

**REDES AÉREAS IEEE 802.15.4: TAMANHO
ÓTIMO DO PACOTE E COLETA DE DADOS**

WELLINGTON ANTÔNIO SOARES JÚNIOR

**REDES AÉREAS IEEE 802.15.4: TAMANHO
ÓTIMO DO PACOTE E COLETA DE DADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal de Minas Gerais - Departamento de Ciência da Computação como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

ORIENTADOR: LUIZ FILIPE M. VIEIRA

Belo Horizonte
Fevereiro de 2014

© 2014, Wellington Antônio Soares Júnior.
Todos os direitos reservados.

Soares Júnior, Wellington Antônio

S352r REDES AÉREAS IEEE 802.15.4: TAMANHO
ÓTIMO DO PACOTE E COLETA DE DADOS /
Wellington Antônio Soares Júnior. — Belo Horizonte,
2014

xxviii, 79 f. : il. ; 29cm

Dissertação (mestrado) — Universidade Federal de
Minas Gerais - Departamento de Ciência da
Computação

Orientador: Luiz Filipe M. Vieira

1. Computação - Teses. 2. Redes de sensores sem fio
- Teses. 3. Aeronave não tripulada. I. Orientador. II.
Título.

CDU 519.6*22(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

FOLHA DE APROVAÇÃO

Redes aéreas IEEE 802.15.4: tamanho ótimo do pacote e coleta de dados

WELLINGTON ANTONIO SOARES JUNIOR

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

PROF. LUIZ FILIPE MENEZES VIEIRA - Orientador
Departamento de Ciência da Computação - UFMG

PROF. ANTONIO ALFREDO FERREIRA LOUREIRO
Departamento de Ciência da Computação - UFMG

PROF. RICARDO AUGUSTO RABELO OLIVEIRA
Departamento de Computação - UFOP

Belo Horizonte, 26 de junho de 2014.

Dedico este trabalho a todos que me ajudaram a fazê-lo.

Agradecimentos

Inicialmente agradeço à minha família, meu pais, Wellington e Sandra, meu irmão Guilherme que, mesmo à distância, participou de todo o processo e à minha namorada Camila, por todo o incentivo, e por terem compartilhado tanto as alegrias quanto as incertezas.

Agradeço ao meu professor e orientador Luiz Filipe pelo apoio, auxílio e paciência, durante todo o desenvolvimento do curso, e ao professor Antônio Loureiro pelos conselhos e orientações nas horas que se fizeram necessárias.

A todos os meus amigos que de uma maneira ou de outra me acompanharam durante toda a caminhada e estiveram sempre ao meu lado.

Ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Minas Gerais pela oportunidade de fazer parte de um curso em que é oferecida aos alunos a melhor estrutura possível.

Aos colegas Vinícius Morais e David Saldaña pela ajuda imprescindível com o controle dos equipamentos utilizados.

Por fim, meu muito obrigado a todos aqueles que compartilharam momentos comigo e estiveram a meu lado durante a realização deste trabalho.

“Somos todos feitos do mesmo pó de estrelas.”
(Carl Sagan)

Resumo

O Veículo Aéreo não Tripulado (VANT) está se tornando popular graças a avanços tecnológicos, ampliando as aplicações dessa tecnologia. O surgimento da IoT impulsiona o desenvolvimento de novos rádios de baixa potência e baixo consumo de energia. Um dos principais protocolos de comunicação destes rádios é o IEEE 802.15.4. A união entre VANTs e rádios mais eficientes permite a criação de redes aéreas, que são redes de sensores sem fio em que um ou mais de seus nós é composto por um veículo aéreo. Este novo tipo de rede de sensores móveis pode reduzir os custos e proporcionar novas aplicações. Assim, é interessante desenvolver estudos que melhorem o desempenho e utilização desse tipo de rede. Ao alterar o tamanho máximo do pacote transmitido, é possível melhorar a eficiência de sua transmissão. As redes aéreas podem ser utilizadas também como um novo método para realizar coleta de dados de redes de sensores sem fio, em áreas remotas ou de difícil acesso. O objetivo desta dissertação é obter o tamanho ótimo do pacote que otimize o processo de transmissão de pacote de dados. Para essa otimização, foram utilizados três métodos de análise: uso de modelo analítico; simulação computacional e realização de experimento em campo. Para a criação dos nós sensores da rede sem fio, foi desenvolvida uma biblioteca que faz uma interface entre os rádios de baixa potência utilizados no experimento (Xbee 802.15.4) e o microcontrolador MSP430 utilizado como nó sensor. Concluiu-se que, para uma melhor utilização do canal de comunicação em rádios de baixa potência como o utilizado, o melhor tamanho de pacote é sempre aquele com o maior corpo de dados possível. Demonstrou-se que é possível implementar um sistema de coleta de dados de uma rede de sensores sem fio com a utilização de um nó com mobilidade. A biblioteca que realiza a interface entre o microcontrolador e o rádio pode ser expandida e facilmente utilizada em outros projetos que contenham estes dois componentes.

Palavras-chave: VANT, Redes de sensores sem fio, Tamanho ótimo do pacote, Coleta de dados.

Abstract

The Unmanned Aerial Vehicle (UAV) is becoming popular thanks to technological advances, expanding this technology applications. The rise of IoT drives the development of new low power and low energy consumption radios. One of the main communication protocols for these radios is the IEEE 802.15.4. The union between UAVs and more efficient radio allows the creation of aerial networks, that are wireless sensor networks in which one or more of its nodes is composed of an air vehicle. This new type of mobile sensor network can reduce costs and offer new applications. Thus, it is interesting to develop studies that improve the performance and use of this type of network. By altering the maximum size of the transmitted packet, it is possible to improve the transmission efficiency. Aerial networks can also be used as a new data collection method for wireless sensor networks, in remote or difficult to access zones. The goal of this dissertation is to obtain the optimal packet size that optimize the data packet transmission process. Three analysis methods were employed: use of an analytical model; computer simulation and conducting field experiment. To create the wireless network's sensor nodes, an interface library between the low power radios used in the experiment (XBee 802.15.4) and the used MSP430 microcontroller was developed. It follows that for a better use of the low power radios communication channel, the best packet size is always the one with the greatest possible data body. It was shown that it is possible to implement a wireless sensor network's data collection system with the use of a mobile node. The library which performs the interface between the microcontroller and the radio can be easily expanded and used in other projects containing these two components.

Keywords: UAV, Wireless Sensor Networks, Optimum Packet Size, Data Collection.

Resumo Estendido

O VANT está se tornando popular graças a avanços tecnológicos, que têm contribuído para redução significativa de custos para a utilização desse tipo de veículo, ampliando as aplicações dessa tecnologia. Esses mesmos avanços impulsionam o surgimento da Internet of Things (IoT), graças ao desenvolvimento de novos rádios de baixa potência e baixo consumo de energia, que proporcionam conexões entre diferentes objetos. Um dos principais protocolos de comunicação para estes rádios é o IEEE 802.15.4. A união entre VANTs e rádios de baixo consumo de energia permite a criação de redes aéreas, que são redes de sensores sem fio em que um ou mais de seus nós é composto por um veículo aéreo. Este novo tipo de rede de sensores móveis pode reduzir os custos de aplicações, popularizando o uso dessa tecnologia, pois os custos de implantação e de operação ainda são altos. Assim, é necessário desenvolver estudos que melhorem o desempenho e utilização dessas redes, de modo a reduzir custos. Ambientes dinâmicos, onde se encontram as redes aéreas, são cenários onde pode ser grande a probabilidade de que ocorram erros na transmissão de pacote de dados. Ao alterar o tamanho máximo do pacote transmitido, é possível melhorar a eficiência de sua transmissão. As redes aéreas podem ser utilizadas também como um novo método para realizar coleta de dados de redes de sensores sem fio, em áreas remotas ou de difícil acesso. O objetivo desta dissertação é obter o tamanho ótimo do pacote que otimize o processo de transmissão de dados. Além disso, com base nesse tamanho ótimo, teve-se como meta implantar diferentes métodos de coletas de dados, de uma rede real de sensores sem fio, que podem ser realizados por um VANT. Para otimização da transmissão dos pacotes, foram utilizados três métodos de análise: uso de modelo analítico; simulação computacional e realização de experimento em campo. Todas essas abordagens tiveram como referência a análise da eficiência de utilização do canal de comunicação de redes IEEE 802.15.4, tendo como base a variação do tamanho máximo do pacote e da distância entre os nós sensores da rede. Para a criação dos nós sensores da rede sem fios, foi desenvolvida uma biblioteca que faz uma interface entre os rádios de baixa potência utilizados no experimento (Xbee 802.15.4) e o microcontrolador MSP430 utilizado como nó sensor.

Foi utilizada uma rede real de sensores sem fio, composta por nós constituídos de um microcontrolador RISC, de 16 bits, e um rádio que implementa o protocolo IEEE 802.15.4, onde um dos nós move-se junto com um VANT, responsável pela coleta de dados. Essa coleta com um nó móvel foi então comparada com a coleta de dados tradicional, típica da transmissão de dados à longa distância por rádio e por redes de telefonia celular. Para rádios de baixa potência e baixo consumo de energia, a variação apenas da distância não exerce grande influência no tamanho do pacote, pois pacotes destes rádios já possuem um tamanho reduzido, em comparação com pacotes de redes de maior potência. Portanto, o tamanho máximo do pacote é o ideal para este tipo de comunicação. Assim, o tamanho máximo de pacote é o que foi utilizado para a coleta de dados. Dos três diferentes métodos de coleta utilizados, o com transmissões simultâneas consome menos energia, pois uma menor quantidade total de pacotes é transmitida, apesar de uma maior perda proporcional de pacotes. Os resultados indicam que, para priorizar a economizar e energia, e, portanto, aumentar o tempo de vida médio da rede de sensores, o método de coleta ideal, neste cenário, é mover o VANT entre os nós e coletar diretamente de cada um, ao invés de rotear os pacotes pela rede, em cenários onde apenas um ou uma menor quantidade de nós funciona como ponte entre o VANT e os nós sensores. Concluiu-se que, para uma melhor utilização do canal de comunicação em rádios de baixa potência como o utilizado, o melhor tamanho de pacote é sempre aquele com o maior corpo de dados possível. Demonstrou-se que é possível implementar um sistema de coleta de dados de uma rede de sensores sem fio com a utilização de um nó com mobilidade. A biblioteca que realiza a interface entre o microcontrolador e o rádio pode ser expandida e facilmente utilizada em outros projetos que contenham estes dois componentes.

Lista de Figuras

1.1	MQ-9 Reaper. Fonte:Atomics [2012]	2
1.2	VTOL Quadrotor. Fonte:Industry [2012]	2
1.3	Rede de VANTs	3
1.4	Drones Are Helping Meteorologists Decipher Tropical Cyclones, PBS Jarvis [2014]	5
1.5	WWF Uses Google Money for Drones to Fight Poaching, Tom's Hardware Gruener [2012]	6
1.6	Amazon testa drones para agilizar entregas, BBC Brasil Brasil [2013]	7
1.7	Pizzaria de SP faz delivery com drone e entra na mira de ANAC e FAB, G1 Gomes [2014]	8
1.8	VANT (em destaque) utilizado para registrar evento em vídeo, durante a festa de formatura da turma de Engenharia Metalúrgica 2014 da UFMG	9
1.9	IEEE 802.15.4 IC market to exceed \$1.1 billion in 2016, EE Times Joosting [2012]	10
1.10	Installed Base of 802.15.4-enabled Devices to Exceed 2 Billion by 2019; ZigBee to Face Increasing Competition, FierceMobileIT FierceMobileIT [2014]	11
1.11	Stop the IoT revolution! We need to figure out packet sizes first, The Register Chirgwin [2014]	12
3.1	Quadrotor AscTec Hummingbird	22
3.2	Foto referente ao modelo de rádio utilizado nos experimentos	23
3.3	LaunchPad e MSP430	24
3.4	Distribuição da memória embarcada no MSP430g2553.	26
3.5	Esquema que ilustra as conexões entre o MSP430 e o Xbee	26
3.6	<i>LaunchPad</i> e Xbee conectados com o auxílio de uma <i>breadboard</i>	27
4.1	Vazão de dados por número de nós. Fonte: Yin et al. [2004]	29
4.2	Modelo de uma transmissão com dois raios	31

