar as câmeras com a capacidade de comunicação com dispositivos de baixo custo, de modo a permitir o envio das fotos para um *drone* que sobrevoará a floresta coletando as fotos de cada uma das câmeras. No entanto, tradicionalmente, as aplicações de IoT assumem que os dispositivos de captura de dados coletam pequenas quantidades de informação, como por exemplo, temperatura, pressão, umidade, posição e assim por diante, devido a sua baixa capacidade computacional. Assim, estes dispositivos não precisam ter uma alta capacidade de transmissão. Esta premissa vai ao encontro da limitação de consumo de energia destes dispositivos. Para comprovar este fato, muitas das propostas mais recentes para IoT, como LoRa [8] e SigFox [9], prevêem a duração da bateria da ordem de anos, com uma taxa de transmissão bastante reduzida. Claramente, este tipo de tecnologia de comunicação não é adequada para aplicações de grande quantidade de dados em florestas. E assim, é importante discutir qual tecnologia é a melhor, levando em conta, também, o custo dos componentes.

A ideia de utilizar *drones* para coleta de dados em uma rede de sensores, ou ainda para monitoramento florestal não é nova [2, 10–13]. A novidade está justamente na quantidade de dados coletados por dispositivo de baixo poder computacional associado ao ambiente de floresta tropical. Por este motivo, existem dois desafios principais para a coleta das fotos de animais silvestres. O primeiro é a transmissão de uma quantidade significativa de dados, com restrição de consumo de energia. A segunda é a transmissão de dados em um ambiente de floresta densa onde o desempenho de redes sem fio pode ficar prejudicado. Portanto, o objetivo principal deste trabalho é caracterizar a transmissão de dados de dispositivos IEEE 802.11, de baixo custo, poder computacional e consumo de energia, em ambientes de florestas tropicais. O padrão IEEE 802.11 foi escolhido justamente por proporcionar uma maior taxa de transmissão com módulos de baixo custo e consumo energético. Assim, o módulo 802.11 é avaliado na transmissão de dados do interior da floresta para um *drone* situado acima da copa das árvores. Além disso, para efeitos de comparação e melhor caracterização, também é avaliado o desempenho do módulo de baixo custo em cenários internos (*indoor*), externos (*outdoor*) e dentro da floresta. Os cenários internos correspondem: a um longo corredor coberto com visada direta

ininterrupta e outro entre duas salas de aula para simular transmissões com barreira. O externo corresponde a ampla área aberta sem barreiras, sendo este uma rua com pouco movimento na cidade de Petrópolis-RJ. Já o de floresta, corresponde a um cenário com densa vegetação, situado no Parque Nacional da Tijuca-RJ, onde foram realizados testes de transmissão tanto entre as árvores, como de dentro da floresta para dispositivo sobre a copa das florestas. Dessa forma, é possível averiguar como o módulo se comporta em cada cenário e qual a real influência da vegetação local na transmissão. Por fim, foi avaliado o consumo de energia. Uma vez que uma solução para coleta de dados em floresta não deve representar um fator limitante em termos de consumo de energia, o que geraria visitas mais frequentes para a troca das baterias.

Alguns trabalhos já avaliaram a transmissão do padrão IEEE 802.11 em florestas, mas não com dispositivos de baixo poder computacional, e a maioria em outros tipos de florestas, que possuem características distintas. Portanto, não foi encontrado na literatura uma avaliação da comunicação entre um dispositivo IEEE 802.11 para aplicações de IoT e um *drone*, através da copa das árvores de uma floresta tropical.

Nos experimentos foram medidas as principais métricas de redes, tais como: taxa de transmissão, alcance máximo e taxa de perda de pacotes. Com os resultados obtidos, além de caracterizar o desempenho da rede entre o *drone* e a câmera [14], foi possível averiguar a viabilidade desta solução, com fotos de 1 MB sendo transmitidas em aproximadamente 25 segundos, tendo em vista o tempo de autonomia de 15 minutos do drone, ou seja, é possível coletar imagens com equipamentos de baixo poder computacional. Quanto ao consumo de energia, foi analisado o consumo médio dos módulos. Com isso foi possível estimar o tempo de funcionamento da bateria sem novas recargas. Este resultado mostrou que o módulo WiFi funcionaria por período superior ao das câmeras, usando métodos de contenção de energia.

1.3 Organização do Trabalho

O trabalho está organizado da seguinte forma. No capítulo 2, são apresentados os principais trabalhos relacionados à avaliação do desempenho do IEEE 802.11, em diversos cenários e outras tecnologias, com ênfase em análises em florestas. E, ainda, trabalhos que usam *drones* para coleta de dados e dispositivos IoT para fins de monitoramento. No Capítulo 3 a ideia principal do sistema de coleta de dados de animais silvestres é apresentada brevemente. É, também, discutida a relevância desse tipo de sistema. O funcionamento básico é apresentado nesse capítulo. O Capítulo 4 discorre sobre as diferentes tecnologias de Internet das Coisas popularmente mais conhecidas que são usadas para comunicação. Comparando-as de forma a justificar a escolha do padrão IEEE 802.11 para este trabalho. O método proposto

é descrito no Capítulo 5, detalhando os experimentos para a avaliação de desempenho do IEEE 802.11. Nele são descritos: os cenários (internos, externos e o de floresta), os tamanhos de pacotes usados e os equipamentos usados com suas respectivas configurações. Os procedimentos para averiguar o consumo energético do módulo WiFi ESP-12F são apresentados nesse capítulo. Os resultados são apresentados e analisados no Capítulo 6. Este capítulo foi dividido em duas grandes seções: avaliação do desempenho da rede e consumo energético. No primeiro, aborda-se o alcance máximo, o desempenho da transmissão (vazão e perdas de pacotes) e o tempo para transmissão de imagens. Já no segundo, o consumo médio e o tempo de duração da bateria é discutido. Por fim, o Capítulo 7 conclui o trabalho, ressaltando os principais resultados, mostrando a viabilidade de coletar dados em floresta usando equipamentos puramente de Internet das Coisas associados a veículo aéreo não-tripulado. Os trabalhos futuros, também, são apresentados nesse capítulo.

Capítulo 2

Trabalhos Relacionados

Exaustivos estudos sobre redes sem fio podem ser encontrados na literatura, sejam eles em cenários comuns, como o urbano, ou ainda, inóspitos como os de florestas. Geralmente esses testes visam avaliar o efeito do ambiente no desempenho deste tipo de rede. Alguns destes estudos não se atêm apenas à avaliação da relação ambiente *versus* rede, mas há, também, os que avaliam as tecnologias e suas mais diversas aplicações como, por exemplo, os que avaliam aplicações de monitoramento usando dispositivos IoT, ou seja, de baixo poder computacional. Portanto, a seguir são apresentados os principais trabalhos relacionados à avaliação de desempenho de redes sem fio, a análise de redes sem fio em ambiente de florestas e a sistemas de de monitoramento baseados no paradigma de Internet das Coisas.

2.1 Avaliação de desempenho de redes sem fio

Vários trabalhos propõem a avaliação de redes sem fio, usando as mais diversas tecnologias e nos mais diversos cenários. Petäjäjärvi *et al.* [15] avaliaram o desempenho de uma rede de longo alcance e baixa potência (*Low-Power Wide-Area Network* - LPWAN) , apontando que, em geral, os desafios de uma rede desse tipo são: desenvolver dispositivos baratos com longa duração de bateria e com um alcance maior que 10 km. Seus testes foram realizados em uma cidade, e também, partes dos testes transcorreram com um nó posicionado em um barco. Os autores avaliaram distâncias de 0 a 30 km da estação base, alcançando pontos até mesmo dentro do mar. A taxa de transmissão utilizada foi de 293 bps, característica deste tipo de rede. Os autores avaliaram a taxa de perda de pacotes, constatando que os testes na cidade apresentaram mais perdas, concluindo que a razão para este resultado é devido a interferência de outras redes e prédios da cidade.

Kriara *et al.* [16] realizaram testes de uma rede IEEE 802.11ac em ambiente interno, a saber em um prédio de escritórios, modificando e combinando as mais diversas possíveis configurações do padrão 802.11ac. Além disso, os autores compararam

este padrão com os padrões 802.11n e 802.11a avaliando a justiça na transmissão quando esta ocorria simultaneamente nos diferentes padrões. Observou-se que canais maiores resultam em sistemas mais justos em relação a taxa de transmissão. Uma surpresa para foi que o 802.11n e 802.11ac se mostraram igualmente justos com o crescimento da largura do canal. Os testes foram analisados a partir da camada de aplicação e o protocolo de transporte utilizado foi o UDP. Já [17], avaliou a capacidade do enlace de uma rede IEEE 802.11b/g construída em um campo de futebol americano universitário, ou seja, em um cenário parcialmente híbrido, com grandes áreas fechadas e abertas na arena. Tendo em vista a grande demanda da rede em dias de jogo, os autores concluíram que a rede foi capaz de suportar a conexão de vários dispositivos, mesmo que com ônus na vazão da rede.

Todos esses trabalhos mostram como diferentes tecnologias se comportam em diferentes cenários, detalhando como estes os cenários podem influenciar no alcance máximo, na taxas de perdas e em outras métricas que reunidas caracterizam o desempenho geral da rede. Entretanto, diferentemente do presente trabalho, estes trabalhos avaliaram apenas um tipo específico de cenário sem comparar com outros. Além disso, o trabalho [15] utiliza outra tecnologia de rede. Apesar dos autores avaliarem o 802.11, eles não consideram dispositivos de IoT além de utilizarem uma outra versão do padrão.

2.2 Análise de Redes sem fio em Ambiente Florestal

Há ainda propostas de avaliações, que como nesse trabalho, focam o ambiente florestal. No trabalho [18], os autores investigam o efeito da vegetação sobre uma rede IEEE 802.11n a 5.18 GHz em uma floresta tropical na Malásia. Para isso, usaram antenas direcionais com ganho de 19 dBi e 3 dispositivos foram dispostos na floresta à 40, 108 e 174 metros de distância do ponto de acesso. As métricas observadas foram vazão de dados, *jitter*, taxa de perda de pacotes e RSSI. O objetivo desse estudo era avaliar a viabilidade de construir uma rede para levar o acesso à Internet a áreas rurais da região. Nos testes, os autores usaram um *socket* UDP transmitindo pacotes de 1470 bytes. Os resultados alcançados variaram de picos de 300 Mbps a 30 Mbps, referentes ao ponto mais próximo e ao ponto mais distante, respectivamente. O ponto mais distante contava com barreiras da vegetação. Portanto, os autores concluíram que a vegetação influenciou no baixo desempenho da rede. Entretanto, os autores não avaliaram o desempenho da rede em outros ambientes, para investigar os reais efeitos da vegetação.

Já em [19], os autores avaliaram o desempenho de uma rede IEEE 802.11a/b/g

entre sensores, para fins de monitoramento de morcegos. Houve a preocupação de se avaliar em diversos cenários de floresta, a saber, com pouca, nenhuma e densa vegetação. Nesse artigo, a distância de 90 metros apresentou 100% de perdas de pacotes devido à impenetrabilidade da vegetação, entretanto, em áreas mais espaçadas de floresta a perda foi de apenas 10%. Os autores concluíram que a vegetação tem um efeito muito maior no desempenho da rede do que a distância. Em relação aos diferentes padrões usados o de pior desempenho foi 802.11a, segundo os autores, devido ao enfraquecimento do sinal e a variação dele em decorrência dos obstáculos. Já os padrões 802.11b/g se saíram melhor, porém apresentaram pouca diferença entre si, e assim a diferença entre seus desempenhos foi desconsiderada.

Wang *et al.* [20] avaliaram o desempenho de uma rede *mesh* que envia dados a um *campus* universitário, esses dados correspondem a informações coletadas por sensores que monitoram uma bacia hidrográfica na floresta. Os pontos mais extremos dessa rede distam aproximadamente 8 km e as tecnologias usadas foram IEEE 802.11a/b/g e IEEE 802.15.4. A rede é dividida em rede de trânsito, que leva os dados até o *campus*, - e rede de sensores na floresta. Foram usadas antenas de 22,5 dBi para conectar o trajeto mais longo da rede que corresponde a 6,7 km e antenas *omni*-direcionais para conectar o restante da rede, aproximadamente 1,6 km. Não havia obstáculos na comunicação no maior trajeto. Os autores variaram o ângulo de posicionamento das antenas e observaram as métricas taxa de transmissão e força do sinal. Como esperado, os autores observaram que a força no sinal diminuía consistentemente com a distância, porém os autores consideraram que novos estudos devem ser realizados para entender os efeitos que a obstrução das árvores causa no desempenho da rede.