4.3	Perda dois raios e perda no espaço livre	31
4.4	Modelo de transmissão de pacotes de acordo com a Equação 4.6	34
4.5	Esquema da disposição dos rádios durante o experimento	34
4.6	Resultados Teóricos da Eficiência de utilização do Canal por tamanho do corpo de dados do pacote para distâncias entre os nós de 30, 40, 45, 50 e 55 metros - Tamanho do corpo de dados variando de 1 a 1000 bytes	36
4.7	Resultados Teóricos da Eficiência de utilização do Canal por tamanho do corpo de dados do pacote para distâncias entre os nós de 30, 40, 45, 50 e 55 metros - Tamanho do corpo de dados variando de 1 a 100 bytes	37
4.8	Tamanho de corpo de dados ótimo por distância - Resultado analítico . . .	38
4.9	Resultados obtidos com o simulador para eficiência de utilização do canal por tamanho do corpo de dados - Nós separados a 30 metros	40
4.10	Resultados obtidos com o simulador para eficiência de utilização do canal por tamanho do corpo de dados - Nós separados a 35 metros	40
4.11	Resultados obtidos com o simulador para eficiência de utilização do canal por tamanho do corpo de dados - Nós separados a 40 metros	41
4.12	Resultados obtidos com o simulador para eficiência de utilização do canal por tamanho do corpo de dados - Nós separados a 45 metros	41
4.13	Resultados obtidos com o simulador para eficiência de utilização do canal por tamanho do corpo de dados - Nós separados a 50 metros	42
4.14	Resultados obtidos com o simulador para eficiência de utilização do canal por tamanho do corpo de dados - Nós separados a 55 metros	42
4.15	Tamanho de corpo de dados ótimo por distância - Resultado obtido com o simulador	43
4.16	Foto do modelo do VANT disponível, o AscTec Hummingbird	45
4.17	Posição no mapa em que se encontravam os dois rádios a 40 metros, Ponto 1: -19°51'39.56"O e -43°57'36.79"S, Ponto 2: -19°51'39.92"O e -43°57'38.27"S	45
4.18	Histogramas do experimento realizado com os rádios a 40 metros de distância - Quantidade de pacotes enviados por RSSI recebido para 40 metros . .	47
4.19	Histogramas do experimento realizado com os rádios a 40 metros de distância - Pacotes recebidos por tamanho do corpo de dados a 40 metros	47
4.20	Diferença na eficiência de utilização do canal - Eficiência de utilização do canal por distância	49
4.21	Diferença na eficiência de utilização do canal - Valor da eficiência de utilização do canal entre o tamanho para corpo de dados ótimo e máximo a uma distância de 59 metros	50

4.22	Eficiência de utilização do canal por tamanho do corpo de dados com 40 metros de distância entre os nós - Resultado analítico	50
4.23	Eficiência de utilização do canal por tamanho do corpo de dados com 40 metros de distância entre os nós - Resultado obtido com o simulador	51
4.24	Eficiência de utilização do canal por tamanho do corpo de dados com 40 metros de distância entre os nós - Resultado experimental	51
4.25	Eficiência de utilização do canal por tamanho do payload com 40 metros de distância entre os nós	52
5.1	Esquema de coleta de dados com nó mula.	53
5.2	Esquema da coleta de dados em que todos os nós se comunicam simultaneamente.	56
5.3	Esquema da coleta de dados em que todos os nós enviam a informação parcialmente.	58
5.4	Esquema da coleta de dados em que todos os nós enviam a informação para um sink.	60
5.5	Os quatro nós no solo.	64
5.6	O quadrotor no ar.	65
5.7	Visão geral do ambiente de testes.	66
5.8	Perda de pacote por nó : transmissões simultâneas.	66
5.9	Número total de mensagens enviadas por nó: transmissões simultâneas.	67
5.10	Perda de pacote por nó : transmissões mistas.	67
5.11	Número total de mensagens enviadas por nó: transmissões mistas.	68
5.12	Perda de pacote por nó : transmissões em sequência.	68
5.13	Número total de mensagens enviadas por nó: transmissões em sequência.	69
5.14	Perda de pacote por cada método de comunicação utilizado em que 1 - Método com transmissões simultâneas, 2- Método com transmissões mistas e 3- Método com transmissões em sequência.	70
5.15	Número total de pacotes enviados por cada método de comunicação utilizado em que 1 - Método com transmissões simultâneas, 2- Método com transmissões mistas e 3- Método com transmissões em sequência.	71
5.16	Latência média de cada método de comunicação utilizado em que 1 - Método com transmissões simultâneas, 2- Método com transmissões mistas e 3- Método com transmissões em sequência.	71

Lista de Tabelas

3.1	Especificações do rádio Xbee 802.15.4 informadas pelo fabricante	23
4.1	Parâmetros da equação 4.2	35
4.2	Parâmetros do modelo da Eficiência de utilização do canal	35
4.3	Parâmetros chave para a simulação do rádio	39
5.1	Dados de cada pacote armazenado no microcontrolador.	54

Lista de Siglas

- ANAC** Agência Nacional de Aviação Civil
- API** Application Programming Interface
- ACK** Acknowledgement
- CTS** Clear to Send
- DMS** Data Mule Scheduling
- FAA** Federal Aviation Administration
- FAB** Força Aérea Brasileira
- FCD** Função de Coordenação Distribuída
- GPS** Global Positioning System
- IEEE** Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
- IoT** Internet of Things
- MAC** Media Access Control
- NASA** National Aeronautics and Space Administration
- PEG** Pursuit-Evasion Game
- QPSK** Quadrature Phase-Shift Keying
- RISC** Reduced Instruction Set Computer
- RSSI** Received Signal Strength Indicator
- RTS** Request to Send
- TI** Texas Instruments

UFMG Universidade Federal de Minas Gerais

UART Universal Asynchronous Receiver/Transmitter

UAV Unmanned Aerial Vehicle

WWF World Wide Fund for Nature

VANT Veículo Aéreo não Tripulado

VSNT Veículo Subaquático não Tripulado

Sumário

Agradecimentos	ix
Resumo	xiii
Abstract	xv
Resumo Estendido	xvii
Lista de Figuras	xix
Lista de Tabelas	xxiii
Lista de Siglas	xxv
1 Introdução	1
1.1 Motivação	3
1.1.1 VANTs na Mídia	3
1.1.2 O protocolo IEEE 802.15.4 na Mídia	10
1.1.3 Trabalhos Acadêmicos	12
1.2 Organização e Contribuições	14
2 Trabalhos Relacionados	15
2.1 Tamanho Ótimo do Pacote	15
2.2 Coleta de Dados	17
3 Métodos e Materiais	21
3.1 Software	21
3.1.1 Protocolo IEEE 802.15.4	21
3.1.2 Simulador Castalia	21
3.1.3 Java Xbee-API	22

3.2	Hardware	22
3.2.1	AscTec <i>Hummingbird</i>	22
3.2.2	Xbee 802.15.4	22
3.2.3	TI MSP430 e <i>Launchboard</i>	23
3.3	Decisões de implementação do Nó Sensor	24
4	Tamanho Ótimo do Pacote	29
4.1	Teoria e Modelos	30
4.1.1	Modelos de Propagação	30
4.1.2	Análise Teórica	32
4.2	Análise de Simulação	38
4.2.1	Simulação	38
4.2.2	Resultados da Simulação	39
4.3	Experimentos em Campo	44
4.3.1	Equipamentos utilizados	44
4.3.2	Local de realização dos experimentos	44
4.3.3	Descrição do experimento	44
4.3.4	Resultados do Experimento em Campo	46
4.4	Análise dos Resultados	48
5	Coleta de Dados	53
5.1	Rede de Sensores	54
5.1.1	Descrição do Hardware	54
5.2	Descrição dos métodos de coleta implementados	55
5.2.1	Método com transmissões simultâneas	55
5.2.2	Método com transmissões mistas	57
5.2.3	Método com transmissões em sequência	60
5.3	Análise Experimental	63
5.3.1	Método com transmissões simultâneas	63
5.3.2	Método com transmissões mistas	64
5.3.3	Método com transmissões em sequência	64
5.4	Resultados da Coleta de Dados	70
5.5	Análise dos Resultados	72
6	Conclusões	73
	Referências Bibliográficas	75

Capítulo 1

Introdução

Uma rede de sensores é composta por um grande número de sensores densamente distribuídos dentro ou muito próximo à área em que um fenômeno ocorre. A posição dos sensores pode não ser predeterminada ou estabelecida. Isso permite a instalação de sensores aleatoriamente em terrenos inacessíveis ou de difícil acesso. Entretanto, por causa desta elasticidade em sua topologia, os protocolos e algoritmos para redes de sensores sem fio devem possuir uma capacidade de auto-organização. Outra característica única de redes de sensores sem fio é a capacidade de cooperação entre os sensores. Como cada sensor possui a sua própria unidade de processamento, não é necessário que os sensores enviem uma grande quantidade de dados não processados. Cada unidade pode processar a sua informação obtida e enviar apenas os dados necessários requisitados por outros sensores para, em conjunto, fornecer a solução desejada. São características típicas de uma rede de sensores sem fio genérica: mesmo que um sensor falhe, a rede continua operando; a topologia em uma rede de sensores varia com frequência; tem uma capacidade limitada de bateria, de poder computacional e de memória; devido à grande quantidade de sensores implantados, em alguns casos pode não haver uma identificação global entre os sensores de modo a evitar o *overhead*. Mesmo com essas características descritas das redes de sensores sem fio permitem aplicações em várias áreas como segurança, saúde, ciências naturais, dentre outras.

O Protocolo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) 802.15.4 especifica a camada física e o controle de acesso para redes de sensores sem fio. Foi desenvolvido pelo IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) e é a base para as especificações *ZigBee*, *MiWi* e outras. Cada uma destas especificações subsequentes estendem ainda mais o padrão para propiciar a criação de redes de sensores sem fio com o protocolo IEEE 802.15.4.

VANTs (Figuras 1.1 e 1.2) são aeronaves que podem ser guiadas remotamente

com o auxílio de um controle ou de maneira autônoma. Devido a numerosos avanços tecnológicos, estes veículos podem ser utilizados para a realização, cada vez mais, de aplicações, sejam elas militares ou civis Sullivan [2005]; Cameron et al. [2010]. Os VANTs estão se tornando populares graças a melhorias no armazenamento de energia com as baterias de lítio e novos microprocessadores mais poderosos. Estes fatos bem como outros fatores contribuíram para uma significativa redução de custos para a utilização destas aeronaves Zelinski et al. [2003]. Com isso, tem ampliado o número de aplicações dessa tecnologia, que antes só era viável para governos ou grandes organizações.



Figura 1.1: MQ-9 Reaper. Fonte:Atomics [2012]



Figura 1.2: VTOL Quadrotor. Fonte:Industry [2012]

Redes Aéreas consistem em uma rede de sensores sem fio em que ao menos um desses veículos constitui um nó desta rede, trocando informações entre si. Cada veículo funciona como um sensor móvel (Figura 1.3). É importante destacar que ainda não há um consenso sobre o termo em português mais adequado para este tipo de rede aqui descrita. Neste trabalho, utiliza-se o termo redes aéreas. Os custos reduzidos para a produção de VANTs são de suma importância para a instalação de uma rede de sensores aérea. Este novo tipo de rede de sensores móveis pode reduzir os custos de aplicações antes inviáveis e assim permitir várias aplicações em diferentes áreas como saúde, biologia, aplicações sociais, militares, dentre muitas outras. Além disto, graças a

sua habilidade em coordenar ações simultâneas em grandes áreas, elas também podem ser úteis em aplicações que requeiram coordenação entre os nós como: busca e resgate; relé de comunicações em áreas em que não haja infraestrutura para tal; mapeamento de território inimigo; patrulha de fronteira e mais Ryan et al. [2004]. Esses veículos podem trabalhar em ações conjuntas e um fator muito importante é a comunicação entre os mesmos, bem como em relação a uma base de controle. É também possível proporcionar melhorias em várias aplicações de interesse da comunidade científica, já que as redes aéreas são capazes de prover uma melhor granularidade tridimensional para a amostragem de vários fenômenos que não poderiam ser realizadas de outra maneira Allred et al. [2007].

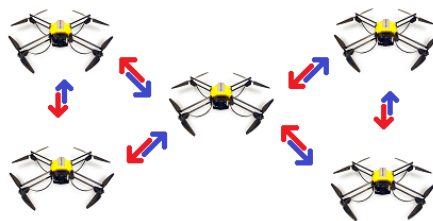


Figura 1.3: Rede de VANTs

A partir da união de VANTs e rádios que implementam o protocolo IEEE 802.15.4, é possível criar uma rede de sensores sem fio com nós aéreos. Nesta dissertação, é proposto um modelo para a otimização do tamanho do pacote nestas redes e, em seguida, é feita uma comparação entre diferentes métodos de coleta de dados de uma rede de sensores sem fio, em que um dos nós possui mobilidade por estar fixado em um VANT.

1.1 Motivação

As tecnologias descritas anteriormente fazem parte da vanguarda do desenvolvimento em suas respectivas áreas.

Nesta seção, são apresentadas algumas citações destas tecnologias na mídia e em trabalhos acadêmicos que ilustram o seu rápido desenvolvimento e sua atual relevância.

1.1.1 VANTs na Mídia

Grandes VANTs podem ser utilizados para realizar atividades que de outra maneira seriam arriscadas ou impraticáveis por seres humanos. A matéria Jarvis [2014] ilustrado

pela Figura 1.4, descreve como um VANT de propriedade da National Aeronautics and Space Administration (NASA) é utilizado para ajudar a esclarecer as tempestades tropicais. O VANT Global Hawk voa a uma altitude acima de 15 mil metros e representa a primeira oportunidade criada para observar diretamente a camada superior de um ciclone tropical. Os VANTs são equipados com equipamentos de sensoriamento especializado para fazer medições de vento, precipitação, temperatura, umidade e pressão atmosférica acima e dentro da tempestade. Um dos VANTs lança nós sensores, equipados com paraquedas, acima de tempestades; os nós sensores fazem diversas leituras durante a queda no meio da tempestade, fornecendo a meteorologistas informações detalhadas sobre a estrutura interna de uma tempestade.

A organização não governamental World Wide Fund for Nature (WWF), com o auxílio de uma verba doada pelo Google, promete implementar uma sofisticada rede de monitoramento com a utilização de VANTs que irá ajudar a proteger tigres, elefantes e rinocerontes contra caças realizadas por gangues. Este é um esforço para reduzir os crimes ambientais com inovações tecnológicas integradas. Esta história é relatada na matéria Gruener [2012], Figura 1.5

Pequenos VANTs com hélices, em geral com quatro hélices (quadrotor), compõem uma categoria que está se popularizando, devido ao seu custo cada vez menor. Diferentes empresas que trabalham com venda direta ao consumidor estudam uma estratégia para implantar uma rede de VANTs para realizar a entrega diretamente ao consumidor final, de forma ágil e barata. De acordo com a matéria Brasil [2013] (Figura 1.6), nos Estados Unidos a Amazon estuda implantar uma rede composta por octocópteros (VANT com oito hélices) para agilizar entregas. Entretanto, como a utilização de VANTs para uso comercial ainda não é regulamentada, este tipo de serviço ainda não é aprovado nos Estados Unidos pela Federal Aviation Administration (FAA). Um exemplo de utilização similar realizada no Brasil pode ser visto na matéria Gomes [2014] (Figura 1.7). Uma pizzaria de São Paulo realizou uma entrega com um VANT e, devido à falta de regulamentação para este tipo de voo, será investigada pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) e Força Aérea Brasileira (FAB).

Outra utilização de VANTs, para uso individual, destina-se a registro de eventos particulares. Um quadricóptero foi utilizado para registrar a festa de formatura da turma de Engenharia Metalúrgica 2014 da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). A foto feita pelo autor (Figura 1.8) ilustra este evento.

PLANET EARTH

Drones Are Helping Meteorologists Decipher Tropical Cyclones

By Brooke Jarvis on Wed, 25 Jun 2014

[Read Later](#) [Like](#) [Tweet](#)

Arturo Abuyen thought he was ready for the storm. The night before Typhoon Haiyan was expected to hit Filipino shores, the police station that he commands in Tacloban had extra officers on duty, a vehicle standing at the ready, and a stockpile of fresh water. “What we are preparing is what we heard from different radio stations, TV stations,” he recalls later. “But the typhoon was very strong.” Far stronger than he expected.

■ ■ ■

reconnaissance in the style of Hurricane Hunters anytime soon.



A Global Hawk releases a dropsonde.

Ferek’s hope is that the research with Global Hawks will help meteorologists

Figura 1.4: Drones Are Helping Meteorologists Decipher Tropical Cyclones, PBS Jarvis [2014]

WWF Uses Google Money for Drones to Fight Poaching

By Wolfgang Gruener DECEMBER 10, 2012 4:00 PM - Source: WWF |  35 COMMENTS

TAGS : [Search Engine](#) + [Google](#) +

Google has given a \$5 million grant to the World Wildlife Fund (WWF), which the organization will implement to curb poaching.

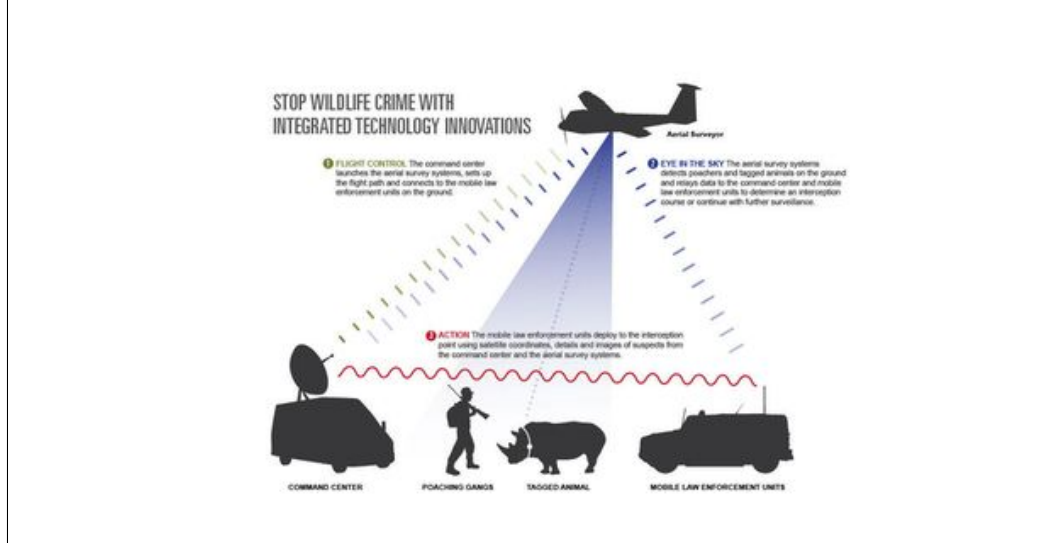


Figura 1.5: WWF Uses Google Money for Drones to Fight Poaching, Tom's Hardware Gruener [2012]

02/12/2013 12h20 - Atualizado em 02/12/2013 12h35

BBC BRASIL

Amazon testa drones para agilizar entregas

Aviões não-tripulados poderão entregar encomendas meia hora após compra on-line; serviço ainda precisa ser regulamentado.

Da BBC

[Tweeter](#) 121 [Recomendar](#) 1,6 mil

116 comentários



Amazon testa drones para agilizar entregas (Foto: BBC)

A Amazon, maior empresa de comércio eletrônico do mundo, com sede nos **Estados Unidos**, está testando drones (aviões não-tripulados) para fazer entrega de encomendas dos clientes, informou o diretor-executivo da empresa, Jeff Bezos.

Figura 1.6: Amazon testa drones para agilizar entregas, BBC Brasil Brasil [2013]

12/12/2014 11h19 - Atualizado em 12/12/2014 15h49

Pizzaria de SP faz delivery com drone e entra na mira de Anac e FAB

Em teste, drone entregou pizza de pepperoni em cobertura de Santo André. Donos do estabelecimento não pediram autorização para realizar sobrevoo.

Helton Simões Gomes
Do G1, em São Paulo

[FACEBOOK](#) [TWITTER](#) [G+](#) [PIN](#)

A photograph showing a black quadcopter drone in flight, carrying a red pizza box. The box has the words "Drone Delivery" printed on it in white. The drone is positioned over a city street with buildings and cars visible in the background. A play button icon is overlaid on the center of the image, indicating it is a video still.

Figura 1.7: Pizzaria de SP faz delivery com drone e entra na mira de ANAC e FAB, G1 Gomes [2014]



Figura 1.8: VANT (em destaque) utilizado para registrar evento em vídeo, durante a festa de formatura da turma de Engenharia Metalúrgica 2014 da UFMG

1.1.2 O protocolo IEEE 802.15.4 na Mídia

De acordo com a matéria do EE Times Joosting [2012] (Figura 1.9), o mercado de circuitos integrados que implementam o protocolo IEEE 802.15.4 irá aumentar de 90 milhões de dólares em 2010 para 1,1 bilhão de dólares até 2016. Esta e outras tecnologias de rádio com baixo consumo energético irão influenciar e guiar o crescimento deste mercado.



Research

IEEE 802.15.4 IC market to exceed \$1.1 billion in 2016

Jean-Pierre Joosting

1/1/2012 08:56 PM EST
1 Comment

NO RATINGS
LOGIN TO RATE

Like 0 Tweet 0 Share g+1 0

The IEEE 802.15.4 IC market will grow to over \$1.1 billion in 2016 — up from just \$90 million in 2010. Advanced Metering Infrastructure (AMI) is still a key adoption market and there is significant impetus behind the continuation of this market.

Some concerns have been raised around mass deployments ahead of IP support and the planned ZigBee Smart Energy 2.0, but recent announcements by ZigBee to migrate its portfolio of profiles into IP-based solutions should allay such concerns.

Figura 1.9: IEEE 802.15.4 IC market to exceed \$1.1 billion in 2016, EE Times Joosting [2012]

Acompanhando o crescimento do valor do mercado, a matéria do FierceMobileIT FierceMobileIT [2014] (Figura 1.10) anuncia a previsão de que a base instalada de dispositivos habilitados para comunicação IEEE 802.15.4 irá ultrapassar 2 bilhões de unidades até 2019.

Installed Base of 802.15.4-enabled Devices to Exceed 2 Billion by 2019; ZigBee to Face Increasing Competition

November 17, 2014

London, United Kingdom - 13 Nov 2014

The installed base for 802.15.4-enabled devices is forecast to increase almost fivefold over the next 5 years, rising from just under 425 million today to over 2.1 billion in 2019, finds ABI Research. "The low-power, low-cost, mesh networking capabilities of 802.15.4 networks make them the primary wireless technology choice across a number of different vertical markets including home, building and industrial automation, smart metering, and home entertainment," comments Andrew Zignani, Research Analyst at ABI Research.

Figura 1.10: Installed Base of 802.15.4-enabled Devices to Exceed 2 Billion by 2019; ZigBee to Face Increasing Competition, FierceMobileIT FierceMobileIT [2014]

Apoiado por um trabalho acadêmico a ser descrito detalhadamente no capítulo de Trabalhos Relacionados (Fu et al. [2014]), o jornal The Register Chirgwin [2014] (Figura 1.6) levanta a questão de que apesar da popularidade de tecnologias de rádio baseadas no IEEE 802.15.4, ainda não há consenso sobre qual o tamanho de pacote ideal para se tornar um padrão no desenvolvimento da "Internet das Coisas".

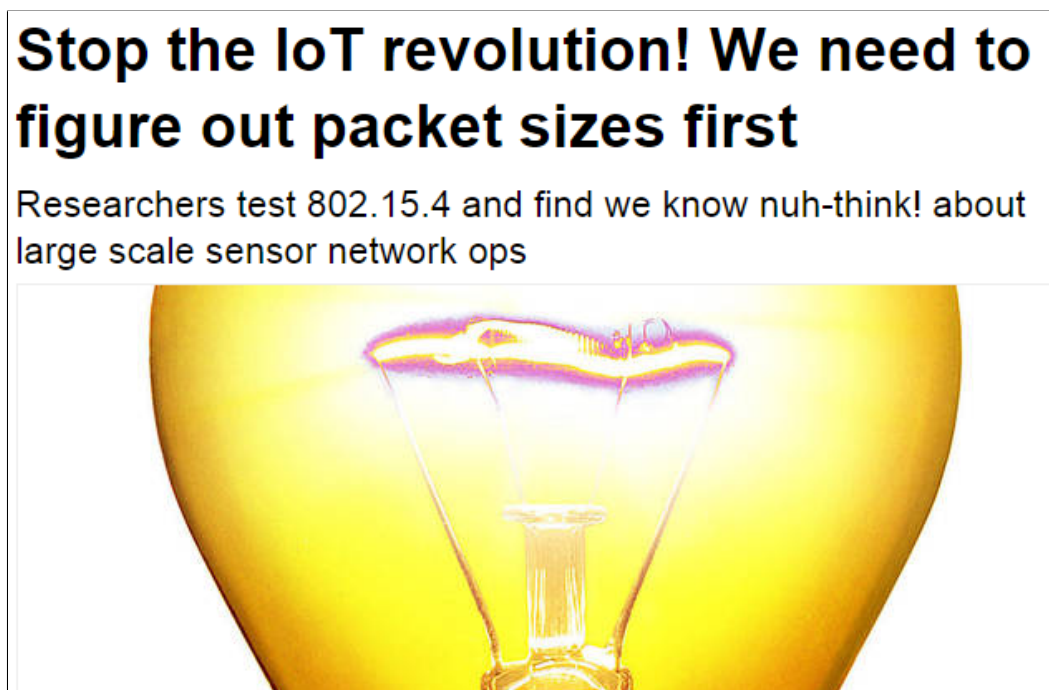


Figura 1.11: Stop the IoT revolution! We need to figure out packet sizes first, The Register Chirgwin [2014]

1.1.3 Trabalhos Acadêmicos

Muitos estudos realizados buscam desenvolver áreas do conhecimento abordadas nesta dissertação Sarris & ATLAS [2001]; Puri [2005]; Diamond & Ceruti [2007]; Rangel et al. [2009]. Nessas áreas, estão incluídos o desenvolvimento de novas aeronaves, processadores, algoritmos de controle de voo, algoritmos de roteamento, intensificação da vazão de informações na rede e muitos outros tópicos. Uma opção interessante para melhorar a capacidade de transmissão de informações em vários aspectos de uma rede aérea é aprimorar a comunicação entre seus nós. Com essas informações, vários objetivos podem ser atingidos como maior vazão de dados entre os nós e redução de utilização do processador, o que seria de grande importância, já que em cenários com uma quantidade limitada de energia e de poder de processamento, que é a realidade dos nós destas redes, qualquer melhoria na performance é bem-vinda.

Assim como em uma rede de sensores sem fio tradicional, redes aéreas também são extremamente dependentes da capacidade de armazenamento de energia da bateria de seus nós. Como nós sensores geralmente se encontram em lugares de difícil acesso, a vida útil de uma rede de sensores depende do tempo de vida útil da bateria dos nós. A quantidade de energia disponível para um nó é um recurso escasso também devido à limitação de tamanho da bateria. Por este motivo, a falha de um dos nós da rede é

um evento comum devido ao esgotamento de energia. É possível estender o tempo de vida útil de um sensor ao coletar energia do ambiente (Rabaey et al. [2000]), utilizando painéis solares. Os gastos energéticos de um nó sensor com a comunicação de dados são muito maiores do que os gastos com o processamento de dados (Pottie & Kaiser [2000]). Por isto, o processamento de dados realizados pelo sensor é muito importante para minimizar o consumo de energia em uma rede de sensores. Melhorar a eficiência no envio dos dados é outra maneira de reduzir o consumo de energia de cada nó.