Ding *et al.* [21] avaliaram uma rede IEEE 802.15.4 em três tipos diferentes de florestas, que se diferenciavam entre si com relação à densidade e à distribuição da vegetação, e à mudança de terreno. Sem interferência de outras redes, eles avaliaram a taxa de pacotes recebidos, o RSSI e o indicador de qualidade do enlace. Assim, os autores mostraram o efeito deste ambiente na qualidade dos enlaces e concluíram que tecnologias de baixa potência são facilmente afetadas pela complexidade do ambiente florestal e, por isso, é difícil prever o comportamento dos enlaces.

Apesar de considerarem ambientes de floresta, os trabalhos [19–21] avaliaram florestas diferentes das tropicais, e assim não contemplaram fatores típicos dessas florestas como alta umidade. As tecnologias estudadas nestes trabalhos foram diferentes das estudadas nesta dissertação; e apenas [20, 21] consideraram pelo menos alguma parte da rede com dispositivos de Internet das Coisas, ressaltando que nenhum deles considerou dispositivos IEEE 802.11 para IoT.

2.3 Monitoramento com Internet das Coisas

No âmbito de monitoramento usando dispositivos de Internet das Coisas, como neste trabalho, os autores em [22] propuseram uma aplicação de monitoramento de baixo custo que usa *RaspberryPi* como concentrador de dados dos nós sensores. A proposta, então, consiste em transformar o *RaspberryPi* em um *gateway* versátil, para agregar os dados de monitoramento e transmitir para, por exemplo, um sistema em nuvem. Os autores acreditam que esse *gateway* pode ser usado nas mais diversas aplicações de monitoramento de ambientes com redes de sensores. Em seu sistema os autores usaram comunicação baseada no padrão IEEE 802.15.4. Em outro sistema, proposto em [23], também é utilizado um *RaspberryPi* para monitoramento, porém ele é associado a uma câmera que transmite em tempo real as imagens do sistema de vigilância para a Internet. Entretanto, ambos os trabalhos consideram o uso desses equipamentos em ambientes diferentes da floresta, e, ainda, com esses dispositivos sendo alimentados por pontos de energia elétrica e não por bateria, como neste trabalho.

Outro trabalho interessante é a aplicação proposta em [24], onde é possível ver o uso de veículos não-tripulados para o auxílio no monitoramento e predição de dados para cultivo e criação de gado em fazendas. Porém, esta aplicação considera pequenas quantidades de dados coletados pelos sensores. Além disso, o *drone* não é utilizado para coletar os dados dos sensores, mas sim para filmar a fazenda. A coleta de dados é realizada por estações base, proposta no trabalho. Portanto, não há comunicação entre o *drone* e os dispositivos 802.11 de IoT, instalados na floresta, como é nesta dissertação.

Não obstante os trabalhos citados acima, se desconhece o uso de *drones* para coleta de grande volume de dados de monitoramento em floresta utilizando dispositivos IoT - de baixo custo e baixo consumo de energia, e assim com severas limitações de processamento e capacidade de transmissão. Em consequência, nenhuma avaliação e caracterização como apresentada neste trabalho foi encontrada na literatura. Desta maneira, os resultados deste trabalho são fundamentais para caracterizar a comunicação neste tipo de cenário.

Capítulo 3

IoTWild: Solução IoT para Coleta de dados em Floresta

A pesquisa de animais silvestres é um tema bastante importante na área de ecologia, não somente para conhecer e entender o comportamento destes animais, mas sobretudo para preservar a sua existência. Dentro deste contexto, o monitoramento da vida silvestre nestes ambientes é fundamental para viabilizar o estudo e acompanhamento da vida destes animais. Diversos trabalhos e projetos utilizam informações para registrar a ocorrência de espécies, fazer estimativas de tamanhos populacionais ou mesmo acompanhar indivíduos específicos de espécies prioritárias, gerando conhecimento sobre hábitos, horários de atividade, áreas de vida e outros que subsidiam decisões sobre o manejo e a conservação das espécies [1].

Esse monitoramento tem sido alvo não só de biólogos, mas de diversas associações e países. Assim, o uso de câmeras para esse objetivo tem ganhado grande espaço, isso devido ao barateamento dos equipamentos e, bem como, a melhorias nas tecnologias de coleta e processamento de imagens. Esse monitoramento permite que novas espécies sejam descobertas, e as já conhecidas possam ser preservadas. E, ainda, pode ajudar estudiosos a entender o comportamento da vida selvagem na região monitorada [1].

Basicamente, esse tipo de monitoramento se dá por meio da instalação de *cameras trap* (câmeras armadilha) espalhadas pela área monitorada, como explicado anteriormente, que uma vez detectado algum movimento pelo seu sensor de presença, registra o ambiente, capturando assim uma imagem do causador do disparo. Estas fotos podem ter de 500 kB até 1 MB. Estas câmeras, em geral, são instaladas em ambientes de floresta, parques florestais, unidades de conservação, entre outros.

O principal problema é que a instalação, manutenção e especialmente a coleta de dados demandam elevado custo. Enquanto, os custos associados à instalação e à manutenção são geralmente fixos, e dificilmente contornáveis, o valor destinado a coleta de dados pode ser reduzido com o um sistema automatizado que facilite a

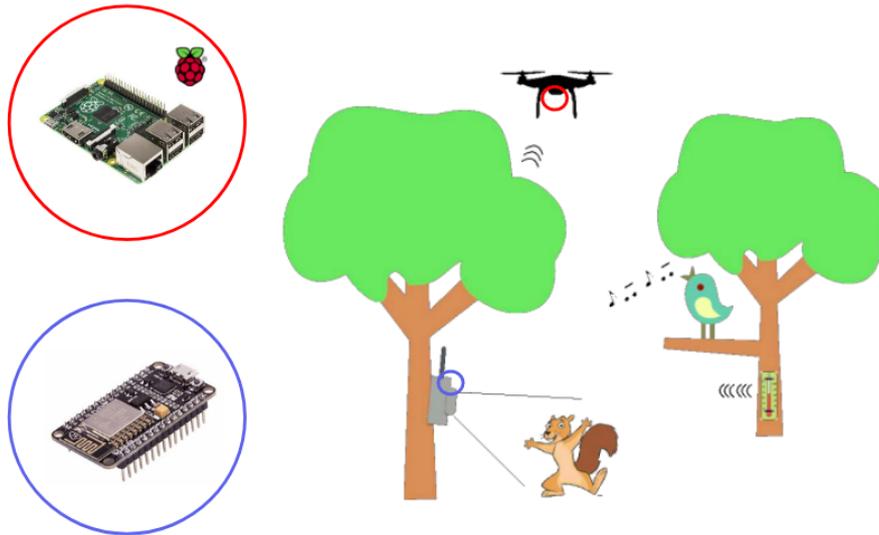


Figura 3.1: Cenário base da aplicação IoTWild

coleta. Atualmente, a coleta das imagens das câmeras é puramente manual, exigindo que pessoas se desloquem com frequência para o local de fixação, usualmente em locais de difícil acesso. Além de custoso, esse método não é eficiente, pois demanda muito tempo e, ainda, não é possível garantir que a câmera tenha feito qualquer registro.

Assim, com foco em suprir esta demanda, o projeto IoTWild¹ visa contribuir com a criação de uma aplicação experimental para automatizar o trabalho de coleta de dados de monitoramento de vida selvagem em floresta com o auxílio de veículos aéreos não-tripulados. O intuito é onerar o mínimo possível o sistema de monitoramento já existente, tanto em termos financeiros quanto em relação ao consumo de energia. Por isso, são escolhidos equipamentos de baixo custo, no vasto universo de dispositivos de Internet das Coisas, para extraírem as imagens da câmera e as enviarem, por meio de uma rede sem fio, para outro dispositivo acoplado a um *drone*, como ilustrado na Figura 3.1.

De maneira geral, a aplicação funcionará da seguinte forma: o *drone* sobrevoará próximo a copa das árvores, até que algum dispositivo o identifique e se conecte a sua rede trocando as informações de suas credenciais. Uma vez que o veículo aéreo não-tripulado identifique uma nova conexão, ele se estabilizará no ar e começará a receber os dados. Assim, o *drone* permanecerá parado até que: o dispositivo na câmera informe que não há mais dados a serem enviados ou que sua bateria sinalize baixa carga, o que ocorrer primeiro. Para que esta aplicação funcione, possíveis limitações devem ser estudadas e superadas, a saber:

- o consumo energético do dispositivo instalado para processar e enviar as imagens, de maneira que esse não eleve o número necessário de visitas de manu-

¹www.gta.ufrj.br/~velloso/projects/iot-wild/

tenção para troca de baterias;

- a autonomia da bateria do *drone*, que em dispositivos profissionais é de aproximadamente 15 a 20 minutos de voo, de forma que se envie o máximo número de imagens possível, evitando recargas e reenvios do *drone*;
- eficiência da rede sem fio em um ambiente florestal, sendo esta construída com dispositivos de baixo consumo de energia e, por conseguinte, baixa capacidade de processamento e taxa de transmissão. Visando a melhor relação custo-benefício para instalação em larga escala.

Neste trabalho são avaliados desses itens: o primeiro, são realizadas medições para averiguar o consumo do módulo sem fio a ser acoplado nas câmeras; e o último item, analisando assim, o desempenho de uma rede sem fio entre um dispositivo na floresta e outro acima das árvores. Conhecendo a capacidade desta rede, é possível estimar se o tempo de voo do *drone* será suficiente para a aplicação ser minimamente eficiente. Além disso, a caracterização da rede pode permitir a proposição de novos mecanismos e protocolos para aumentar a eficiência da transmissão. E, ainda, conhecendo o consumo do módulo, poderá se estimar o número de visitas necessárias para manutenção (troca de baterias). Dessa forma é possível saber se o número de visitas atuais serão reduzidas ou não, de maneira geral.

Capítulo 4

Tecnologias de Comunicação para Internet das Coisas

A Internet das Coisas não só trouxe uma gama de novas possibilidades e oportunidades nas mais diversas áreas tecnológicas, mas, também, diversos novos desafios. Entre os desafios se destacam aqueles que envolvem a comunicação entre os dispositivos e entre a rede em que se conectam, confiabilidade na entrega das mensagens e segurança das informações. Além desses, há que se ter em mente que devido à grande diversidade de dispositivos e aplicações as condições nem sempre serão as ideais e muitos desses dispositivos podem ter baixa (ou baixíssima) capacidade de processamento e trabalhar com baixa potência.

Essas características da Internet das Coisas motivou uma série de estudos e por conseguinte a criação de grupos de estudos, como foi o caso do grupo 6LoWPAN (*IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Networks*), que foi criado com a visão de que protocolos da Internet poderiam e deveriam ser aplicados até mesmo aos menores dispositivos, e que dispositivos de baixa potência e com limitada capacidade de processamento deveriam também ser capazes de participar do "mundo" da Internet das Coisas [25]. Esses novos estudos, também, inserem, no contexto de Internet das Coisas, tecnologias já consagradas como é o caso do 802.11n, por exemplo.

Entre as diversas tecnologias hoje sendo usadas para dispositivos de Internet das Coisas pode-se citar, por exemplo, o padrão 802.11n, o Bluetooth, 802.11ah, LoRa, ZigBee, entre outras. Tendo em vista as características da solução apresentadas no Capítulo 3, é importante identificar qual tecnologia mais se adéqua a solução, ou seja, aquela que apresenta o melhor desempenho e custo. Devido ao ambiente do projeto, a ideia é enviar a maior quantidade de dados em pouco tempo, levando em consideração o consumo de energia.

4.1 As Principais Tecnologias

A seguir são descritas brevemente as tecnologias mencionadas de forma a justificar a escolha pelo padrão IEEE 802.11 para a comunicação entre o *drone* e as câmeras na floresta. Estas descrições não buscam exaurir cada um dos tópicos, mas apresentar um breve histórico e principais características.

4.1.1 802.11n

Depois que os padrões WiFi, incluindo 802.11a, 802.11b e 802.11g foram estabelecidos, começou-se a estudar como as velocidades de dados brutos fornecidas por redes WiFi 802.11 poderiam ser aumentadas ainda mais. O resultado foi que em janeiro de 2004, o IEEE anunciou que havia formado um novo comitê para desenvolver o novo padrão IEEE 802.11n de alta velocidade. Sendo este publicado formalmente em 2009 [26].

A ideia por trás do padrão IEEE 802.11n era que ele seria capaz de fornecer um desempenho muito melhor e, também, acompanhar as velocidades crescentes fornecidas por tecnologias como a *Ethernet*. O novo padrão 802.11n possui um desempenho consideravelmente superior aos padrões 802.11 que o precederam, cujos pontos principais são: taxa máxima de dados de 600 Mbps, frequências 2,4 ou 5 GHz, largura do canal (20 ou 40 MHz), alcance de até 250 m em áreas abertas [26]. Entretanto, por nele ter sido introduzido o MIMO houve um aumento na potência do circuito, e assim grande aumento do consumo de energia. Porém, os dados são normalmente transmitidos de forma "intermitente". Isso significa que há longos períodos em que o sistema permanece inativo ou em execução em uma velocidade muito lenta. Durante esses períodos, quando o MIMO não é necessário, o circuito pode ser mantido inativo para que não consuma energia [27]. Isto já sendo implementado no padrão.