1.1.3.1 Tamanho ótimo do pacote

Ambientes dinâmicos e redes congestionadas, onde os VANTs podem operar, são cenários onde pode ser grande a probabilidade de que ocorra um erro na transmissão de um pacote de informação. A fim de aumentar a taxa de recepção de pacotes neste tipo de ambiente, o tamanho máximo do pacote pode ser reduzido, já que, quanto menor for o tamanho do pacote, maiores serão as chances de que ele seja recebido corretamente. No entanto, como cada pacote tem um tamanho fixo do cabeçalho com informações necessárias para o funcionamento da rede, pacotes cada vez menores aumentam a sobrecarga da rede, pois ela tem de lidar proporcionalmente, cada vez, com mais dados apenas para fazê-la funcionar e menos dados que contenham as informações desejadas. Por outro lado, se o tamanho do pacote de rede aumenta, maiores são as chances de que ele seja corrompido. Portanto, existe um compromisso entre reduzir a sobrecarga da rede, aumentando o tamanho do pacote e mantendo reduzida a taxa de perda de pacotes, diminuindo o seu tamanho (Korhonen & Wang [2005]).

É interessante que se disponha de um método para avaliar a eficiência de utilização do canal da rede e para definir o tamanho ideal de pacote de modo a otimizar esta eficiência. Redes aéreas de baixo custo, em geral, utilizam rádios que implementam o padrão para redes IEEE 802.15.4. Uma vez que a topologia de redes aéreas pode ser muito instável, já que os seus nós possuem mobilidade, é necessário que este método analise como o valor do tamanho de pacote ótimo se comporta, na medida em que a distância entre os nós se altera.

1.1.3.2 Coleta de dados

Como as perdas ao longo do caminho de transmissões de ondas de rádio variam, com a distância, em proporção maior que a linear (Gao et al. [2006]), a energia gasta pode ser reduzida se for diminuído o alcance do rádio, desde que existam nós suficientes da rede para transmitir os dados de um ponto a outro. Caso a rede de sensores esteja instalada em um ambiente inóspito ou isolado, não é possível realizar esta transmissão nó a nó até

uma determinada base de operações. Uma das alternativas, neste caso, é instalar um nó sensor com um rádio, com capacidade de comunicação à longa distância. Entretanto, isto implica em maior consumo de energia de um dos nós da rede de sensores e isso diminuiria o seu tempo de vida útil. Outra alternativa para resolver este problema é utilizar nós com mobilidade para a coleta de dados de redes de sensores. O uso da mobilidade pode reduzir significativamente o consumo de energia dos sensores móveis e, portanto, aumentar o tempo de vida útil de uma rede de sensores (Sugihara & Gupta [2010]).

1.2 Organização e Contribuições

No capítulo 2, são descritos e analisados criticamente vários trabalhos relacionados ao tema desta dissertação.

No capítulo 3, são descritos os métodos e materiais deste trabalho.

No capítulo 4, faz-se uma adaptação para redes aéreas do modelo de estudo da eficiência de utilização do canal de comunicação desenvolvido por Pompili et al. [2006] para redes subaquáticas. Este método adaptado foi utilizado para encontrar o tamanho ideal de pacote para redes aéreas com distância variável, que utilizam rádios de baixa potência com o padrão IEEE 802.15.4. Os resultados obtidos com esse método são comparados com resultados obtidos com um simulador e experimentalmente. Para realizar os experimentos, foram utilizados rádios do tipo Xbee 802.15.4. Assim, tanto o modelo analítico quanto o modelo do simulador são baseados nas especificações reais desse tipo de rádio. A alteração máxima do tamanho do pacote é feita ajustando-se o tamanho máximo do corpo de dados, sem alterar o tamanho do cabeçalho do pacote.

No capítulo 5, é descrito o processo de desenvolvimento de nós de coleta de dados reais para uma rede de sensores sem fio e a interação destes com um nó móvel acoplado a um VANT. Para a criação destes nós sensores, foi desenvolvida uma biblioteca que realiza uma interface entre os rádios de baixa potência utilizados no experimento (Xbee 802.15.4) e microcontrolador MSP430 utilizado como nó sensor. Com esta rede criada, diferentes métodos de coleta de dados feitos por um VANT em uma rede de sensores sem fio foram experimentados. Os métodos são descritos e comparados entre si.

Capítulo 2

Trabalhos Relacionados

2.1 Tamanho Ótimo do Pacote

Diferentes parâmetros de configuração podem influenciar o desempenho de uma rede de sensores sem fios. O trabalho apresentado por Fu et al. [2014] questiona o fato de que, apesar de redes de sensores sem fio serem uma área extensamente estudada, ainda existem lacunas de conhecimento aprofundado sobre como os diferentes parâmetros de configuração que afetam o desempenho destas redes sob diferentes condições de qualidade de comunicação entre os nós. Portanto, foi realizado um extenso estudo experimental do desempenho do elo de comunicação entre os nós de uma rede IEEE 802.15.4, onde foram medidos dados de mais de 200 milhões de pacotes. Baseado nos dados coletados, diferentes resultados interessantes foram obtidos, com base nos quais foram sugeridos guias de parâmetros para configurações destas redes. Estes resultados indicam que diferentes parâmetros devem ser levados em consideração para diferentes qualidades do elo de comunicação entre os nós. Este resultado corrobora a suspeita de que o tamanho do pacote de rede para obter o melhor desempenho em um determinado cenário pode variar de acordo com a qualidade do elo de comunicação entre os nós. No caso em que ao menos um dos nós é móvel, como em uma rede aérea, a distância entre estes nós é um importante fator que afeta diretamente a qualidade de comunicação entre eles, devido à diminuição da potência do sinal recebido com o aumento da distância.

Estudos sobre o tamanho ótimo de pacotes para a melhoria de redes em ambientes adversos são importantes e já foram realizados para diferentes tipos de redes. O texto produzido por Yin et al. [2004] avalia o tamanho ótimo de pacote em canais suscetíveis a erros para redes sem fio que implementam o protocolo IEEE 802.11. Os autores avaliam o desempenho de transmissão Função de Coordenação Distribuída (FCD) sobre o protocolo IEEE 802.11, sob condições de tráfego pesado de pacotes e uma avaliação

sobre a influência que tem o tamanho máximo do pacote. A ideia central é encontrar o valor ideal para satisfazer o compromisso entre diminuir a sobrecarga na rede, ao aumentar o tamanho do pacote de dados, e reduzir a quantidade de pacotes perdidos ao reduzir o tamanho total do pacote. Várias simulações foram realizadas com o canal de transmissão em diferentes condições e os resultados obtidos através de simulação corroboram os resultados analíticos encontrado pelos autores. Foi demonstrado que existe sim um tamanho ótimo de pacote que maximiza a vazão de dados em cada situação de transmissão particular, e que usualmente pacotes maiores são ideais em ambientes com boas condições de transmissão. Embora ambos os protocolos IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11 sejam para redes sem fio, cada um tem um tipo diferente de rede como alvo. Os mesmos resultados não podem ser aplicados e, por conseguinte, deve ser realizado um estudo independente para o protocolo IEEE 802.15.4. O método utilizado pelos autores é uma ferramenta valiosa para ajudar no desenvolvimento de simulações e análise dos resultados.

A escolha do tamanho do pacote pode também influenciar o desempenho em redes subaquáticas como ficou caracterizado por Pompili et al. [2006]. Neste caso, uma rede de sensores sem fios de veículos subaquáticos, que podem ser utilizados para realizar tarefas, tais como a monitoração de vida marinha ou determinar um certo nível de contaminação a partir de uma região do oceano, foi modelado para um estudo da eficácia dos canais acústicos usados por esses dispositivos. Este modelo permite que o estudo realizado se concentre nas características fundamentais do ambiente de comunicação, como o tamanho ideal do pacote para aumentar o desempenho da rede, dada uma certa densidade de sensores e os requisitos das aplicações da rede. Dois algoritmos de roteamento distribuídos são introduzidos para aplicações sensíveis e insensíveis ao atraso de pacotes. O modelo desenvolvido é interessante, uma vez que esta análise também pode ser expandida para uma rede tridimensional composta por robôs aéreos.

Um estudo de desempenho de rede sem fio de casos individuais, com o protocolo IEEE 802.15.4, foi realizada por Lee [2005]. O autor projetou um ambiente crível para uma análise de desempenho preliminar deste tipo de rede. Para esta finalidade, várias experiências foram feitas para analisar diversas características da rede, incluindo o tamanho do corpo de dados para o pacote transmitido. O estudo do tamanho do pacote foi abordado apenas superficialmente. O autor avaliou apenas três tamanhos de pacotes diferentes e o efeito que a variação entre eles tem sobre a vazão de dados e a taxa de entrega. Além disso, os resultados só foram obtidos através de experimentos empíricos em um ambiente com um canal de comunicação adequado e nós estáticos, sem avaliar o impacto que a mobilidade dos nós exerce sobre o desempenho da rede.

O desenvolvimento completo de uma rede real de veículos aéreos não tripulados é

mostrado por Allred et al. [2007], onde são descritas todas as etapas de criação de uma rede composta por esses veículos aéreos e para estudar o comportamento da rede com os seus nós em movimento. Cada nó da rede possui um rádio ZigBee que implementa a camada física e Media Access Control (MAC) como definido pelo protocolo IEEE 802.15.4. O estudo caracteriza o comportamento do indicador de força do sinal recebido e o número de pacotes perdidos entre um nó no ar e outro no solo, e entre dois nós aéreos. Nesse estudo, demonstra-se que tanto a mobilidade como a distância entre os nós altera a performance de rede aéreas.

Um aspecto pouco analisado em relação a redes sem fio estáticas, mas que é de grande importância para redes de sensores, é a utilização eficiente de energia, que é escassa. Sankarasubramaniam et al. [2003] realizou um trabalho que procura otimizar o tamanho do pacote trocado pela rede, de modo a tornar mais eficiente o consumo de energia. Tendo a eficiência energética como métrica, foram realizadas várias análises com os parâmetros dos canais e do rádio variáveis, além da aplicação de diferentes tipos de correção de erros. Este trabalho demonstra que pode ser encontrado um tamanho ótimo de pacote baseado em uma diferente métrica, que não a vazão de dados dependendo de qual a prioridade momentânea da rede.

Korhonen & Wang [2005] realizam um trabalho amplo sobre o efeito que o tamanho do pacote exerce na taxa de perda de pacotes e atrasos em conexões sem fio em geral. Foi feita uma análise teórica sobre a relação entre o tamanho do pacote e a taxa de perda assim como os atrasos e como a camada de aplicação é afetada. Em seguida, são utilizados sistemas IEEE 802.11b reais para a validação dos resultados analíticos obtidos. Os resultados obtidos demonstram que em redes IEEE 802.11b que possuem uma alta taxa de transferência de bits, o tamanho do pacote não influi o suficiente na qualidade da rede. Apesar disto, o autor conclui que este não é o caso de redes sem fio com uma baixa taxa de transferência de bits.

2.2 Coleta de Dados

Grupos de redes de sensores sem fio em vastos ambientes podem, corriqueiramente, ocupar apenas determinados nichos, ou se dividirem em grupos distintos graças à falhas de algum dos nós. O trabalho apresentado por Heimfarth et al. [2014] propõe um método para aglutinar grupos separados de redes de sensores sem fios com o auxílio de um VANT para realizar a transmissão de dados entre eles. A divisão de uma rede de sensores sem fio em mais de um grupo pode comprometer a sua utilização caso estejam desconectadas. A utilização do VANT como uma mula de dados pode

estender a vida útil destas redes. O diferencial está no fato de escolher qual o grupo a ser visitado com maior frequência, baseado no tráfego de dados entre os nós de cada grupo. Esse trabalho ajuda a corroborar a importância da utilização de VANTs como mula de dados, mas pode ser expandido com a realização de experimentos empíricos, não apenas simulados, e com o estudo de qual o melhor método de coleta de dados direto entre o VANT e os nós.

Técnicas de Inteligência Artificial podem ser estendidas e utilizadas para coordenar grupos de VANTs em ambientes dinâmicos. O trabalho de Balduccini et al. [2014] apresenta uma nova aplicação para uma camada inteligente de rede para o planejamento e coordenação de VANTs em uma rede. Os cenários considerados são cada vez mais comuns a medida em que seja necessário um maior nível de autonomia para os VANTs, de modo a criar sistemas cada vez mais complexos.

As redes de sensores sem fio podem ser uma alternativa viável para diferentes aplicações que realizam coleta de dados. Como em geral elas são compostas por inúmeras unidades individuais, com uma distância relativa entre si, em geral assume-se que haja um canal de comunicação nó a nó. Apesar disto, a pesquisa realizada por Gao et al. [2011] demonstra que existem diferentes maneiras possíveis de ser realizar a coleta de dados com o auxílio de um nó da rede com mobilidade.

Sugihara & Gupta [2010] apresentam um arcabouço para a solução do problema de agendamento da mula de dados, Data Mule Scheduling (DMS). Através de experimentos em um simulador, é demonstrado que a abordagem de coleta de dados que utiliza um nó da rede com mobilidade proporciona um grande benefício sobre encaminhamento de pacotes com múltiplos saltos em termos de eficiência energética.

Os experimentos com um VANT como mula de dados realizados por Teh et al. [2008] pesquisam a viabilidade de uso de um VANT como plataforma para o transporte de dados entre nós sensores de uma rede. A análise dos dados obtidos com os experimentos de coleta de dados com um VANT foram focadas em quantificar duas métricas: a vazão de dados e a taxa de pacotes recebidos corretamente. Os resultados dos experimentos comprovam que uma plataforma de nós aéreos pode ser utilizada como um coletor de dados móveis.