4.1.2 Bluetooth

O Bluetooth SIG completou o Bluetooth Core Specification versão 4.0 (chamado Bluetooth Smart) e foi adotado em 30 de junho de 2010. Ele inclui os protocolos Bluetooth clássico, Bluetooth de alta velocidade e Bluetooth baixa energia (BLE). O Bluetooth de alta velocidade é baseado em Wi-Fi e o Bluetooth clássico consiste em protocolos herdados de versões Bluetooth anteriores [28]. Em comparação com o Bluetooth clássico, o BLE destina-se a fornecer um consumo de energia e custos consideravelmente reduzidos, mantendo um intervalo de comunicação semelhante. Em termos de prolongamento da vida útil da bateria de dispositivos Bluetooth, o BLE representa uma progressão significativa. Visando até mesmo aplicações alimentadas por baterias-botão [29].

No Bluetooth 4 o alcance é de aproximadamente 100 m *outdoor*. Entretanto, esse alcance é obtido em detrimento do consumo de energia, este sendo elevado conforme a distância aumenta. A taxa de transmissão nominal do Bluetooth 4 é de 1 Mbps e frequência 2,4 GHz [29]. Em sua versão 4.2, lançada no final de 2014, foi introduzido novos recursos voltados para Internet das Coisas, tais como: conexão segura de baixa energia com extensão de comprimento de pacote de dados, privacidade na camada de enlace com políticas estendidas de filtro de escaneamento e IPSP versão 6 para *BluetoothSmart* [30].

4.1.3 802.11ah

Para aumentar o alcance relativamente curto do WiFi, especificamente para sensores de IoT que não exigem altas taxas de dados, o 802.11ah, conhecido como HaLow, foi introduzido pela WiFi Alliance. O HaLow trabalha com a frequência de 900 Mhz, destinado à transmissão de dados de longo alcance. O espectro de 902 a 928 MHz oferece 26 MHz de largura de banda dividida em canais de 1, 2, 4, 6 ou 16 MHz. Assim, alcança taxas de transmissão de 100 kbps em um canal de 1 MHz e até 360 Mbps em um canal de 16 MHz. O alcance do 802.11ah é em média de 1 km [31].

O HaLow também aborda teoricamente o baixo consumo de energia. Por exemplo, o HaLow usa o tempo de despertar desejado programável para reduzir a quantidade de energia que um dispositivo precisa para permanecer conectado à rede. Isso ocorre quando os dispositivos são ativados por curtos períodos de tempo em intervalos definidos - por milissegundos a cada 15 segundos - para aceitar mensagens [31]. Entretanto, apesar de ter sido lançado em 2016, ele ainda não é comercializado. O que dificulta o acesso a esta tecnologia, e por conseguinte, maiores estudos.

4.1.4 LoRa

O LoRa, do inglês *Long Range* (longa distância), é uma das principais tecnologias usadas em redes LPWAN, caracterizadas pelo baixo consumo e longa distância. Os nós podem ajustar a potência de saída e a taxa de transmissão e é assim que obtêm melhor alcance e economia de energia [32]. O LoRa opera nas frequências de 433, 868, e 900 MHz, a taxa de transmissão varia de 0,3 à 50 kbps e o alcance de 2 à 5 km em regiões urbanas e até 15 km em áreas mais isoladas [33].

O protocolo da camada física LoRa é fechado e proprietário. Já o LoRaWAN é um protocolo de camada de controle de acesso ao meio (MAC) para gerenciar a comunicação entre os *gateways* LPWAN e dispositivos de nó final, mantido pela LoRa Alliance [34]. Estima-se que quando alimentado por bateria, um nó pode permanecer transmitindo por 10 anos sem recargas [33].

4.1.5 ZigBee

O Zigbee é um padrão de rede de malha sem fio de baixo custo e baixo consumo voltado para dispositivos alimentados por bateria em aplicações de controle e monitoramento sem fio. O Zigbee fornece comunicação de baixa latência. Os *chips* Zigbee são tipicamente integrados com rádios e com microcontroladores [35]. Idealizado em 1998, padronizado em 2003 e revisado em 2006, é baseado no padrão IEEE 802.15.4 [36].

O Zigbee tem uma taxa definida de 250 kbps, mais adequada para transmissões de dados intermitentes de um sensor ou dispositivo de entrada, podendo ainda trabalhar com taxas inferiores. Possui alcance de até 200 m, porém em média alcança 100 m, geralmente usado em redes PAN - rede de área pessoal). Pode operar nas faixas de 868 MHz, 902 MHz e 2,4 GHz. Entretanto a mais praticada é a faixa de 2,4 GHz [36]. Similar ao LoRa, nós alimentados por bateria tem autonomia aproximada de até 10 anos [35].

A seguir, na Tabela 4.1, é apresentada um resumo comparativo com as principais características de cada tecnologia discutida.

Métricas	802.11n	Bluetooth	802.11ah	LoRa	ZigBee
Frequência	2,4/5 GHz	2,4 GHz	900 MHz	915 MHz	2,4 GHz
Alcance (externo)	250 m	10 m	1 Km	15 Km	200 m
Taxa de Transmissão	600 Mbps	1 Mpbs	100 kbps	0,3-50 kbps	250 kbps
Consumo	alto	baixo	baixo	baixo	baixo

Tabela 4.1: Comparação entre as tecnologias mais populares usadas em Internet das Coisas

Uma aplicação em floresta para coleta de grandes dados com *drones* demanda tecnologias que trabalhem com altas taxas de transmissão o que inviabilizaria o uso de LoRa e ZigBee. Pois além de serem destinados a aplicações que transmitam pequenas quantidades de dados, tem alta latência, ou seja, os dados poderão demorar muito tempo para serem recebidos pelo *drone*; o que é impraticável tendo em vista o tempo médio de voo de uma dessas aeronaves.

O 802.11ah ainda carece de muitos estudos, e por não haver módulos comerciais disponíveis torna-se difícil seu uso em aplicações. Na prática, similar ao LoRa, tem foco em atingir grandes distâncias e não na transmissão de grande volume de dados, pelo contrário, visando o mercado de IoT, ele foi criado como um versão do 802.11 que permitisse envio de pequenos dados de monitoramento a longas distâncias [31].

O Bluetooth 4 apesar de alcançar vazão superior ao LoRa, 802.11ah e ZigBee, tem alcance muito limitado em geral de 10 m. A copa das árvores tem altura média de 30 m podendo alcançar valores de até 50 m, por exemplo em florestas

tropicais como a Floresta da Tijuca, e a aeronave não poderia sobrevoar por alturas inferiores as da copa devido ao risco de colisão. E, para alcançar maiores distâncias, o Bluetooth precisa aumentar consideravelmente a potência e assim aumenta o seu consumo; soluções em floresta, geralmente, não contam com ponto de alimentação de energia elétrica, por isso usam baterias, o que requer sempre o menor consumo possível.

Por fim, o 802.11n conta com elevada taxa de transmissão o que fica ainda mais claro quando ilustrado em comparação com as outras tecnologias, como mostra a Figura 4.1. Apesar de seu alto consumo energético ser um obstáculo, muitos dispositivos IoT para redes 802.11 já contam com modos de operação que minimizam esse consumo, que é o caso, por exemplo, da linha de módulos WiFi ESP 8266.

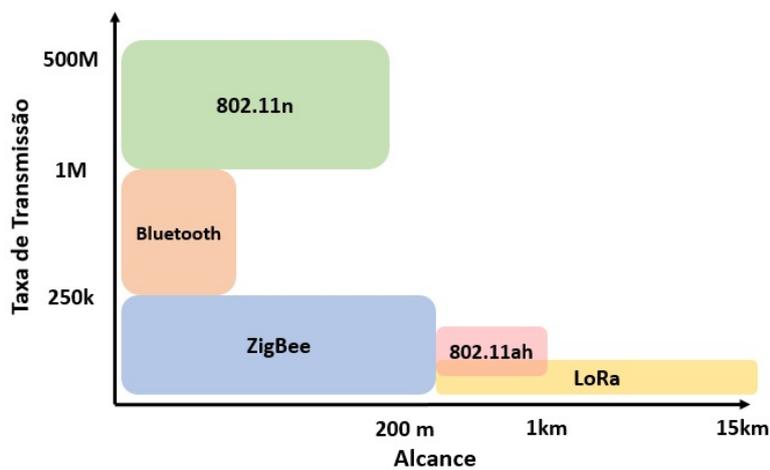


Figura 4.1: 802.11 se destaca em termos de taxa de transmissão

Assim, por mais que consumo energético e alcance sejam fatores importantes para aplicações em floresta, e para essas tecnologias como LoRa, ZigBee e 802.11ah apresentarem boas soluções; para coleta de grande quantidades de dados a vazão é ainda um fator essencial. Por isso, o padrão IEEE 802.11n foi o escolhido para essa solução, ele ainda possui outras características favoráveis como alcance satisfatório, e, ainda, módulos de baixo custo voltados para Internet das Coisas.

Capítulo 5

Experimentos

Os experimentos se concentraram em duas grandes áreas, consumo de energia e avaliação do desempenho da rede. A seguir são descritos os métodos escolhidos para realização dos experimentos, bem como os cenários, equipamentos e configurações usados.

5.1 Avaliação de desempenho do IEEE 802.11

O padrão IEEE 802.11 foi escolhido por oferecer uma taxa superior às outras tecnologias para IoT, como discutido no Capítulo 4, e por, ainda, possuir - no universo de Internet das Coisas - dispositivos otimizados para ter baixo consumo de energia, como exigido pela aplicação em foco. Vale ressaltar que as fotos capturadas variam de 500 kB à 1 MB de tamanho. A Figura 5.1 ilustra um exemplo de uma dessas fotos.

Uma vez escolhidos os equipamentos, optou-se por realizar 5 tipos de testes divididos em 3 cenários distintos para fins de caracterização e compreensão do desempenho dos dispositivos. O objetivo é avaliar os efeitos factuais que o ambiente, sobretudo de floresta, tem sobre a rede IEEE 802.11 e, principalmente sobre esses equipamentos de baixo consumo e baixo poder computacional.

Nos experimentos foram observadas as métricas padrões de rede sem fio: taxa de transmissão, alcance máximo, taxa de perda de pacotes e RSSI - força do sinal recebido). Foram ainda enviados arquivos com tamanhos semelhantes aos das fotos capturadas, com o intuito de avaliar o tempo de transmissão desses arquivos. Observou-se, também, a influência do posicionamento do *drone* nos resultados.



Figura 5.1: Foto capturada na floresta com as câmeras de monitoramento, tamanho aproximado 600 kB

5.1.1 Cenário: Floresta

O cenário de floresta escolhido para a instalação do equipamento foi a floresta do Parque Nacional da Tijuca, que constitui a maior floresta urbana do mundo ¹, localizada no Rio de Janeiro, devido demanda local por um serviço que facilitasse a recuperação dos dados das câmeras que monitoram a sua fauna. O parque corresponde a uma área de 3.953 hectares que é coberta por floresta tropical. As regiões que compõem o Parque são ilustradas no mapa da Figura 5.2. O clima em tais florestas é o tropical, como o nome sugere, caracterizado por verões chuvosos e invernos secos. Em geral, a temperatura no parque varia de 18° C a 22° C e a umidade relativa fica entre 77% e 88%. Na floresta, há diversas espécies de árvores que formam uma cobertura densa e contínua de vegetação nessa área, algumas delas chegando a alcançar 50 m de altura [37].



Figura 5.2: Área que compõem o Parque Nacional da Tijuca

¹www.parquedatijuca.com.br

Na Figura 5.3, é possível ver parte da trilha que leva às câmeras de monitoramento; essa figura também deixa clara a densidade da vegetação local. Nesse espaço foram realizados tanto os testes de transmissão com o veículo aéreo não-tripulado sobre a copa das árvores, quanto um segundo teste com ambos dispositivos da rede dentro da floresta.