O estudo da atividade vulcânica tipicamente envolve o uso de redes de sensores construídas para coletar sinais sísmicos e infrassônicos. O grupo de pesquisa Werner-Allen et al. [2006] foi um dos primeiros a estudar o uso de pequenos sensores com baixo consumo de energia em grande escala para estudos geofísicos. Durante o período de testes, a rede capturou inúmeros eventos vulcânicos, produzindo muitos dados úteis e permitiu uma análise do desempenho de redes de sensores em grande escala para a coleta de dados vulcânicos em alta resolução. O sistema transferiu os dados por

uma rede *multihop* e utilizou de um rádio de longa distância para se comunicar a um computador no laboratório. Esta rede de sensores sem fio pode ser de grande ajuda para os geólogos, pois o aumento no tamanho da rede, graças ao equipamento mais leve e de fácil. Implantação, irá ajuda a responder, com dados, questões que os equipamentos grandes, pesados e que consomem muita energia, não são capazes de responder. Este é um caso de redes de sensores sem fio em um ambiente inóspito em que o nó da rede, que emite ondas de rádio de longo alcance, poderia ser substituído por um pequeno VANT que se locomovesse até o local da rede em questão, coletasse os dados obtidos pelos nós sensores e retornasse ao laboratório com a informação.

O trabalho de Vasilescu et al. [2005] desenvolve um método de comunicação híbrido para redes submarinas, ao utilizar dois meios diferentes para a comunicação entre nós e utilizar um nó móvel como mula. Modelos de transmissão com um nó móvel como o em questão podem ser extrapolados para outros ambientes como o terrestre e aéreo. Apesar de nós sensores poderem realizar uma comunicação com uma torre de celular, caso haja cobertura, ou com satélites, a energia por bit consumida para realizar estas operações é muito maior do que a necessária para a transmissão entre nós padrão da rede. Portanto, redes de sensores que monitoram regiões inóspitas ou isoladas podem se utilizar de um nó móvel como mula para realizar a coleta de dados, sem precisar aumentar o consumo de energia médio, aumentando assim a vida útil dos nós em suas posições e sem requerer manutenção.

O estudo realizado por Oh et al. [2007] avalia o desafio matemático de jogos de busca e evasão, Pursuit-Evasion Game (PEG), onde o objetivo de um grupo de perseguidores é alcançar e capturar um grupo de fugitivos, em um tempo mínimo com a ajuda de uma rede de sensores. O desafio principal em desenvolver um sistema de controle em tempo real, utilizando redes de sensores, diz respeito à inconsistência nas medidas realizadas pelos sensores devido à perda de pacotes, atraso nas comunicações e falsas detecções. Redes de sensores sem fios são úteis em aplicações que requeiram localização e rastreamento em tempo real de alvos em movimento. Exemplos típicos incluem operações de busca e salvamento, sistemas de vigilância civis, missões de busca e captura de missões em cenários militares e outros. A análise e o planejamento destas aplicações normalmente são realizadas utilizando o arcabouço de um PEG, que é uma abstração matemática que resolve o problema do controle de um conjunto de agente em perseguição a um ou mais alvos. O maior desafio para se desenvolver um sistema de controle em tempo real, que se utiliza de redes de sensores sem fio, está em fornecerem uma visão global de um ambiente e não fornecem medidas de qualidade em curtos espaços de tempo devido à perda de pacote, atraso nas comunicações e falsas detecções. Para solucionar estes problemas, o sistema desenvolvido com este estudo realiza uma

fusão de múltiplas camadas de dados e converte os dados não trabalhados dos sensores em uma representação compacta e consistente que pode ser transmitida periodicamente. As maiores contribuições obtidas foram: um controle hierárquico em tempo real para rastreamento de alvos que utiliza redes de sensores sem fio, uma demonstração de uso deste sistema em uma rede de sensores em larga escala e três novos algoritmos desenvolvidos para o sistema. Esta rede desenvolvida pelos pesquisadores pode ser melhorada com a adição de um nó móvel, que realiza um *broadcast* com a informação de seu Global Positioning System (GPS) e os nós no solo podem utilizar esta informação para calibrar as posições previamente inferidas.

Um sistema para a localização de nós de redes subaquáticas com o auxílio de um Veículo Subaquático não Tripulado (VSNT) foi desenvolvido por Erol et al. [2007]. O sistema proposto explora a mobilidade do VSNT para determinar a posição dos nós sensores que não podem determinar sua própria posição já que sinais de GPS não se propagam bem sob a água. Neste sistema proposto, um VANT obtém a sua localização através de um GPS enquanto estiver sobre a água e então segue uma trajetória predefinida entre os nós sensores. Durante o percurso, o VSNT envia uma mensagem para obter o intervalo de tempo de ida e volta desta mensagem, de cada um dos nós. Assim, é então estimada a distância do nó para todos os outros nós da rede. Com a distância estimada e com os algoritmos de triangulação ou *bound in box* foi possível inferir as coordenadas dos nós sensores. Este trabalho realizado para redes subaquáticas pode ser estendido para a localização de nós sensores implantados em posições aleatórias e que não possuem um módulo de GPS.

Os nós sensores de redes subaquáticas possuem um módulo de GPS, eles precisam de ascender até a superfície para obter a sua posição atual. Caso estes nós estejam localizados em um ambiente com água corrente eles podem se deslocar ao longo do tempo, e portanto para acompanhar a posição de todos nós é preciso que periodicamente eles ascendam à superfície para se localizar, mas este processo é muito custoso. Erol et al. [2008] desenvolveram um esquema multiestágios para estimar a posição de todos os nós em que alguns ascendem a superfície para obter sua posição em um primeiro estágio e se tornam referência para a localização dos nós restantes não localizados nos estágios seguintes. Este esquema busca utilizar a menor quantidade de nós de referência possíveis, mantendo uma acurácia adequada com o foco na redução de custos operacionais. O esquema apresentado possui o potencial de ser integrado a um processo para a localização de nós sensores implantados aleatoriamente com o auxílio de VANTs que substituiriam os nós referência.

Capítulo 3

Métodos e Materiais

3.1 Software

3.1.1 Protocolo IEEE 802.15.4

O padrão IEEE 802.15.4 foi desenvolvido pelo IEEE como um protocolo que ofereça a implementação das camadas inferiores de rede sem fio com foco em baixo custo, baixa velocidade, comunicação ubíqua entre dispositivos e baixo consumo de energia.

A principal característica do IEEE 802.15.4 é a possibilidade do custo extremamente baixo de fabricação, operação e simplicidade tecnológica, sem sacrificar flexibilidade ou generalidade.

Dispositivos que implementam o IEEE 802.15.4 podem utilizar uma de três faixas de frequência possíveis para a operação (868/915/2450 MHz).

3.1.2 Simulador Castalia

Castalia Boulis [2009] é um simulador para redes de sensores sem fio, redes sem fio de baixo consumo em geral para dispositivos embarcados. É baseado na plataforma OMNeT++ e utilizado por pesquisadores para testar realisticamente: algoritmos e protocolos em um ambiente com um canal sem fio, modelo de radio e comportamento do nó.

O simulador Castalia foi escolhido devido a sua aplicabilidade a canais de comunicação de redes sem fio, modelo de rádios e comportamento reais dos nós.

3.1.3 Java Xbee-API

A biblioteca Java Xbee-API Rapp [2008] é utilizada para realizar a comunicação entre um computador e um módulo XBee/XBee-Pro 802.15.4 e ZB/ZigBee Pro. Ela provê uma Application Programming Interface (API) de com interação flexível e de uso simples.

3.2 Hardware

3.2.1 AscTec *Hummingbird*

O VANT utilizado foi o quadrotor AscTec *Hummingbird* (Figura 3.1). O *Hummingbird* possui uma estrutura resistente, as hélices flexíveis toleram aterrissagens mais ríspidas e a sua estrutura simples permite fácil manutenção. Este quadrotor é um veículo interessante para ser utilizado como ferramenta de pesquisa que exija controle de voo. Apesar dos sistemas de controle de voo embarcados no quadrotor, em testes práticos, foi possível observar que ele é muito suscetível às intempéries da natureza como ventos fortes e chuvas.



Figura 3.1: Quadrotor AscTec Hummingbird

3.2.2 Xbee 802.15.4

Os módulos de rádio utilizados que implementam o protocolo IEEE 802.15.4 foram os rádios Xbee 802.15.4 XBee & DigiMesh [2010], ilustrados na Figura 3.2. Os rádios possuem uma antena chicote de aproximadamente 2,5 cm de comprimento. São módulos para soluções embarcadas e proveem conectividade sem fio ponto a ponto. Foram projetados para aplicações de grande vazão de dados e que exigem baixa latência. As topologias de rede suportadas por este módulo são ponto a ponto, ponto a vários

pontos e par a par. As especificações do módulo utilizado informadas pelo fabricante são exibidas na Tabela 3.1:

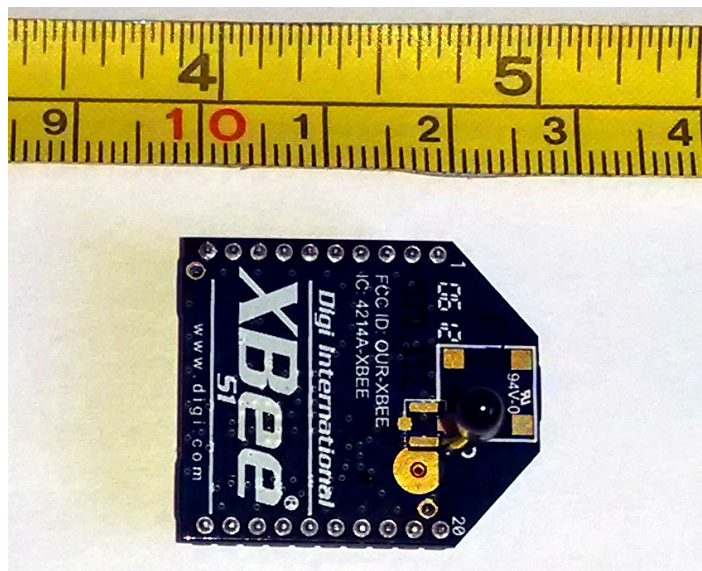


Figura 3.2: Foto referente ao modelo de rádio utilizado nos experimentos

Tabela 3.1: Especificações do rádio Xbee 802.15.4 informadas pelo fabricante

Parâmetro	Valor
Potência de saída	1mW (+0 dBm)
Alcance interior ou em ambientes urbanos	até 30 m
Alcance ao ar livre	até 90 m
Sensibilidade do receptor	-92 dB
Taxa de transmissão de dados	250 Kbps
Frequência de operação	2.4 GHz
Tipo de espalhamento espectral	DSSS

3.2.3 TI MSP430 e *Launchboard*

O microcontrolador utilizado para fazer a interface com o módulo de rádio Xbee e então criar o nó sensor foi o Texas Instruments (TI) MSP430. Ele é um microprocessador Reduced Instruction Set Computer (RISC) de 16-bit MSP430g2553 Instruments [2014] instalado em uma TI *Launchboard*, como ilustrado na Figura 3.3. Acoplado à *Launchboard* se encontra o rádio de baixa potência Xbee 802.15.4 (Figura 3.2). Para uma integração bem sucedida entre os componentes citados, foi desenvolvida também nesta dissertação uma pequena biblioteca que realiza a interface entre o Xbee 802.15.4 e o MSP430g2553.

O nó sensor da rede desenvolvida é composto pelo microcontrolador MSP430g2553 Instruments [2014] instalado em uma TI *Launchboard* como ilustrado na Figura 3.3.

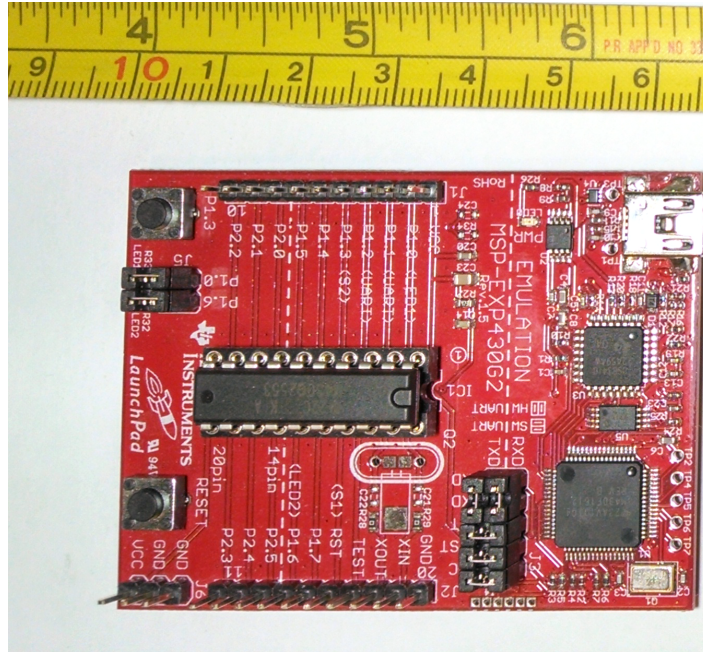


Figura 3.3: LaunchPad e MSP430

3.3 Decisões de implementação do Nó Sensor

O funcionamento real de rede de sensores idealizada depende diretamente das limitações do hardware selecionado. A seguir, são esclarecidas as decisões de implementação baseadas nestas limitações.

Comunicação Serial Para o nó sensor se comunicar com o rádio acoplado a ele e a um computador externo para a coleta de dados obtidos no experimento, foi utilizada comunicação serial Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART). A comunicação serial UART é composta por um circuito integrado que contém os circuitos de transmissão e recepção necessários para que comunicações seriais assíncronas sejam realizadas simultaneamente.