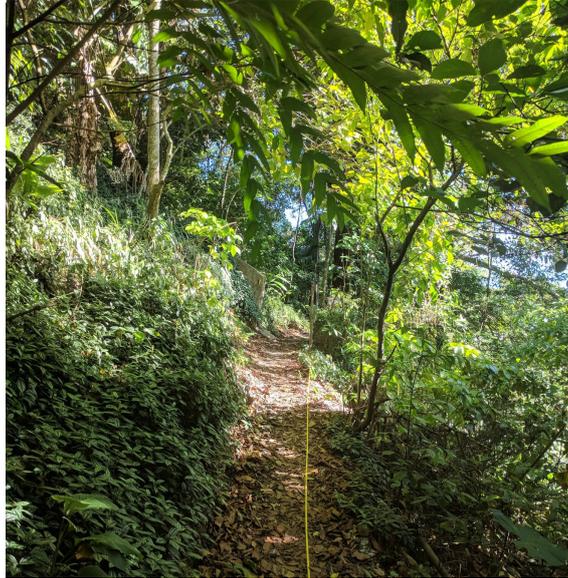


Figura 5.3: Trilha usada para os experimentos

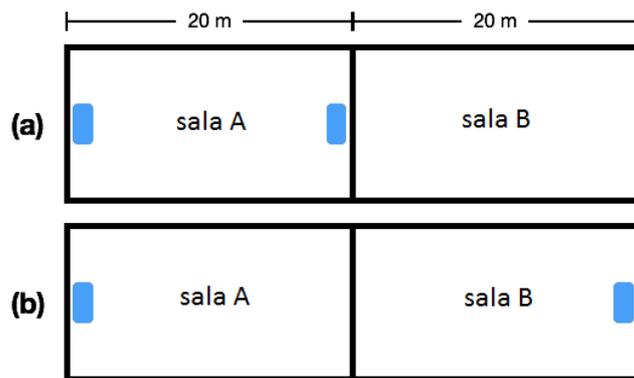
5.1.2 Cenários: externo e interno

Os testes internos foram realizados no *campus* da Universidade Federal do Rio de Janeiro, na Ilha do Fundão. O primeiro foi realizado em um corredor de 170 m de comprimento cercado por salas de aula e laboratórios, no terceiro andar do bloco de H do Centro de Tecnologia da Cidade Universitária. Na Figura 5.4(a) é possível ver o local desses experimentos. O teste todo transcorreu em visada direta, ou seja, sem nenhuma obstrução na linha de transmissão dos dois dispositivos. O segundo formato de teste foi realizado entre duas salas de aula, na instalações da Universidade Católica de Petrópolis, de 20 m de comprimento cada. Cada sala mobiliada com cadeiras, mesas e outros aparatos comuns a esse tipo de ambiente. Inicialmente, os dois dispositivos foram posicionados no mesmo ambiente, em seguida um dispositivo foi movido para a segunda sala, sendo colocado no ponto mais distante em relação ao outro dispositivo. Neste segundo teste, além das barreiras comuns da sala, havia uma parede entre os dispositivos, como ilustrado na Figura 5.4(b).

O cenário externo foi uma rua pouco movimentada na cidade de Petrópolis, Rio de Janeiro. Ampla e aberta, esta rua também sofre pouca ou nenhuma interferência de redes sem fio da vizinhança, uma vez que é afastada de moradias. Ela é localizada próximo ao Palácio Quitandinha.



(a) Corredor usado para testes internos sem barreira



(b) Ilustração das salas usadas nos testes internos com barreira



(c) Rua usada para os testes externos

Figura 5.4: Cenários dos Experimentos

Todos os experimentos foram realizados em horários estratégicos para evitar o trânsito de pessoas, e por conseguinte, esse tipo de interferência. A Tabela 5.1 resume os cenários dos experimentos.

Experimento	Descrição
1	Externo Aberto
2	Interno Corredor
3	Interno com Barreira
4	Externo dentro da Floresta
5	Dentro da Floresta com <i>Drone</i>

Tabela 5.1: Resumo dos Experimentos Realizados

5.1.3 Equipamentos e Configurações

A intenção do projeto é ser capaz de, aproveitando os equipamentos existentes de monitoramento local, coletar imagens das câmeras e enviá-las. Os três principais requisitos para a escolha do dispositivo de comunicação são: (i) alta taxa de transmissão; (ii) baixo consumo de energia e (iii) baixo custo. O baixo custo é importante, pois o Parque Nacional da Tijuca, por exemplo, conta com 50 câmeras armadilha espalhadas pela floresta, similares a da Figura 5.5²; usar dispositivos mais caros nessa situação agregaria elevado custo a verba destinada ao monitoramento do parque, pois teria que ser instalado um dispositivo por câmera.

Assim, foram escolhidos para os testes 3 versões do módulo *WiFi* ESP8266, devido ao seu custo-benefício, a saber: ESP-01, ESP-201 e ESP-12F. Os resultados apresentados nesse trabalho dizem respeito aos testes realizados com esse último módulo, em sua versão para desenvolvedores, pois apesar de terem arquiteturas muito semelhantes com antenas PCB *on-board* com ganho de 3 dBi, ele apresentou melhores resultados em relação as outras duas versões. Principalmente pelo fato de que nesta última versão problemas na arquitetura e implementação terem sido corrigidos.

O módulo de desenvolvimento ESP-12F NodeMCU, da marca DOIT, possui suporte aos padrões IEEE 802.11b/n/g e ainda com pilhas TCP/IP e UDP integradas. Tem processador de 32 bits e *clock* de até 160 MHz; 31 pinos, sendo 11 deles para propósitos gerais de entrada e saída de dados³. Diferente dos outros, esse módulo possui, ainda, um *chip* para realizar interface USB-serial e, ainda, regulador de tensão, facilitando sua programação e podendo ser alimentado por tensões entre 4,5

²<http://www.naturespy.org/camera-trap-services/camera-trap-hire-ecological-consultancies-surveys/>

³<http://wiki.ai-thinker.com/esp8266>



Figura 5.5: Câmera armadilha usada para monitoramento de animais

a 9 V. Ele suporta atualização remota do sistema. O módulo ESP-12F nos experimentos funcionou como cliente, se conectando e enviando os dados ao ponto de acesso.

Inicialmente, tanto para o ponto de acesso quanto para o cliente foram usados módulos ESP-12F, entretanto obteve-se baixíssimo desempenho, com vazão aproximada de 100 bps, e alta taxa de retransmissões. Dessa forma, optou-se por usar o microcomputador *Raspberry Pi 3* como ponto de acesso, devido a sua superior capacidade de processamento e armazenamento, uma vez que o projeto visa recolher imagens de diversas câmeras. O microcomputador *Raspberry Pi 3*, suporta o padrão IEEE 802.11n. Tem CPU 1.2 GHz 64-bit Quad-Core ARMv8 e é alimentado por fonte ou bateria 5 V-2 A⁴. Para os experimentos foi usado o sistema operacional *Raspbian Kernel 4.9* no *Raspberry Pi*. Este instalado em um cartão de memória de 16GB classe 4.

Os experimentos consistem em envios de 250 pacotes com tamanhos fixos usando os protocolos UDP e TCP do módulo ESP-12F para o *Raspberry*, por meio de *sockets*, por diversas vezes. A implementação dos protocolos TCP e UDP no módulo é limitada. Observou-se que usando o protocolo TCP só era possível enviar pacotes de tamanho máximo de aproximadamente 3000 bytes, caso fosse maior ocorria um reinício espontâneo do módulo sem fio. Semelhante limitação ocorria com o protocolo UDP, porém mais severa; pacotes maiores que 1500 bytes gravavam a mesma falha, não havia a possibilidade de fragmentação de pacote. Outra falha que causava o reinício espontâneo no módulo era, no caso do protocolo UDP, a necessidade de

⁴<https://www.raspberrypi.org/learning/hardware-guide/>

um intervalo de espera para processamento de cada pacote antes do envio do pacote seguinte. Isto significa que foi necessário acrescentar este intervalo mínimo entre a transmissão de pacotes consecutivos. Diversos tempos de espera foram testados, o menor tempo necessário encontrado foi de 10 ms por pacote; esse valor independe do tamanho do pacote. Acredita-se que essas limitações são decorrentes da baixa capacidade computacional do módulo e, também, possíveis problemas na implementação das *stacks* dos protocolos.

Em todos os testes, para evitar a influência do solo, o módulo sem fio foi posicionado a 1,30 m do chão [19]. Nos testes em terra o *Raspberry Pi* também foi posicionado a mesma distância do chão. Os tamanhos de pacote usados nos testes com o protocolo TCP foram: 128, 512, 1024, 1460, 2000 e 2920 bytes. Os mesmos tamanhos foram usados para os envios com o protocolo UDP, porém devido as limitações do módulo, não foram enviados pacotes com tamanhos 2000 e 2920 bytes.

Já nos testes com o *drone*, o *Raspberry Pi* era acoplado a ele juntamente com uma bateria para que sobrevoasse sobre as árvores e se conectasse com o módulo dentro da floresta. Como o veículo aéreo não-tripulado não faria voos em dias de chuva ou com forte vento, os testes foram realizados todos em condições parecidas, ou seja, em dias ensolarados e/ou sem fortes ventos e chuvas. No entanto, como boa parte do parque fica em uma montanha do Rio de Janeiro, à em média 1000 m de altitude, não foi possível evitar totalmente rajadas de ventos momentâneas, que deslocavam o *drone* da sua posição de coleta. Em uma segunda rodada de testes com o *drone* foram enviados arquivos simulando imagens, com os tamanhos médios das fotos produzidas por câmeras armadilhas. Dessa forma, usando o protocolo TCP, foram feitos diversos envios de pacotes até que se totalizassem os tamanhos das imagens de 500 KB, 750 KB e 1 MB, por diversas vezes, a fim de estimar o tempo de transmissão dessas imagens.

Para cada teste, exceto com o *drone*, o procedimento adotado foi: (i) ir afastando os dispositivos pouco a pouco até que estes, devido à distância, não conseguissem se comunicar; (ii) registrar a maior distância que houve comunicação entre eles e iniciar os envios de pacotes; (iii) aproximar os módulos pouco a pouco, tendo em vista o alcance máximo, realizando testes para verificar os efeitos da distância. Em todos os testes observando as métricas: RSSI, taxa de transmissão e as perdas na transmissão.

O parque conta com um *drone* modelo *Phantom 3 Professional* com autonomia de 15 a 20 minutos completamente carregado. Nele foi acoplado o *Raspberry Pi*, como mostrado na Figura 5.6(a), para realizar os testes de coleta sobre a copa das árvores. Diferentes dos outros experimentos, o quinto não foi até o alcance máximo de comunicação. O veículo aéreo não-tripulado sobrevoou, próximo a copa das árvores, Figura 5.6(b), com uma distância de segurança, simulando o ambiente

proposto para a aplicação IoTWild, e estabilizando ao iniciar a transmissão dos dados.



(a) Drone com Raspberry Pi acoplado



(b) Drone sobrevoando com o equipamento as árvores na Floresta da Tijuca

Figura 5.6: Montagem do equipamento para testes

5.2 Consumo de energia do sistema

As câmeras armadilhas disponíveis no parque contam com baterias que duram por aproximadamente 1 ano e o *drone* tem autonomia de voo que varia de 15 a 20 minutos - isto varia de acordo com o esforço que tem que fazer para voar, por exemplo vencendo ventos contrários. Tendo em vista esses valores foram realizadas avaliações de consumo de energia do *RaspberryPi* e do módulo ESP-12F, para saber se esses trabalhariam de acordo com esses equipamentos existentes. Ou seja, se o *Raspberry* acoplado a uma bateria funcionaria por tempo igual ou superior ao *drone*, e se o

módulo WiFi, também sendo alimentado por uma bateria comum, seria capaz de alcançar duração de bateria similar ao da câmera armadilha, e assim não adicionar visitas extras de manutenção.

Para os testes, tanto com o *Raspberry* quanto com o ESP-12F, foi utilizado o sensor de corrente INA219 funcionando juntamente com uma placa *Arduino Nano*. Para fins de cálculo, foi usada a média dos valores de corrente observados durante 1 minuto de funcionamento. Certificou-se que não houve nenhum outro dispositivo (sensores ou periférico) acoplado aos equipamentos de forma que esses não fossem consumidores secundários interferindo nos testes. As medições foram feitas com os dispositivos funcionando de acordo com o proposto nesse trabalho, ou seja, se conectando, enviando e recebendo dados.

De acordo com as especificações do fabricante o *RaspberryPi3* consome de 700 mA a 1000 mA variando conforme o funcionamento, e os diversos periféricos que podem ser usados. Já o módulo ESP-12F tem 4 modos de operação com consumos bem variados, como mostra a Tabela 5.2.

Modo de Operação	Corrente (\sim mA)
Transmissão Contínua	71 (média) - 300 (pico)
<i>Modem Sleep</i>	20
<i>Light Sleep</i>	2
<i>Deep Sleep</i>	0,02

Tabela 5.2: Consumo aproximado do módulo ESP-12F conforme dados do fabricante

Os modos de operação se diferenciam da seguinte forma [38]:

- **Transmissão contínua:** é o modo normal de funcionamento, realizando transmissões e recebimentos. Nesse modo todas as funções do módulo estão ligadas.
- ***Modem Sleep:*** esse modo é usado para aplicações que precisem que a CPU esteja funcionando, como em aplicações que usem PWM (*Pulse Width Modulation*) e I2S (*Inter-IC Sound*). Entretanto, o circuito do modem WiFi é desligado por períodos de 300 ms e religado para recebimento de *beacons* do ponto de acesso, isso enquanto não há dados sendo transmitidos, ressaltando que a conexão não é interrompida em nenhum momento. Este é o modo padrão de operação do módulo;
- ***Light Sleep:*** nesse modo a CPU pode ser suspensa - dependendo da aplicação, já o modem WiFi tem funcionamento igual ao modo *Modem Sleep*. Ambos usam suspensões de funcionamento com o intuito de reduzir o consumo;

- **Deep Sleep:** nesse modo o WiFi é completamente desligado, bem como, a CPU. Apenas o *clock* do sistema se mantém ligado. Dessa forma opera por ciclos - configuráveis - ligando e desligando CPU e WiFi.

Para a aplicação que este trabalho foca, discutida no Capítulo 3, 2 modos de operação são os mais funcionais, a saber: *Modem Sleep* e *Deep Sleep*. Isto pois, havendo alguma descontinuidade no envio de dados, ele manterá a conexão com o *Raspberry*, porém poupará energia e o segundo modo garante que enquanto não houver nenhuma comunicação com o módulo no *drone*, ele poupará o máximo possível, trabalhando em ciclos onde desligará CPU e WiFi e religará para verificar se o ponto de acesso está acessível.

Como discutido anteriormente, o módulo escolhido para os experimentos foi o módulo de desenvolvimento ESP-12F, porém as facilidades que este módulo traz, como a interface USB-serial e o regulador de tensão, podem servir como drenos de energia e assim os testes de energia do módulo podem destoar consideravelmente dos valores apresentados pelo fabricante, Tabela 5.2. Então, para os testes de consumo do módulo WiFi foram considerados tanto o módulo de desenvolvimento, como a versão mínima do módulo. A Figura 5.7 mostra essas duas versões.

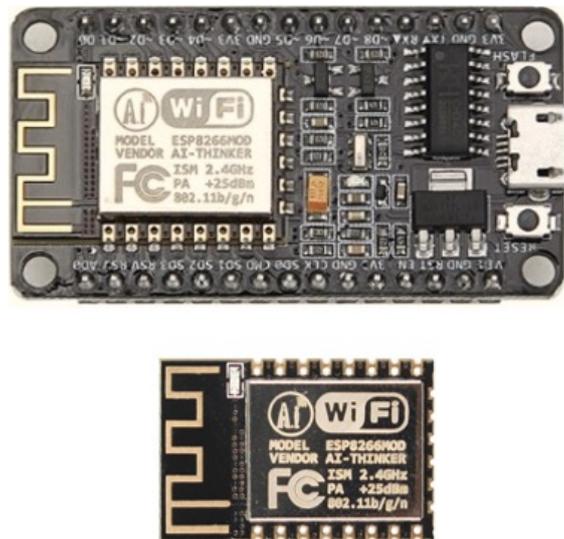


Figura 5.7: Módulo de desenvolvimento x versão mínima do módulo ESP-12F

A versão mínima, não contém *chip* de interfaceamento USB-serial nem regulador de tensão, ou LED indicativo. Desta forma, é apenas programável via interface serial e só trabalha com tensão de 3,3 V.

Capítulo 6

Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos para os testes de desempenho da rede e de avaliação do consumo de energia dos equipamentos utilizados nos experimentos. Com esses resultados é possível considerar se estes dispositivos são capazes de serem usados para automatizar sistema de coletas de dados em floresta.

6.1 Desempenho da rede

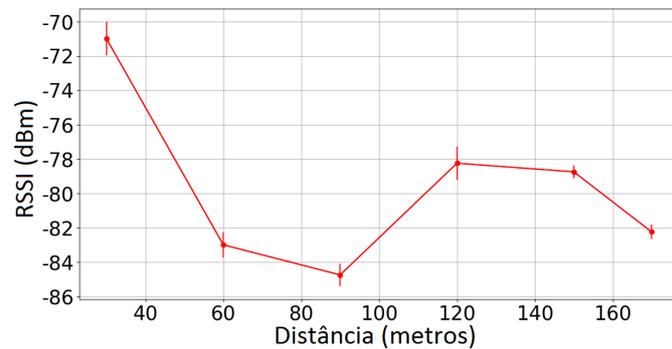
Nesta seção são apresentados os principais resultados referentes a cada um dos cenários avaliados em relação ao desempenho da rede. Todas as medidas representam médias com um intervalo de confiança de 90%, este intervalo sendo apresentado em cada um dos gráficos. A avaliação consistiu em verificar o alcance máximo dos dispositivos nos cenários internos, externo e entre as árvores. A vazão e perda de pacotes foram, também, observadas em todos os cenários. Para essas avaliações foram usadas as métricas RSSI, taxa de transmissão e taxa de perdas de pacotes. Foram, ainda, verificados: a influência do posicionamento do *drone* na taxa de transmissão e o tempo de transmissão de 3 tamanhos de imagens para o dispositivo acima da copa das árvores.

6.1.1 Alcance máximo

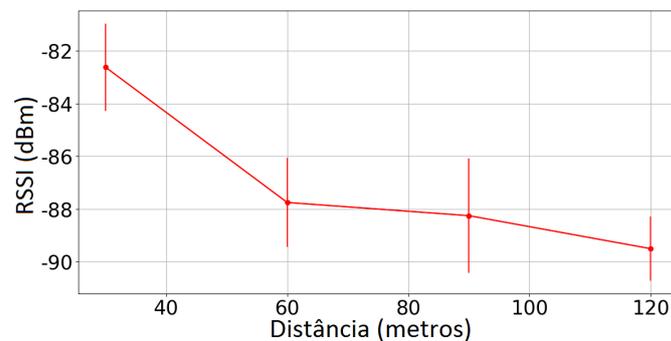
Primeiramente é avaliado o valor da força do sinal recebido a fim de determinar o alcance de cada um dos cenários, exceto o cenário com o *drone*. Para este último, não faria sentido a avaliação do alcance máximo, tendo em vista que quanto mais alto o voo do veículo aéreo não-tripulado, maior a influência dos ventos. Esta influência descaracterizaria a sua configuração prevista no projeto IoTWild, que prevê que o *drone* estabilize seu voo sobre as árvores, uma vez que se conecte com o dispositivo dentro da floresta para realizar a coleta das informações. Logo, para as medições com o *drone* a distância considerada foi o tamanho médio das árvores em florestas

tropicais mais uma distância de segurança da copa das árvores, o que equivale a aproximadamente 30 m de distância entre os módulos.

A Figura 6.1 apresenta os resultados de dois dos cenários avaliados. No cenário externo é possível ver a queda do valor do RSSI conforme o aumento da distância como é esperado. Já no cenário interno no corredor, o valor do RSSI apresenta um comportamento diferente. Acredita-se que isto ocorre porque os corredores conduzem a energia propagante e funcionam como uma guia de onda, melhorando a propagação neste cenário [39]. Entretanto, por ter sido um resultado inesperado para ambientes internos, este cenário carece de mais estudos para se entender os reais efeitos dele sobre a transmissão.



(a) Ambiente interno: corredor



(b) Ambiente externo

Figura 6.1: RSSI x Alcance

É possível observar, no cenário corredor na distância de 90 m, que o alcance do sinal piora. Isto se dá pois o corredor sofre uma interrupção em sua continuidade. A distância de 90 m, há uma larga saída e isso interfere no efeito de guia de onda desse ambiente. Ao passar esta área vazada do corredor, novamente o sinal ganha força só voltando a perder a força quando a distância é ainda maior. Este efeito pode ser facilmente observado na Figura 6.1(a). Já na Figura 6.1(b) é possível observar que a força do sinal diminui conforme a distância entre os nós aumenta, o que já era esperado. O mesmo efeito ocorre nos outros cenários.

A Tabela 6.1 mostra os alcances de cada um dos cenários avaliados, sendo algum

desses o alcance máximo obtido. Pode-se perceber que a rede 802.11 dentro da floresta possui alcance semelhante a uma rede interna com barreiras, mostrando como a densa vegetação influencia na transmissão, funcionando de maneira similar a uma parede.

Experimento	Descrição	Alcance (metros)
1	Externo Aberto	120
2	Interno Corredor	170
3	Interno com Barreira	40
4	Externo dentro da Floresta	40

Tabela 6.1: Alcance máximo

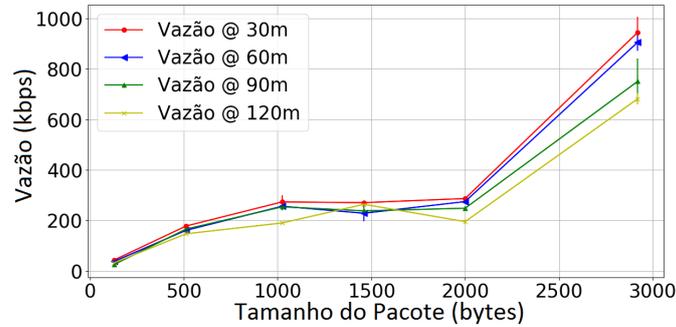
Na floresta com o *drone*, o RSSI médio foi de $-80,75$ dBm com desvio padrão de 2,82, a uma distância de 30 metros. Como mencionado anteriormente, neste cenário não foi medido o alcance máximo, pois não fazia sentido para a aplicação em questão.

6.1.2 Vazão da rede

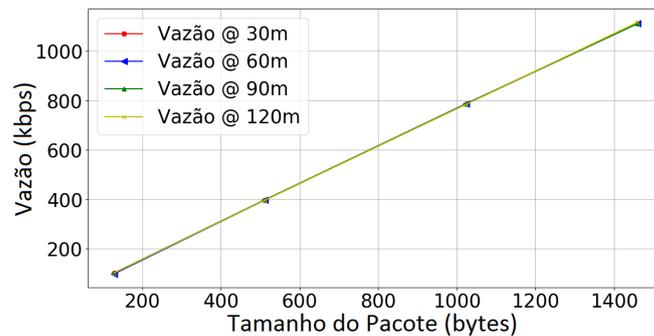
Nestes experimentos, buscou-se avaliar a vazão da rede utilizando os protocolos UDP e TCP. Os testes com o protocolo UDP são importantes para mostrar um limite superior da vazão, além de servir como referência para outros trabalhos que avaliam redes IEEE 802.11. Além disso, é possível caracterizar as perdas de pacotes. No entanto, a transmissão das fotos capturadas pela câmera exige confiabilidade na transmissão, uma perda mínima que fosse de pacotes poderia comprometer a remontagem da imagem ou sua qualidade, assim o protocolo TCP é o mais adequado para a aplicação considerada. Por este motivo, o desempenho do protocolo TCP é fundamental para estimar a vazão que o módulo sem fio neste cenário é capaz de alcançar.

A Figura 6.2 ilustra o desempenho do módulo no cenário externo, onde já é possível notar uma grande diferença em relação ao desempenho de dispositivos tradicionais IEEE 802.11, isto é, sem restrições de processamento e consumo de energia. Tanto a vazão alcançada quanto o alcance atingido são inferiores aos resultados obtidos usualmente [26]. Um segundo ponto importante é verificar o efeito da restrição do intervalo de tempo mínimo entre dois pacotes, exigido pelo módulo. No UDP (Figura 6.2(b)) é mais nítido o efeito, pois o acréscimo de 10 ms a cada transmissão de pacote torna o seu tempo de transmissão praticamente desprezível, e por isso, a curva é uma reta, proporcional ao tamanho do pacote. A Figura 6.2(a) apresenta o resultado para o TCP. Neste caso, é interessante observar que apesar de não haver

uma restrição de configuração de um intervalo mínimo entre os pacotes transmitidos, o impacto da limitação do módulo de transmitir dois pacotes consecutivos permanece. Este impacto é mais visível quando colocamos o tamanho de pacote máximo permitido pelo módulo. Neste caso, ocorre fragmentação do pacote, mas claramente não há acréscimo do intervalo mínimo entre pacotes para os dois fragmentos, e portanto, a vazão atinge seu máximo. Este fenômeno ocorre em todos os outros cenários. Por último, é possível perceber que não houve grandes variações na vazão alcançada para as diferentes distâncias, mesmo com a queda do valor de RSSI, como mostrada na Figura 6.1(b). Esta queda do RSSI normalmente acarreta uma mudança de modulação do IEEE 802.11, implicando uma redução na taxa de transmissão. No entanto, esta redução não afeta a vazão do módulo, visto que o gargalo é o próprio módulo que não consegue atingir altas taxas de transmissão. De maneira geral, as perdas, e por conseguinte as retransmissões, também influenciam nos valores de vazão observados.