Comunicação a um computador externo Este módulo foi desenvolvido para coletar os dados finais obtidos por cada um dos nós durante o experimento. Para a comunicação serial com um computador, foi utilizado o módulo UART implementado via hardware no conjunto MSP430 e Launchboard. Este módulo de UART via hardware utiliza os

pinos P1.1 para a recepção de bits e P1.2 para a transmissão de bits e este está limitado a um *baud rate* de 9.600 bps. Um *baud rate* de 9.600 bps significa que este método de comunicação consegue transmitir 9.600 bits em um intervalo de um segundo.

Comunicação entre o microcontrolador e o rádio Para a comunicação serial entre o MSP430 e o Xbee foi desenvolvido um módulo que utiliza a comunicação serial UART implementada por software. Para isto, foram utilizados os pinos P2.0 para a recepção de bits e P2.1 para a transmissão de bits. Estes dois pinos estão associados ao Timer1 do microcontrolador. Com a utilização deste relógio, foi possível definir as interrupções necessárias para captar e transmitir um bit. Ao contrário do UART via hardware, o método de UART via software não é necessariamente limitado a uma *baud rate* de 9.600 bps. Entretanto para manter a recepção e transmissão de bits confiáveis em processador com o clock estabelecido em 16MHz foi mantida a *baud rate* de 9.600 bps. Caso a *baud rate* fosse aumentada, o processador não teria tempo hábil para realizar todas as ações necessárias pelo nó sensor e receber ou transmitir os bits com segurança.

Armazenamento de dados Para armazenar os dados coletados durante o experimento, foi utilizada a memória flash embarcada no MSP430. A Figura 3.4 ilustra a distribuição desta memória. O microcontrolador possui 16KB de memória flash divididos em segmentos de 512 bytes. Esta mesma memória flash é utilizada pelo microcontrolador para armazenar o código a ser executado e seus códigos de interrupção. Para uma operação segura, nenhum destes segmentos já utilizados pelo microcontrolador devem ser sobrescritos. Portanto foi decidido que seria utilizado o espaço de memória compreendido pelo intervalo entre os segmentos 2 e 15. Estes segmentos correspondem a um espaço de armazenamento de 6.656 bytes.

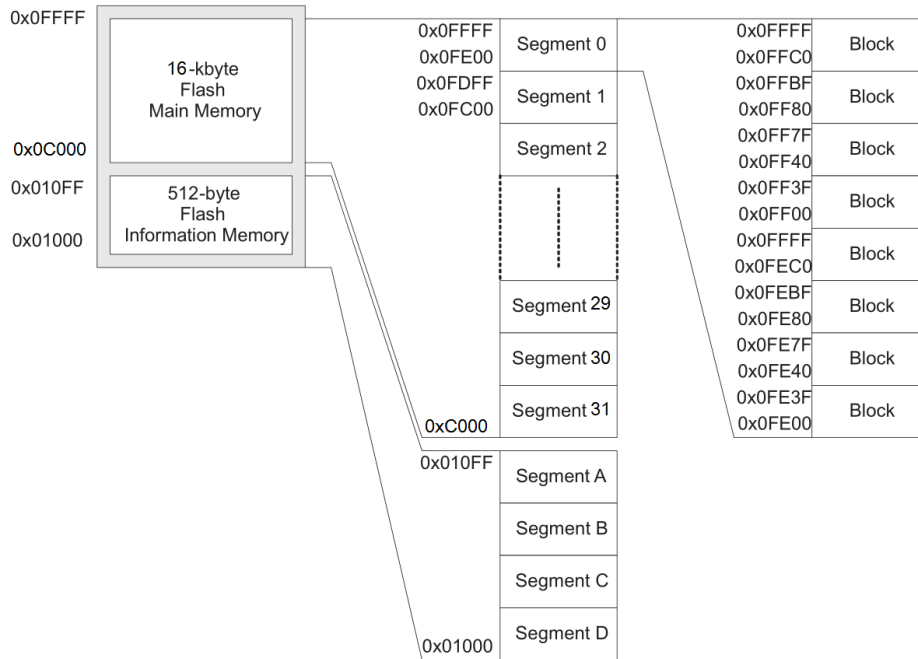


Figura 3.4: Distribuição da memória embarcada no MSP430g2553.

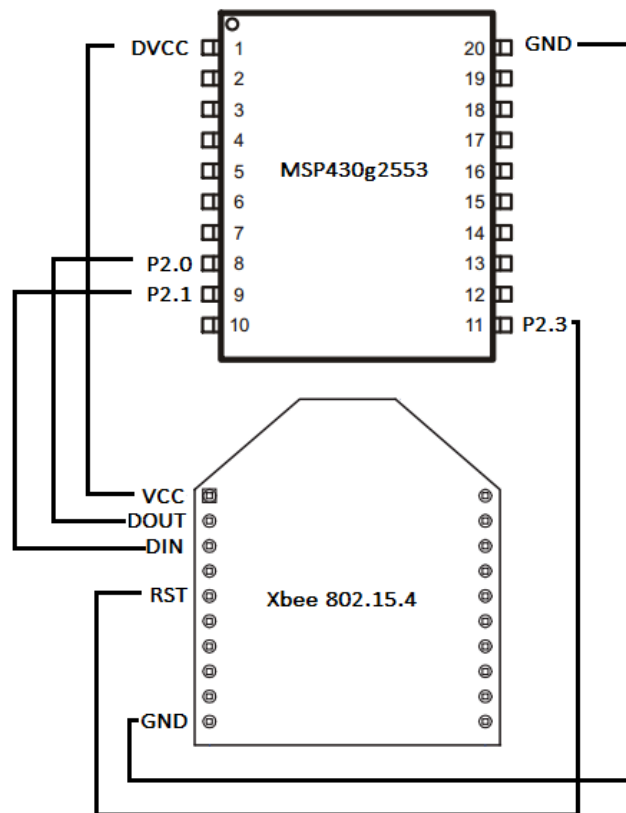


Figura 3.5: Esquema que ilustra as conexões entre o MSP430 e o Xbee

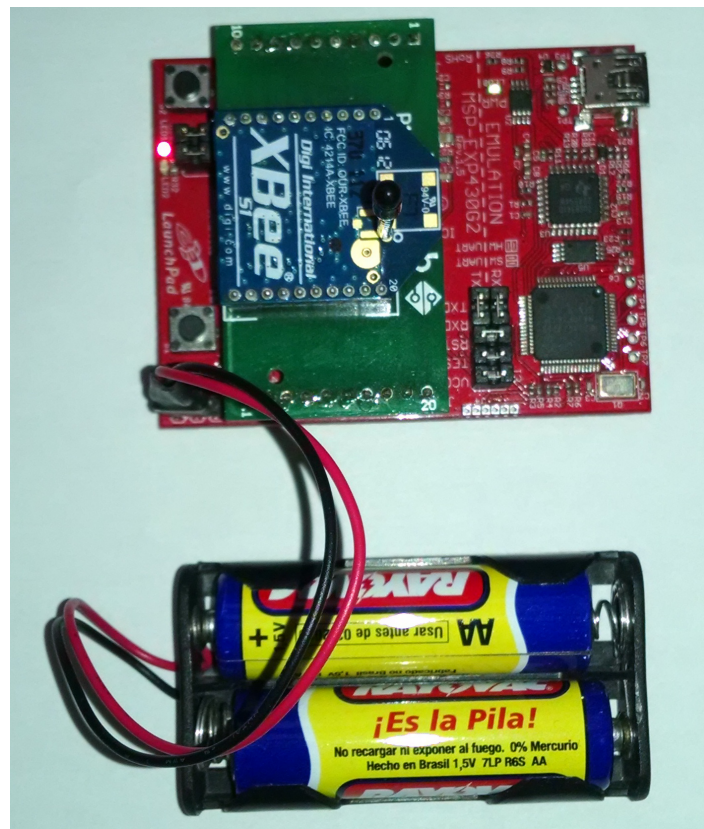


Figura 3.6: *LaunchPad* e Xbee conectados com o auxilio de uma *breadboard*

Capítulo 4

Tamanho Ótimo do Pacote

O problema sob análise será abordado utilizando-se modelo analítico, simulação computacional e a realização de experimentos em campo, visando, com esta última etapa, validar os dados simulados.

Vários fatores podem afetar o tamanho ótimo do pacote em uma rede. A quantidade de ruído no ambiente pode diminuir a intensidade do sinal recebido. A trajetória que um pacote deve percorrer, possivelmente aumentando a quantidade de vezes em que ele deve ser retransmitido. A presença de outros elementos na mesma rede com a necessidade de se comunicar simultaneamente (Figura 4.1) pode reduzir consideravelmente a vazão de dados.

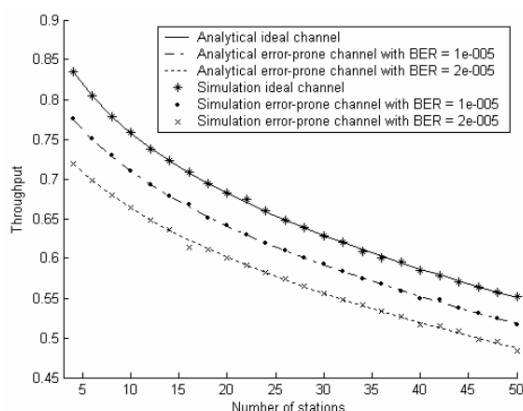


Figura 4.1: Vazão de dados por número de nós. Fonte: Yin et al. [2004]

Neste capítulo, avalia-se exclusivamente o elo de comunicação direto entre dois nós de uma rede. A eficiência da rede para diferentes tamanhos de pacotes é avaliada em um cenário em que apenas a distância entre os nós é variada. O foco está na melhoria do desempenho da comunicação entre cada par de nós de uma rede.

4.1 Teoria e Modelos

4.1.1 Modelos de Propagação

O canal de transmissão de uma rede sem fios utilizado pelos nós transmissor e receptor pode ser modelado por alguns parâmetros importantes. Os parâmetros variam bastante, de acordo com o ambiente. Entretanto eles pode ser caracterizados como descrito a seguir (Goldsmith [2005]).

Dependência da distância: Como a força do sinal diminui de maneira inversamente proporcional ao quadrado da distância entre os nós, a distância é um fator importante a ser considerado.

Desvanecimento de grande escala: Ocorre sobre grandes áreas que possuem obstrução de terreno como aquelas onde se tem edifícios e vegetação.

Desvanecimento em pequena escala: Gera uma grande variação em um percurso de meio comprimento de onda e é causado por multipercurso e deslocamento dos rádios.

A comunicação entre rádios de baixa potência abordada nesta dissertação leva em consideração apenas a dependência da distância, pois é considerado que os nós se encontram em um ambiente ideal. A seguir, apresenta-se uma breve descrição de dois importantes modelos de propagação do sinal:

4.1.1.1 Modelo de Dois Raios

No modelo de dois raios, considera-se que a antena de recepção vê um sinal de caminho direto e um sinal refletido da terra. O sinal refletido possui um atraso em relação ao sinal que percorreu o caminho direto e, como consequência, pode se adicionar ao sinal direto de forma construtiva (em fase) ou destrutiva (fora de fase).

A equação para o modelo de dois raios pode ser descrita na Equação 4.1 :

No modelo de dois raios, P_r corresponde à potência do sinal recebido, P_t à potência do sinal transmitido, G ao ganho das antenas, h_t e h_r são as alturas das antenas dos rádios transmissor e receptor em relação ao solo e d é a distância entre as duas antenas.

Este é um bom modelo para rádios com grandes distâncias entre si mas não é bom modelo para curtas distâncias, como pode ser visto na Figura 4.3, já que a adição construtiva e destrutiva do sinal faz com que o valor da força do sinal recebido oscile de uma maneira irreal .

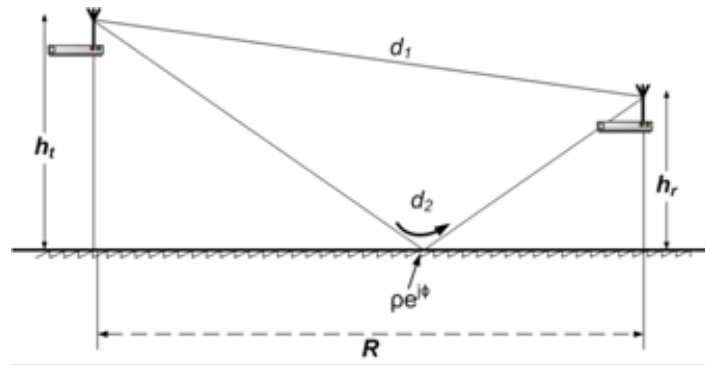


Figura 4.2: Modelo de uma transmissão com dois raios

$$|P_r| = P_t \frac{G h_t^2 h_r^2}{d^4} \quad (4.1)$$

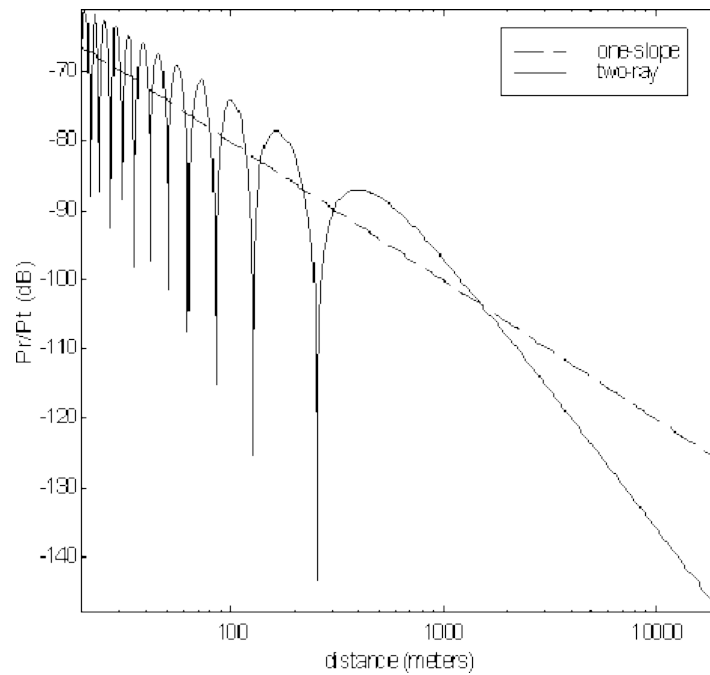


Figura 4.3: Perda dois raios e perda no espaço livre

4.1.1.2 Modelo Espaço Livre

O modelo de espaço livre, também conhecido como a Fórmula de Friis (equação 4.2), estima a força de transmissão entre os nós como a função da distância de separação d .

$$P_r = P_t G_r G_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (4.2)$$

Na fórmula de Friis, P_r corresponde à potência do sinal recebido, P_t à potência do sinal transmitido, G_r e G_t são os ganhos das antenas correspondentes aos rádios

transmissor e receptor, λ é o comprimento de onda do sinal transmitido e d é a distância entre as duas antenas.