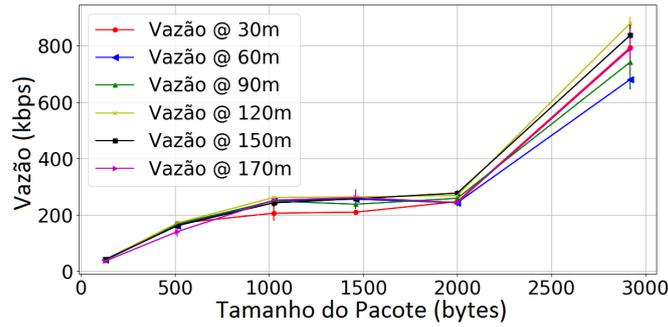
(a) TCP



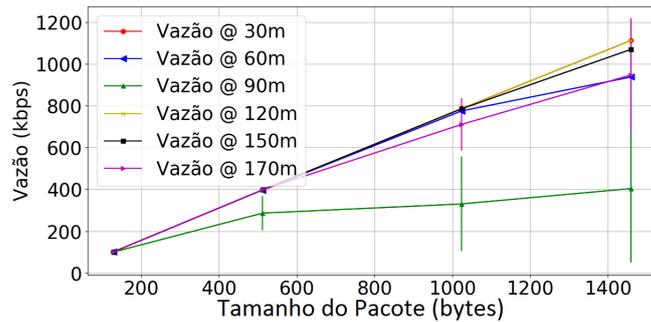
(b) UDP

Figura 6.2: Vazão x tamanho de pacote em ambiente externo

As Figuras 6.3 e 6.4 apresentam os resultados para os cenários internos. O primeiro resultado interessante é a vazão no corredor, ilustrado na Figura 6.3. Apesar de ser um ambiente interno, a vazão é similar ao ambiente externo, onde a transmissão sem fio é sabidamente melhor, por não estar suscetível a tantas reflexões. Como explicado na Figura 6.1(a), a propagação em um cenário de corredor pode ser



(a) TCP



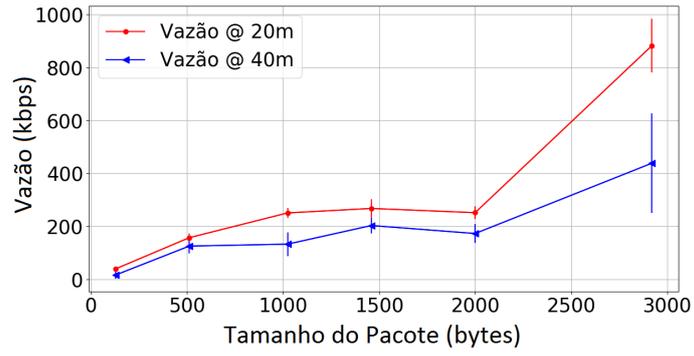
(b) UDP

Figura 6.3: Vazão x tamanho de pacote em ambiente interno

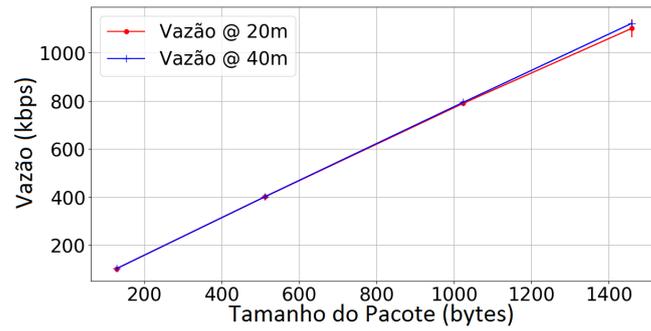
considerada com uma onda guiada, e portanto atinge vazões iguais ou superiores a ambientes externos [39]. A Figura 6.4 mostra claramente que o resultado da vazão em um cenário interno, do tipo sala, apresenta uma vazão menor que os cenários anteriores e sobretudo que a presença de barreiras, isto é, paredes entre as salas, afeta consideravelmente a vazão do TCP, que para cada perda de pacote diminui sua vazão devido às retransmissões e ao controle de congestionamento.

As Figuras 6.5 e 6.6 apresentam os resultados obtidos na floresta tropical. No primeiro experimento, onde cliente e servidor estavam dentro da floresta, a vazão e o alcance atingiram valores semelhantes ao cenário interno com barreiras. Exceto pelo desempenho do TCP que foi prejudicado pela existência de uma parede (Figura 6.4(a) - 40 metros). Isto significa que a transmissão em florestas densas pode ser comparado a um cenário interno, com a vegetação funcionando com obstáculos semelhantes a paredes.

Finalmente, a Figura 6.6 mostra o desempenho do TCP e do UDP na comunicação entre o *drone* e o módulo IEEE 802.11 dentro da floresta. O primeiro resultado importante é notar que o desempenho do UDP foi bastante inferior aos outros cenários. Este resultado se deve principalmente pela ocorrência de um número maior de perdas de pacotes neste cenário, como será mostrado em seguida. Um dos motivos para este resultado é o fato de o *drone* não conseguir ficar estável exatamente no mesmo lugar, devido sobretudo ao vento, e o peso extra do equipamento de comu-

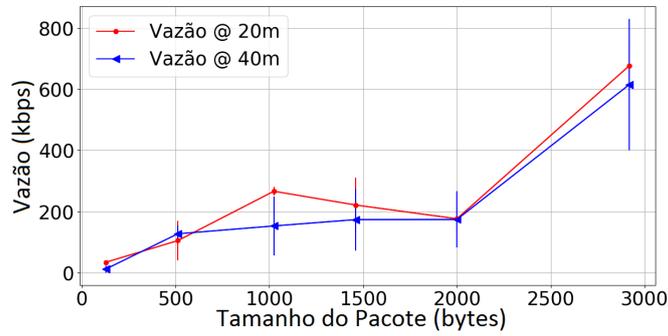


(a) TCP

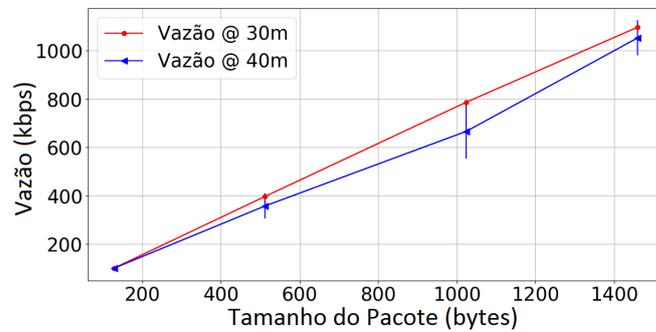


(b) UDP

Figura 6.4: Vazão x tamanho de pacote em ambiente fechado com barreiras



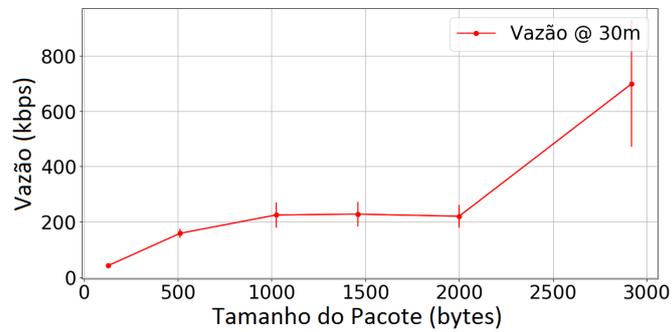
(a) TCP



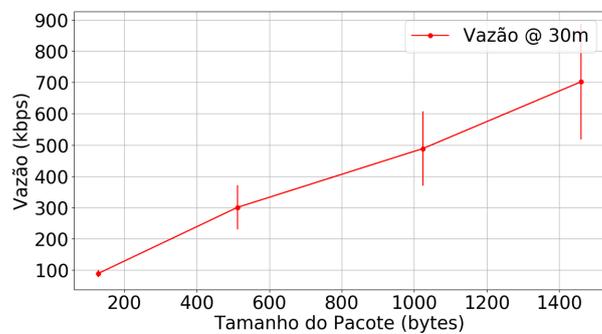
(b) UDP

Figura 6.5: Vazão x tamanho de pacote dentro da floresta

nicação acoplado, que dificultava a sua estabilidade. O resultado da vazão do TCP, ilustrado na Figura 6.6(a), demonstra a viabilidade da comunicação acima da copa das árvores, com um desempenho similar ao cenário interno.



(a) TCP



(b) UDP

Figura 6.6: Vazão x tamanho de pacote experimento com drone

6.1.3 Taxa de Perda de Pacotes

A partir dos experimentos da transmissão UDP com o *drone*, foi possível observar que a perda de pacotes neste cenário foi significativa. Portanto, a Tabela 6.2 mostra a média da porcentagem de perdas para cada tamanho de pacote.

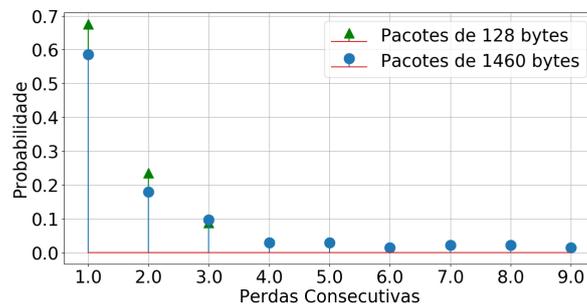
Tamanho do Pacote (bytes)	Média de Perdas
128	4,8%
512	39,4%
1024	44,8%
1460	27,8%

Tabela 6.2: Experimento 5: Floresta com *Drone*

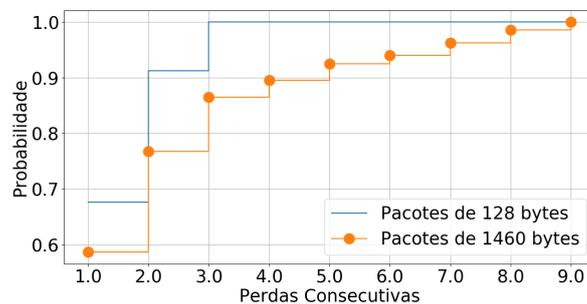
É interessante notar a alta taxa de perda de pacotes para todos os tamanhos, que aumenta conforme o tamanho do pacote, como era esperado, devido à taxa de

erro de bit do meio de transmissão (BER). Exceto para o maior tamanho de pacote, que sofreu menos perdas que os pacotes de 512 e 1024 bytes. Vale ressaltar que os resultados de perdas apresentaram grande variação, com rodadas com poucas perdas e outras com maiores perdas. Isto se deve principalmente a variação de posição do *drone*.

Para melhor caracterizar as perdas de pacotes na floresta, foram avaliadas as perdas de pacotes consecutivas. A Figura 6.7 apresenta a PMF (*Probability Mass Function*) e CDF (*Cumulative Distribution Function*) das perdas consecutivas para pacotes de 128 e 1460 bytes. Primeiramente, é interessante observar que a grande maioria dos pacotes perdidos não são consecutivos. Para pacotes pequenos, as perdas consecutivas não ultrapassam três pacotes, enquanto que para pacotes maiores este valor pode chegar a nove. No entanto, menos de 14% das perdas de pacotes de 1460 bytes são superiores a três pacotes consecutivos. A partir destes resultados é possível considerar a hipótese que neste cenário trabalhando com redes sem fio o controle de congestionamento do TCP pode não ser eficiente, como já foi estudado para redes sem fio [40]. Vale mencionar que o algoritmo de controle de congestionamento usado foi o *Cubic*.



(a) PMF



(b) CDF

Figura 6.7: Perdas para o menor e maior tamanho de pacote

6.1.4 Posicionamento do drone *versus* desempenho da rede

Ao longo dos testes foi possível verificar a influência do posicionamento do *drone* onde o dispositivo WiFi estava acoplado e o desempenho da rede. Isto se deu devido a instabilidade do *drone* em decorrência de rajadas súbitas de ventos. Apesar de terem sido escolhidos dias ensolarados e sem ventos, devido em parte pela altitude do local onde foram realizados os testes, rajadas de ventos eram inevitáveis no decorrer do dia; estas acontecendo principalmente à tarde. Outro fator que influenciou o posicionamento do *drone* foi o controle dele ter sido feito manualmente, e não necessariamente em todas as rodadas dos testes o piloto conseguia posicionar o *drone* exatamente na mesma posição, isto muitas vezes devido à dificuldade de visão do local dos testes. Assim, foi possível notar que mesmo pequenas mudanças na posição influenciavam no valor dos resultados. A Figura 6.8 mostra isso claramente, uma vez que a taxa de transmissão usando TCP tem queda aproximada de até 3 vezes do valor obtido com o *drone* corretamente posicionado, como anteriormente na Figura 6.6(a).