4.1.2 Análise Teórica

4.1.2.1 Definição do problema

Como já descrito, pretende-se, nesta dissertação, analisar o impacto real que o tamanho máximo do pacote pode exercer sobre a eficiência de utilização do canal de redes aéreas com rádios de baixa potência e utilizar o modelo proposto para encontrar o valor ideal para o tamanho do pacote em relação a distância entre os rádios.

Assim, de modo a caracterizar fisicamente o problema, considerar-se-á que d é o valor da distância entre dois rádios, L_P o tamanho total do pacote de transmissão e $n(d, L_P)$ a equação que determina o valor da eficiência de utilização do canal de comunicação. O problema consiste em encontrar o valor de L_P que maximiza $n(d, L_P)$ para todo valor de d .

4.1.2.2 Modelo Analítico

Para analisar o valor do tamanho ótimo do pacote, o modelo analítico considera uma comunicação entre dois nós. O valor do tamanho máximo do pacote e o da distância entre os nós são variáveis neste modelo. Uma transmissão só será considerada válida se não houver erros na transmissão do pacote com os dados e do pacote de reconhecimento, Acknowledgement (ACK).

Nesta dissertação, assume-se que a única perda de energia do sinal é devida à sua propagação, de modo que a potência recebida (P_r) por um nó de rádio pode ser descrita pela Equação 4.2. Este modelo de propagação de sinal foi escolhido pois, em uma comunicação ideal entre dois VANTs, não há nenhum obstáculo obstruindo a comunicação e, como estes são aéreos, também não há interferência gerada pela proximidade do solo. Uma vez que este modelo deve reproduzir o comportamento do rádio utilizado nos experimentos em campo, os valores para (P_t) potência transmitida, (G_r) ganho da antena do receptor e (G_t) ganho da antena do transmissor, assim como a taxa de bits errados, são os valores padrões para um rádio Xbee 802.15.4 XBee & DigiMesh [2010].

A taxa de bits errados para este modelo pode ser definida pela Equação 4.3. Esta é a fórmula teórica para a taxa de erro de bits, para rádios com a modulação Quadrature Phase-Shift Keying (QPSK) Rappaport et al. [1996].

$$b_e = Q\left\{\sqrt{\frac{2 * E_b}{N_0}}\right\} \quad (4.3)$$

O valor de $\frac{E_b}{N_0}$ na Equação 4.3 corresponde ao valor da energia de bit por densidade de ruído espectral. A energia de bit é calculada como o valor da potência de transmissão sobre a taxa de transmissão de bits ($E_b = \frac{P_t}{b}$). Já o valor do ruído espectral é obtido calculando-se o valor da potência de transmissão por largura de banda.

Obtido o valor da taxa de erro de bit, é possível calcular a taxa de pacotes errados com a Equação 4.4. Para garantir que os pacotes com informações e ACK foram recebidos corretamente, o valor de N equivale à quantidade total de bits transmitidos, que é igual à soma do comprimento do pacote de informação com o comprimento do pacote ACK.

$$p_e = 1 - (1 - b_e)^N \quad (4.4)$$

Com base no valor da taxa de erro de pacote, é calculado o valor médio de vezes que um pacote deve ser enviado para que ele possa ser recebido corretamente. Este valor é obtido com a Equação 4.5.

$$N_{tx} = \frac{1}{1 - p_r} \quad (4.5)$$

Para obter o valor da eficiência do canal para cada tamanho de pacote, foi utilizada a Equação 4.6 referente à eficiência de utilização do canal, como inicialmente descrito em Pompili et al. [2006]. Entretanto com o meio de transmissão adaptado para redes aéreas.

$$n(d, L_P^D) = \frac{L_P^D}{N_{tx} * (L_P^D + L_P^H + L_P^A + b * (2 * \frac{d}{q} + T_P^{rx-tx}))} \quad (4.6)$$

4.1.2.3 Tamanho ótimo do pacote

Para obter o tamanho ótimo do pacote, a Equação 4.6 foi maximizada para incrementos de distância, de um em um metro, até não haver mais a transmissão de pacotes entre os nós.

Na Equação 4.6 (L_P^D) simboliza o tamanho dos dados de informação contidos no pacote em bits, (N_{tx}) o número médio de transmissões para a recepção de um pacote,

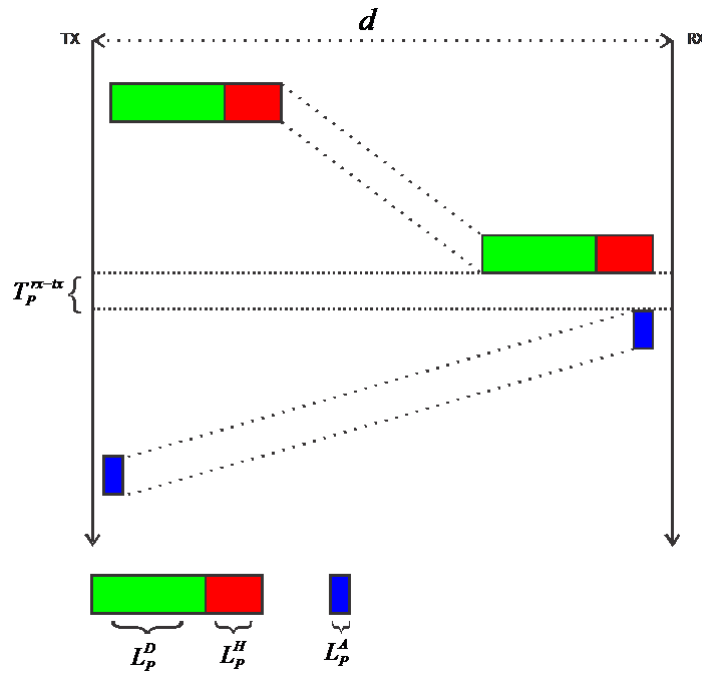


Figura 4.4: Modelo de transmissão de pacotes de acordo com a Equação 4.6

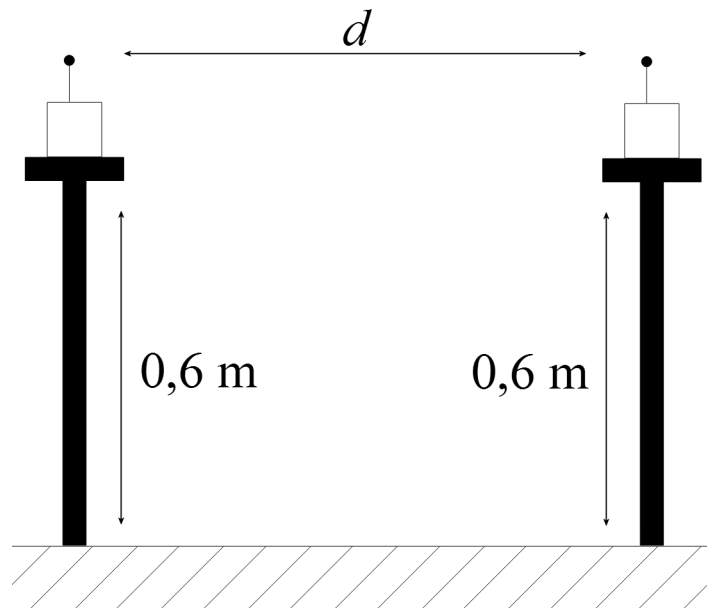


Figura 4.5: Esquema da disposição dos rádios durante o experimento

(L_p^H) o tamanho do cabeçalho do pacote em bits, (L_p^D) o tamanho do pacote ACK em bits, (b) a taxa de transmissão em bits por segundo, (d) a distância entre os nós em metros, (c) a velocidade de propagação do sinal em metros por segundo e (T_p^{rx-tx}) o intervalo de tempo que o rádio precisa para receber um pacote e alterar do modo de recepção para o modo de transmissão.

Dados: $d, N_{tx}, L_P^H, L_P^A, b, q$
 Encontrar: L_P^D
 Maximizar: $n(L_P^D, d) = \frac{L_P^D}{N_{tx} * (L_P^D + L_P^H + L_P^A + b * (2 * \frac{d}{q} + T_P^{rx-tx}))}$
 Sujeito a: $1 \geq L_P^D \leq 100$

Para representar corretamente um rádio Xbee 802.15.4, os parâmetros para a Equação 4.2 foram os apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Parâmetros da equação 4.2

Símbolo	Significado	Valor
P_t	Potência de transmissão	0 dbm
G_r	Ganho da antena receptora	1
G_t	Ganho da antena transmissora	1
λ	Velocidade de propagação / Frequência	$3e8/24e8$
r	Distância	Variável

O ruído ambiente utilizado para calcular o valor teórico da taxa de erro de bits na Equação 4.3 foi o valor médio de -100 dBm , que é plausível para uma largura de banda de 2 MHz em um ambiente com pouca interferência, de acordo com Rappaport et al. [1996] .

A eficiência de utilização do canal considera não apenas os bits de dados úteis que estão sendo transmitidos, mas também os bits de dados para gerenciar o uso do canal, que consistem nos cabeçalhos dos pacotes de informação e dos pacotes de reconhecimento, ACK. Por definição, assume se um canal sem ruído, pois de outra maneira, a vazão de dados não seria unicamente associada à eficiência do protocolo, mas também às retransmissões resultantes da qualidade do canal. Para a Equação 4.6, a eficiência foi obtida com os parâmetros descritos na 4.2.

Tabela 4.2: Parâmetros do modelo da Eficiência de utilização do canal

Símbolo	Significado	Valor
L_d	Tamanho do corpo de dados	Variável (bits)
N_{tx}	Proporção entre pacotes recebidos e perdidos	variável de acordo com a distância d
L_h	Tamanho do cabeçalho do pacote	25 bits
L_a	Tamanho do pacote ACK	7 bits
b	Taxa de Dados	256.000 bps
d	Distância	Variável (metros)
c	Velocidade de propagação da onda	$3e8$ m/s

4.1.2.4 Resultados Analíticos

Com a utilização do modelo analítico, foi possível obter o valor ótimo para o corpo de dados do pacote a cada variação de distância (d). A distância máxima de comunicação obtida pelo modelo foi 60 metros. Portanto d variou entre 1 e 60 metros.

Na Figura 4.6, é possível visualizar algumas das curvas obtidas para a eficiência de utilização do canal por tamanho do corpo de dados do pacote. O valor máximo para o corpo de dados no protocolo IEEE 802.15.4 é de 100 bytes. No entanto, este valor foi extrapolado nessa Figura para melhor visualizar o comportamento da curva. A Figura 4.7 é um recorte da Figura 4.6. Nela é possível verificar que Variável o tamanho do corpo de dados que maximiza a curva só deixa de ser o valor máximo após uma distância de 6 metros.

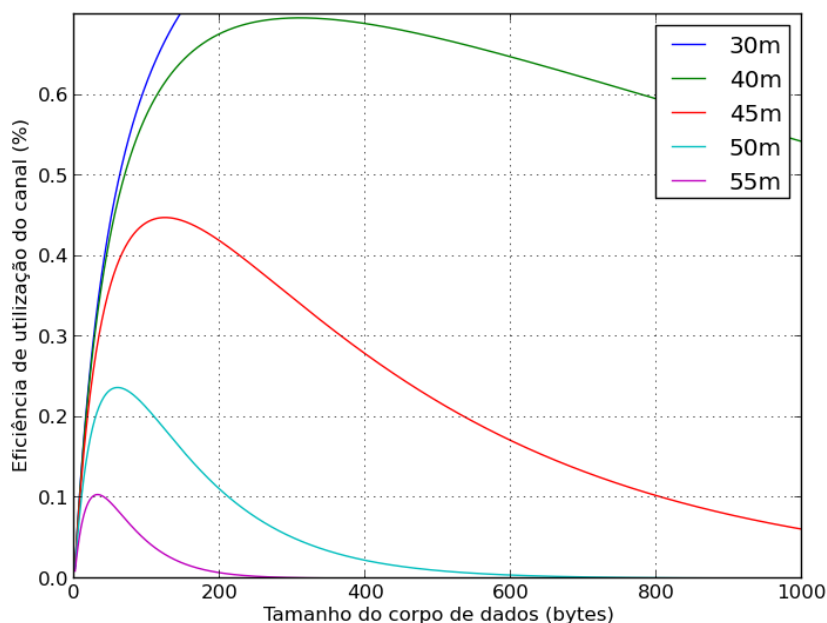


Figura 4.6: Resultados Teóricos da Eficiência de utilização do Canal por tamanho do corpo de dados do pacote para distâncias entre os nós de 30, 40, 45, 50 e 55 metros - Tamanho do corpo de dados variando de 1 a 1000 bytes

Na Figura 4.8, apresenta-se um gráfico com o melhor tamanho possível de corpo de dados por distância. Isto significa que, para obter a melhor utilização do canal, o tamanho máximo do corpo de dados deve ser o informado para cada distância. Pelo modelo, o melhor tamanho de corpo de dados é o máximo até os 46 metros de distância. A partir desta dessa distância, torna-se mais vantajoso reduzir o tamanho do corpo de dados, por conseguinte reduzindo o tamanho total do pacote e aumentando assim a

eficiência de utilização do canal.