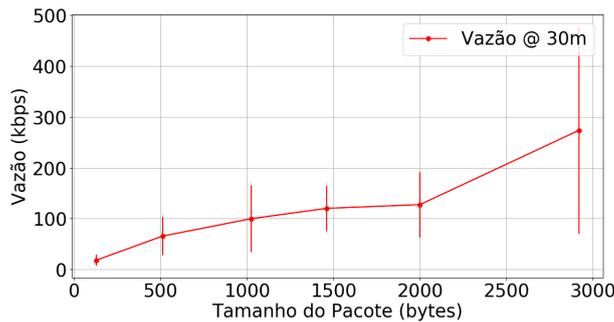


Figura 6.8: Vazão decai consideravelmente quando o *drone* é mal posicionado

Este resultado foi obtido colocando o *drone* em uma nova posição mais distante do módulo dentro floresta, outras árvores se tornam barreiras na transmissão e principalmente devido a limitada capacidade da antena *omni*-direcional PCB (*Printed circuit board*) do módulo ESP-12F, com padrão de radiação estreito [38].

6.1.5 Tempo de transmissão de imagens

Devido ao curto tempo de autonomia de voo do veículo aéreo não-tripulado, um dos resultados mais importantes é o tempo de transmissão de uma imagem do módulo WiFi dentro da floresta para o módulo instalado no *drone* acima da copa das árvores, isto sendo transmitindo usando TCP devido a necessidade de confiabilidade. Os tempos observados variaram de 10 a 18 segundos para o menor tamanho de foto e de 15 a 30 segundos para o maior tamanho de imagem considerado. A

Tabela 6.3 apresenta os valores máximos, mínimos e médio alcançados para cada um dos tamanhos de imagens considerados, a saber de 500 kB, 750 kB e 1 MB.

Os valores médios permitem que se estime a quantidade de fotos que poderão ser capturadas a cada voo de coleta de dados com o *drone*, tendo em vista seu tempo médio de voo que é de 15 minutos. Portanto, considerando imagens de 500 kB o *drone* seria capaz de coletar aproximadamente 64 imagens a cada voo; para as imagens de 750 kB, aproximadamente 56 poderiam ser coletadas; já para imagens com tamanho de 1 MB, aproximadamente 40 imagens poderiam ser coletadas.

Tamanho (kbps)	Mínimo (s)	Médio (s)	Máximo (s)
500	10	14	18
750	14	16	22
1000	15	23	30

Tabela 6.3: Tempo de transmissão de imagens com relação ao seu tamanho

6.2 Consumo energético

Nesta seção são apresentados os resultados dos teste de consumo de energia dos dispositivos usados para coleta de imagens. Tendo em vista que são imprescindíveis equipamentos com baixo consumo de energia; uma vez que estes devem funcionar por maior tempo possível devido a localização onde serão instalados, evitando, assim, diversas visitas para manutenção de troca de bateria nessas áreas de difícil acesso e ambiente inóspito. O consumo previsto pelos fabricantes pode variar conforme a aplicação associada ao módulo, por isso é importante verificar o real consumo dos dispositivos na aplicação estudada.

6.2.1 Drone e Raspberry Pi

O *drone* sendo alimentado por uma bateria de 4480 mAh, tem tempo de voo de aproximadamente de 15 a 20 minutos que varia de acordo com o esforço que os motores do *drone* precisam empregar para realizar o voo e estabilizar o veículo no ar. O vento e o sobrepeso do módulo de comunicação acoplado ao *drone* são fatores relevantes que requerem maior esforço do *drone*. O consumo do *Raspberry* pode variar conforme dispositivos periféricos (sensores, atuadores, entre outros) são ligados a ele, e, ainda, de acordo com os processos que executa. A Figura 6.9 mostra o consumo do *Raspberry* em uma configuração mínima: sem nenhum dispositivo ligado a ele, rodando apenas programas básicos do sistema operacional e o programa para coleta de dados.

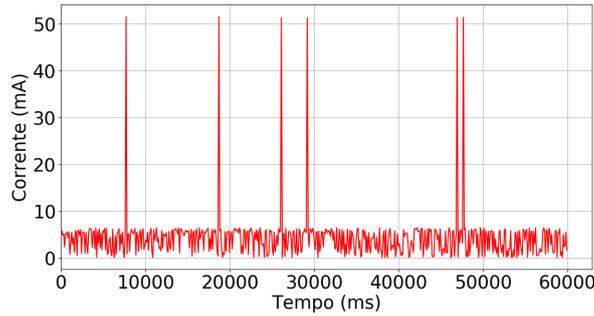


Figura 6.9: Consumo de energia *Raspberry* executando programas básicos do sistema operacional e programa para coleta de dados

Nos experimentos, o *Raspberry* foi conectado a uma bateria de 2200 mAh. Consumindo em média 4,25 mA, é possível estimar seu funcionamento em 21 dias. Portanto, o *Raspberry* não representa um gargalo em termos de consumo de energia, visto que o servidor é acoplado ao *drone* que possui autonomia muito inferior a do *Raspberry*, e a cada retorno do *drone* a estação base tanto ele quanto o *drone* poderão ser recarregados.

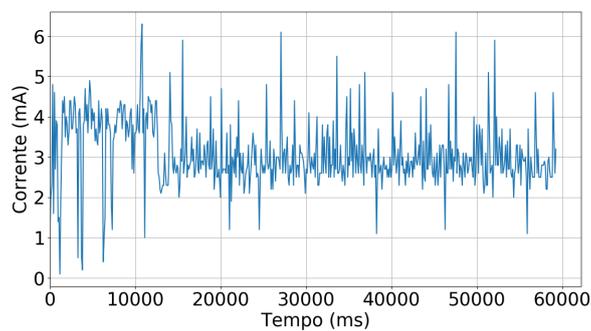
6.2.2 Módulo WiFi

Como discutido no Capítulo 5, o módulo ESP-12F tem 4 modos de operação: Transmissão Contínua, *Modem Sleep*, *Light Sleep* e *Deep Sleep*. Para este projeto foram considerados os modos *Modem Sleep* e *Deep Sleep*. Estes 2 modos de operação foram testados em duas versões do módulo, uma de desenvolvimento e uma versão mínima, com a motivação de comparar os módulos e atestar o real consumo do dispositivo WiFi.

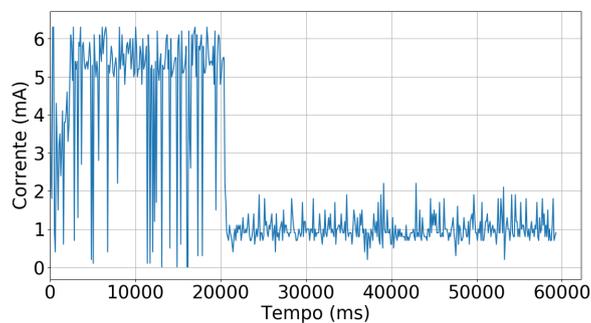
Funcionando em *Modem Sleep*, o módulo procura o ponto de acesso e se conecta a rede, em seguida começa o envio dos pacotes. Vale ressaltar que esta foi a configuração usada para os envios de todos os pacotes dos experimentos. Nas Figuras 6.10(a) e 6.11(a) é possível observar o consumo do módulo, na versão de desenvolvimento e mínima respectivamente, por um período de 1 minuto. O pico registrado inicialmente corresponde ao momento que o módulo está se conectando ao ponto de acesso, o que demora cerca de 12 s para ser concluído. Em seguida é possível verificar que o módulo de desenvolvimento requer em média 3 mA para realizar os envios de mensagem, enquanto a versão mínima requer aproximadamente 1,6 mA.

Em *Deep Sleep*, adotou-se o seguinte esquema de funcionamento: durante 20 s o módulo procuraria o ponto de acesso, não tendo sucesso nessa procura, ele entraria no modo *Deep Sleep* por 40 s; lembrando que este desliga todas as funcionalidades do módulo, exceto o *clock* que é usado para religar o módulo. Após os 40 s nova

tentativa de procura da rede era realizada. Esses valores de tempos foram escolhidos de forma a não permitir que o *drone*, perca tempo considerável de voo enquanto aguarda que o módulo se conecte, e ao mesmo tempo garantir que em momentos de ociosidade o módulo possa economizar o máximo de bateria possível, a saber quando não estiver ocorrendo nenhuma transmissão entre os módulos. Nas Figuras 6.10(b) e 6.11(b) é possível observar o que acima foi descrito, onde em ambas as imagens os 20 s iniciais apresentam consumos mais elevados. Ao término deste período, o módulo é visto entrando em *Deep Sleep* e a corrente consumida é reduzida consideravelmente, alcançando valores de 1 mA no módulo de desenvolvimento e 0,02 mA no módulo na versão mínima - como previsto pelo manual.



(a) Conectando a rede e transmitindo

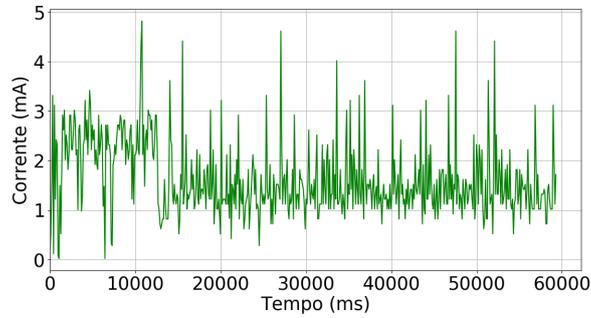


(b) Procurando a rede e em modo *deepsleep*

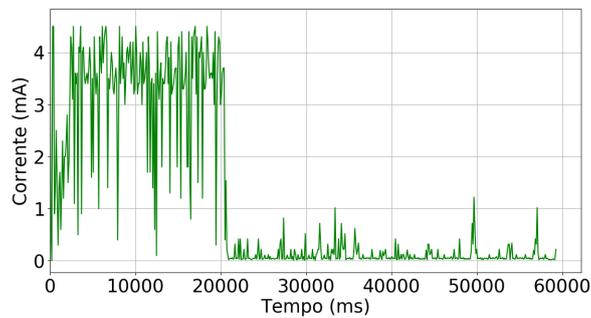
Figura 6.10: Consumo de energia do módulo de desenvolvimento ESP-12F, IEEE 802.11, atuando como cliente

Esses resultados permitem estimar o tempo de funcionamento do módulo ligado a uma bateria similar à usada no *RaspberryPi* de 2200 mAh. Considerando que o *drone* realize um voo de coleta por dia, e assim o módulo colete as imagens por um período de 15 minutos todos os dias e o restante do tempo ele trabalhe de forma a poupar energia (20 s procurando pela rede e 40 s no modo *Deep Sleep*). Neste mesmo cenário, o módulo na versão de desenvolvimento funcionará por aproximadamente 3 meses sem que a bateria precise ser novamente recarregada, o módulo em sua versão mínima é capaz de permanecer ativo por pelos menos 1 ano. A bateria das

câmeras armadilha dura em média 1 ano, desta forma o uso do módulo não exigirá a adição de visitas extras para trocas de bateria, pelo contrário a coleta por meio deste sistema diminuirá as visitas necessárias a cada uma das câmeras, tendo em mente a automação do processo de coleta das imagens.



(a) Conectando a rede e transmitindo



(b) Procurando a rede e em modo *deepsleep*

Figura 6.11: Consumo de energia do módulo ESP-12F versão mínima, IEEE 802.11, atuando como cliente

Capítulo 7

Conclusões

A importância de novos projetos e estudos na área de ecologia é latente, tendo em vista a magnitude dos efeitos de se negligenciar o meio ambiente afetando toda a população mundial. Assim, projetos com essa visão são esperados e bem quistos por toda comunidade acadêmica nas mais diversas áreas de estudos, considerando o caráter interdisciplinar do assunto. Novas tecnologias, com as que fazem parte do paradigma de Internet das Coisas, podem ser aliadas na busca de novas soluções para preservação do meio ambiente e o estudo de preservação das espécimes. Desta forma, este trabalho avalia o desempenho de uma rede IEEE 802.11 na floresta montada puramente com dispositivos IoT para coleta de dados de monitoramento de vida selvagem. Os dados coletados correspondem a imagens de câmeras armadilhas instaladas na floresta, que podem alcançar até 1 MB de tamanho. Portanto, um dos principais desafios é a transmissão de dados a partir de dispositivos de baixo poder computacional e baixo consumo de energia. Além disso, a transmissão ocorre em ambientes de floresta, nos quais o desempenho da comunicação sem fio é severamente prejudicado.

Diferente de trabalhos anteriores, o enfoque é caracterizar este tipo de rede em ambientes de floresta e verificar sua viabilidade para coleta de dados de câmeras com o auxílio de veículos aéreos não-tripulados. Para fins de caracterização, outros tipos de cenários além do florestal foram observados, estes sendo *outdoor*: em área aberta externa e dentro de uma trilha em floresta; *indoor*: em amplo corredor dentro de prédio sem barreiras e entre salas de aula com barreira. Estes testes em diferentes cenários mostraram que o cenário de floresta com o *drone* é comparável ao cenário interno com barreiras, obtendo o mesmo alcance. Assim, é possível ver que as árvores e a vegetação na floresta se compararam a paredes, servindo como fortes barreiras para a transmissão.

Os resultados mostram que as limitações dos dispositivos, principalmente o tempo de processamento necessário para o módulo enviar os pacotes de dados, restringem consideravelmente o desempenho da rede sem fio. Essas limitações associadas à

influência da vegetação implicaram uma diminuição na taxa de transmissão e um aumento das perdas de pacote. Apesar de todas serem muito semelhantes, as taxas de transmissão usando o protocolo TCP no ambiente interno corredor se destacaram, devido influência positiva do próprio ambiente funcionando com um condutor de onda. Uma surpresa foram as transmissões com UDP que não se comportaram como usualmente, isto devido limitação do módulo em enviar diversos pacotes consecutivos, necessitando de um tempo extra entre as transmissões. Ainda que não se comportaram como esperado, as transmissões usando o protocolo UDP mostram que as perdas ocorrem. Em geral essas perdas não foram sucessivas e no que se acredita que métodos de controle de congestionamento do TCP podem não ser eficientes em cenário de floresta. Embora longe de alcançar resultados ideias que são esperados para uma transmissão usando o IEEE 802.11n, que pode chegar a valores de 600 Mbps, a solução se mostrou minimamente eficiente para coletar imagens dentro da autonomia de voo de um *drone* padrão, que é de 15 a 20 minutos. Portanto, estes resultados demonstram a viabilidade de automatizar a coleta de grandes volumes de dados em florestas densas.

Este trabalho ainda avaliou o tempo para coleta de cada imagem, considerando 3 tamanhos diferentes de imagens, que são os tamanhos de imagem que a câmera armadilha gera. Sendo possível coletar quase 60 imagens de 500 kB por viagem. Este resultado valida a conclusão que é possível usar este tipo de sistema para coleta de dados. Entretanto, ainda que promissor, o resultado de ser possível coletar as imagens na floresta não era o único a ser levado em consideração. Caso o consumo de energia do módulo instalado na floresta fosse alto, as visitas para trocas de bateria se igualariam ou até superariam as visitas para coleta das imagens das câmeras, e assim novamente requereria grande intervenção manual. Dessa forma, foi feita uma análise do consumo de cada um dos dispositivos envolvidos no projetos. Os testes de consumo mostraram que usando técnicas de economia de energia, já implementadas no módulo WiFi, é possível que o módulo funcione por tempo superior ou equivalente ao das câmeras sem a necessidade de recargas considerando a utilização de baterias similares as de celulares, que são facilmente encontradas no mercado. Dependendo da frequência de coleta de dados, essa economia pode ser ainda maior, alcançando valores de quase 2 anos de funcionamento sem novas recargas. Tanto o desempenho da rede quanto o consumo dos dispositivos tornam a solução funcional e aplicável no contexto de floresta.

7.1 Trabalhos Futuros

Como trabalho futuro pretende-se investigar possíveis ações que possam diminuir o tempo de processamento necessário para que o dispositivo inicie o envio de mensa-

gens. Além disso, seria interessante estudar simplificações no modelo de controle de congestionamento do TCP que possam ser implementados em dispositivos de baixa capacidade de processamento a fim de melhorar o desempenho da comunicação entre o módulo e o *drone*.

Considerando que o posicionamento do *drone* influencia fortemente a transmissão, é relevante estudar a antena dos dispositivos usados, gerando inclusive diagramas de irradiação, e algoritmos de controle e otimização de voo. De forma a encontrar o posicionamento ótimo tanto dos módulos dentro da floresta quanto do *drone* para melhorar a transmissão. Inclusive vale avaliar alternativas de uso de antenas externas, o que poderia facilitar a superação de barreiras criadas pela vegetação.

Referências Bibliográficas

- [1] STEENWEG, R., HEBBLEWHITE, M., KAYS, R., et al. “Scaling-up camera traps: monitoring the planet’s biodiversity with networks of remote sensors”, *Frontiers in Ecology and the Environment*, v. 15, n. 1, pp. 26–34, feb 2017.
- [2] “Tribuna de Petrópolis: Uso de Drones Facilita o Controle de Queimadas”. 2017. Disponível em: <<http://tribunadepetropolis.com.br/uso-de-drone-facilita-controle-de-queimadas>>. Acessado em: Maio/2018.
- [3] ATZORI, L., IERA, A., MORABITO, G. “The internet of things: A survey”, *Computer networks*, v. 54, n. 15, pp. 2787–2805, 2010.
- [4] BIJWAARD, D. J., VAN KLEUNEN, W. A., HAVINGA, P. J., et al. “Industry: Using dynamic WSNs in smart logistics for fruits and pharmacy”. In: *Proceedings of the 9th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp. 218–231. ACM, 2011.
- [5] BAIG, M. M., GHOLAMHOSSEINI, H. “Smart health monitoring systems: an overview of design and modeling”, *Journal of medical systems*, v. 37, n. 2, pp. 9898, 2013.
- [6] ZUEHLKE, D. “SmartFactory—Towards a factory-of-things”, *Annual Reviews in Control*, v. 34, n. 1, pp. 129–138, 2010.
- [7] RAY, P. P., MUKHERJEE, M., SHU, L. “Internet of Things for Disaster Management: State-of-the-Art and Prospects”, *IEEE Access*, v. 5, pp. 18818–18835, 2017.
- [8] “Lora Alliance”. 2015. Disponível em: <<https://lora-alliance.org>>. Accessed in: Jan/2017.
- [9] “Sigfox”. 2015. Disponível em: <<https://www.sigfox.com/en>>. Accessed in: Jan/2017.

- [10] GU, Z., HUA, Q.-S., WANG, Y., et al. “Reducing Information Gathering Latency through Mobile Aerial Sensor Network”. In: *IEEE INFOCOM’13*, 2013.
- [11] ABDULLA, A. E. A. A., FADLULLAH, Z. M., NISHIYAMA, H., et al. “An Optimal Data Collection Technique for Improved Utility in UAS-aided Networks”. In: *IEEE INFOCOM’14*, 2014.
- [12] JEONG, H., LEE, C., RYU, J., et al. “Communicating ”in the Air- Studying the Impact of UAVs on Sensor Network Data Collection”. In: *SenSys’15*, 2015.
- [13] SAY, S., INATA, H., LIU, J., et al. “Priority-Based Data Gathering Framework in UAV-Assisted Wireless Sensor Networks”, *IEEE Sensors Journal*, v. 16, n. 14, pp. 5785–5794, 2016.
- [14] LIMA, C. M. A., SILVA, E. A., VELLOSO, P. B. “Avaliação de Desempenho do IEEE 802.11 para Coleta de Grande Volume de dados em Florestas com Auxílio de Drones”. In: *Anais do XVII Workshop em Desempenho de Sistemas Computacionais e de Comunicação (WPerformance’18)*. SBC, 2018.
- [15] PETAJAJARVI, J., MIKHAYLOV, K., ROIVAINEN, A., et al. “On the coverage of LPWANS: range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology”. In: *International Conference on ITS Telecommunications (ITST’15)*, 2015.
- [16] KRIARA, L., MOLERO, E. C., GROSS, T. R. “Evaluating 802.11ac features in indoor WLAN”. In: *ACM WiNTECH’16*, 2016.
- [17] JUANG, M., KUANG-CHING WANG, MARTIN, J. “A Measurement Study on Link Capacity of a High Stress IEEE 802.11b/g Network”. In: *IEEE ICCCN’08*, 2008.
- [18] LIM, H. S., LO, K. K., ABBAS, M., et al. “An Investigation of Vegetation Effect on the Performance of IEEE 802.11n Technology at 5.18 GHz”. In: *International Conference on Wireless Communications and Applications (ICWCA 2012)*, 2012.
- [19] MUTSCHLECHNER, M., BALDEMAIER, P., HANDLE, P., et al. “Wireless in the woods: Experimental evaluation of IEEE 802.11 a/b/g in forested environments”, *12. GI/ITG FACHGESPRÄCH SENSORNETZE*, v. 60, pp. 5, 2013.

- [20] WANG, K.-C., VENKATESH, G., PRADHANANGA, S., et al. “Building wireless mesh networks in forests”. In: *ACM WiNTECH’08*, 2008.
- [21] DING, X., SUN, G., YANG, G., et al. “Link Investigation of IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks in Forests”, *Sensors*, v. 16, n. 7, 2016.
- [22] NIKHADE, S. G. “Wireless sensor network system using Raspberry Pi and Zigbee for environmental monitoring applications”. In: *International Conference on Smart Technologies and Management for Computing, Communication, Controls, Energy and Materials (ICSTM’15)*, 2015.
- [23] HUU-QUOC NGUYEN, TON THI KIM LOAN, BUI DINH MAO, et al. “Low cost real-time system monitoring using Raspberry Pi”. In: *International Conference on Ubiquitous and Future Networks*, 2015.
- [24] VASISHT, D., KAPETANOVIC, Z., WON, J., et al. “FarmBeats: An IoT Platform for Data-Driven Agriculture”. In: *USENIX NSDI’17*, 2017.
- [25] MULLIGAN, G. “The 6LoWPAN architecture”. In: *Proceedings of the 4th workshop on Embedded networked sensors*, pp. 78–82. ACM, 2007.
- [26] PERAHIA, E., STACEY, R. *Next Generation Wireless LANs: 802.11n and 802.11ac*. 2 ed. Cambridge, UK, Cambridge University Press, 2013. doi: 10.1017/CBO9781139061407.
- [27] HALPERIN, D., GREENSTEIN, B., SHETH, A., et al. “Demystifying 802.11 n power consumption”. In: *Proceedings of the 2010 international conference on Power aware computing and systems*, p. 1, 2010.
- [28] BLUETOOTH, S. “Specification of the Bluetooth System-Covered Core Package version: 4.0”. 2010.
- [29] DECUIR, J., OTHERS. “Bluetooth 4.0: low energy”, *Cambridge, UK: Cambridge Silicon Radio SR plc*, v. 16, 2010.
- [30] RAZA, S., MISRA, P., HE, Z., et al. “Bluetooth smart: An enabling technology for the Internet of Things”. In: *Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), 2015 IEEE 11th International Conference on*, pp. 155–162. IEEE, 2015.
- [31] KHOROV, E., LYAKHOV, A., KROTOV, A., et al. “A survey on IEEE 802.11 ah: An enabling networking technology for smart cities”, *Computer Communications*, v. 58, pp. 53–69, 2015.

- [32] BOR, M., VIDLER, J., ROEDIG, U. “LoRa for the Internet of Things”. In: *Proceedings of the 2016 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks, EWSN '16*, pp. 361–366, USA, 2016. Junction Publishing. ISBN: 978-0-9949886-0-7.
- [33] PETRIĆ, T., GOESSENS, M., NUAYMI, L., et al. “Measurements, performance and analysis of LoRa FABIAN, a real-world implementation of LPWAN”. In: *Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2016 IEEE 27th Annual International Symposium on*, pp. 1–7. IEEE, 2016.
- [34] ALLIANCE, L. “A technical overview of LoRa and LoRaWAN”, *White Paper, November*, 2015.
- [35] LEE, J.-S., SU, Y.-W., SHEN, C.-C. “A comparative study of wireless protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi”. In: *Industrial Electronics Society, 2007. IECON 2007. 33rd Annual Conference of the IEEE*, pp. 46–51. IEEE, 2007.
- [36] SPECIFICATION, Z. “ZigBee Alliance Std., 2005”. 2005.
- [37] FREITAS, S. R., NEVES, C. L., CHERNICHARO, P. “Tijuca National Park: two pioneering restorationist initiatives in Atlantic forest in southeastern Brazil”, *Brazilian Journal of Biology*, v. 66, n. 4, pp. 975–982, 2006.
- [38] “ESP-12F 802.11 b/g/n Wi-Fi Module”. 2017. Disponível em: http://wiki.ai-thinker.com/_media/esp8266/docs/aithinker_esp_12f_datasheet_en.pdf. Acessado em: Maio/2018.
- [39] EL-MAGHRABI, H. M., ATTIYA, A. M., HASHISH, E. A. “Indoor Wave Propagation Prediction for Corridors Segments with Partially Reflecting Walls by Using 3D Waveguide Modal Analysis.” *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, v. 31, n. 3, 2016.
- [40] GRIECO, L. A., MASCOLO, S. “Performance evaluation and comparison of Westwood+, New Reno, and Vegas TCP congestion control”, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, v. 34, n. 2, pp. 25–38, 2004.