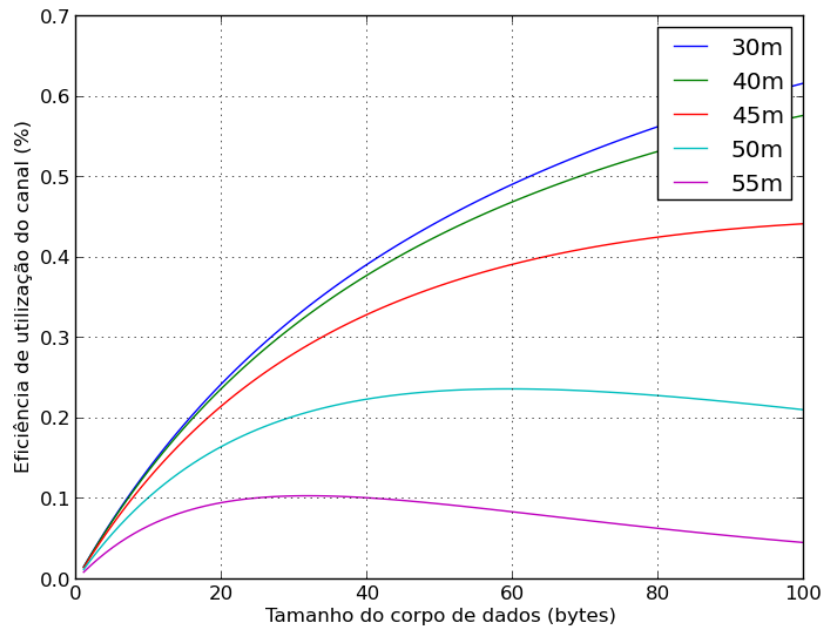


Figura 4.7: Resultados Teóricos da Eficiência de utilização do Canal por tamanho do corpo de dados do pacote para distâncias entre os nós de 30, 40, 45, 50 e 55 metros - Tamanho do corpo de dados variando de 1 a 100 bytes

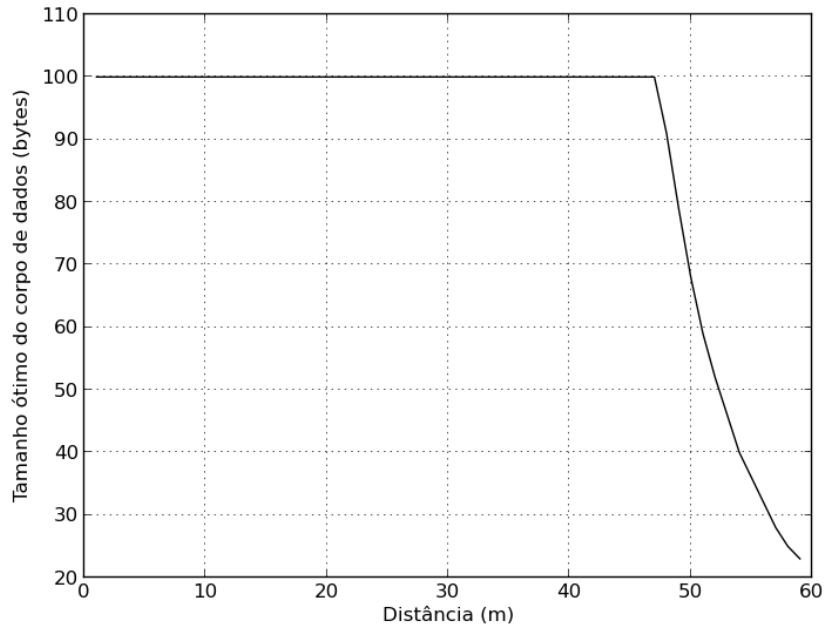


Figura 4.8: Tamanho de corpo de dados ótimo por distância - Resultado analítico

4.2 Análise de Simulação

4.2.1 Simulação

Para simular o experimento, foi utilizado o simulador Castalia Boulis [2009]. Este simulador foi escolhido devido a sua aplicabilidade realista a canais de comunicação de redes sem fio, modelos de rádios e comportamento dos nós.

O simulador foi configurado com nós de rede com os parâmetros de um rádio equivalente ao Xbee 802.15.4. Os valores estabelecidos para reproduzir o hardware do Xbee 802.15.4 no simulador estão descritos na 4.3. Como é possível alterar o canal de comunicação no simulador Castalia, o valor do expoente de *path loss* foi definido como 2 para que o canal de comunicação se assimile a um modelo de espaço livre.

Nos cenários simulados, dois nós foram posicionados separadamente a uma distância predeterminada. Um dos nós envia os pacotes com a informação e o segundo nó recebe os pacotes e retorna o pacote ACK. Durante a simulação, o tamanho do corpo de dados enviado pelo primeiro pacote é incrementado de um em um byte a cada 100 segundos. As medições são feitas, variando-se a distância entre os rádios, em incrementos crescentes de cinco metros até um momento em que o segundo rádio não receba mais nenhum pacote. Os rádios simulados se encontram a uma altura de 60 centímetros do solo. A cada execução do simulador, foram enviados 500 pacotes

Tabela 4.3: Parâmetros chave para a simulação do rádio

Parâmetro	Valor
Taxa de dados	10 kbps
Tipo de modulação	PSK
Bits por símbolo	4
Largura de banda	2MHz
Largura de banda do ruído	2.3 MHz
Sensibilidade	-92 dBm
Potência de transmissão	0 dBm

com o tamanho do corpo de dados variando entre 1 e 100 bytes. Foram realizadas 30 simulações para cada valor diferente de distância. Com os valores da taxa de erro de pacote obtida com a simulação, foi calculada a eficiência média de utilização do canal para cada ponto, com um intervalo de confiança de 95%.

4.2.2 Resultados da Simulação

Nas Figuras 4.10 e 4.11, são mostrados os resultados da simulação dos cenários com dois rádios Xbee 802.15.4, separados por distâncias de 35 e 40 metros. A partir da simulação, obteve-se a quantidade de pacotes enviados e recebidos com sucesso. Com estes dados, foi possível calcular a taxa de pacotes errados e o valor médio que um pacote deve ser enviado para que ele possa ser recebido sem erros. Este valor foi utilizado para calcular a eficiência de utilização do canal. A diminuição da perda de eficiência de utilização do canal que se pode ser observada nas Figuras 4.10 e 4.11 corrobora os resultados experimentais, onde a perda de pacote só passou a ser notada e influenciar o valor da eficiência de utilização do canal após os 35 metros.

Na Figura 4.15, ilustra-se o valor para o tamanho de corpo de dados ótimo por distância, obtido através da simulação. Assim como os valores obtidos com o modelo analítico, o tamanho ótimo é sempre o maior tamanho possível até os 35 metros. Como o simulador Castalia reproduz as características de um canal de comunicação real, a perda de força do sinal na simulação é maior do que a reproduzida pelo modelo analítico. Este é o motivo pelo qual o valor para o tamanho ótimo do corpo de dados obtido através de simulação varia antes dos 46 metros estipulados pelo modelo analítico.

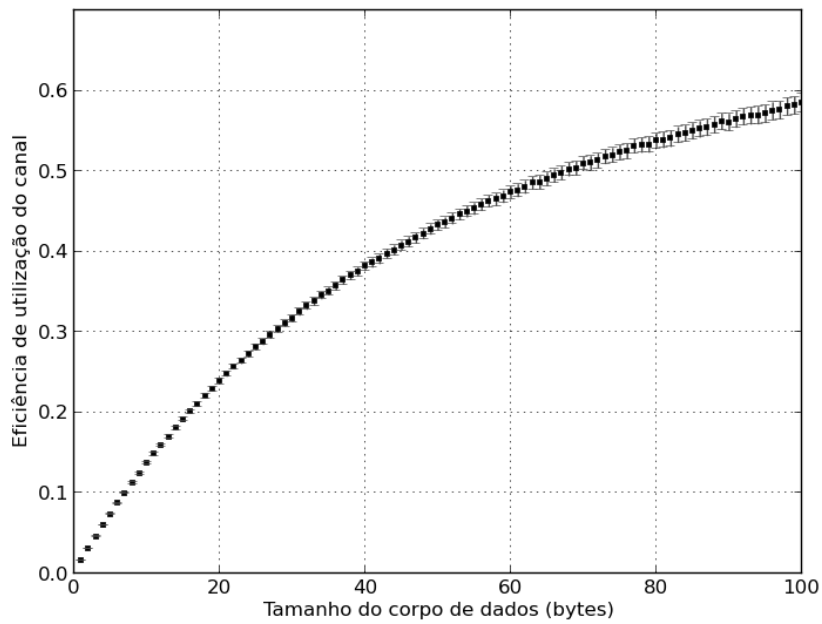


Figura 4.9: Resultados obtidos com o simulador para eficiência de utilização do canal por tamanho do corpo de dados - Nós separados a 30 metros

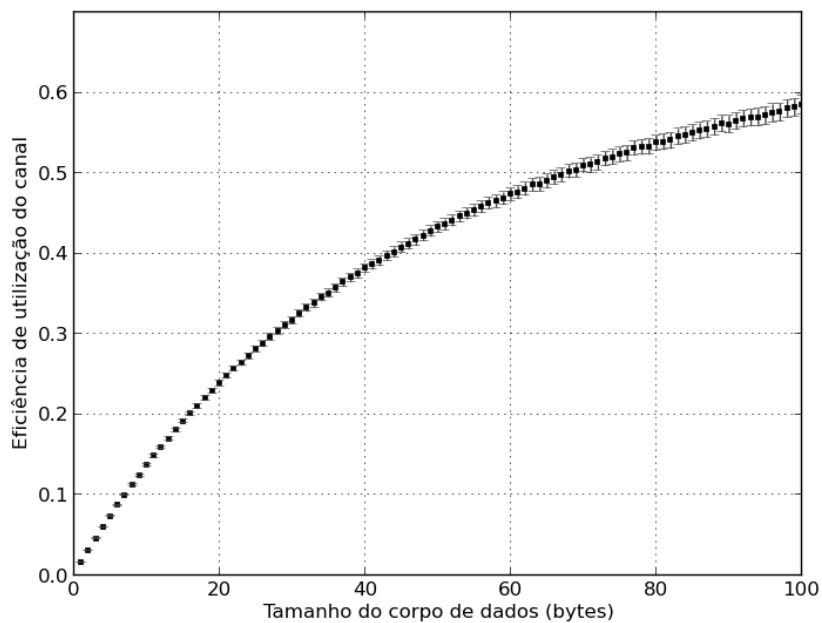


Figura 4.10: Resultados obtidos com o simulador para eficiência de utilização do canal por tamanho do corpo de dados - Nós separados a 35 metros

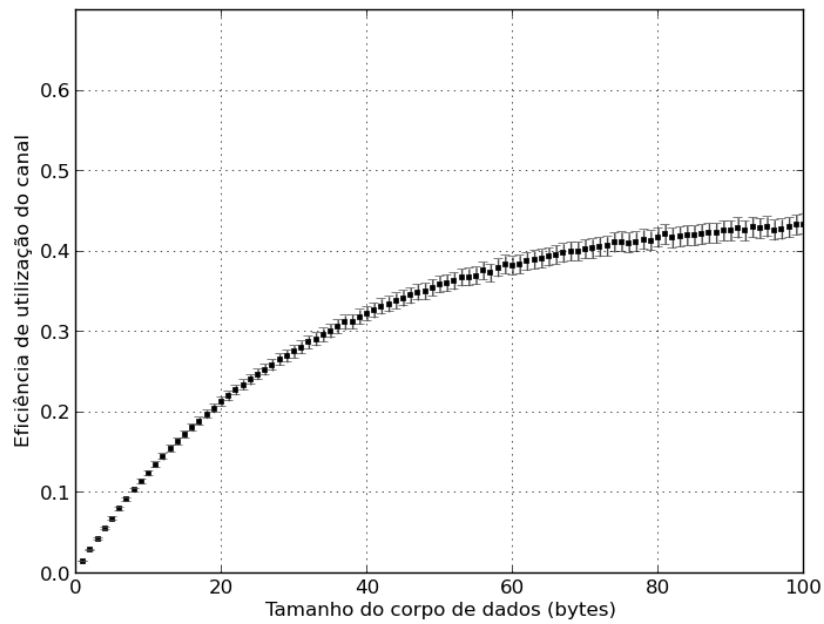


Figura 4.11: Resultados obtidos com o simulador para eficiência de utilização do canal por tamanho do corpo de dados - Nós separados a 40 metros

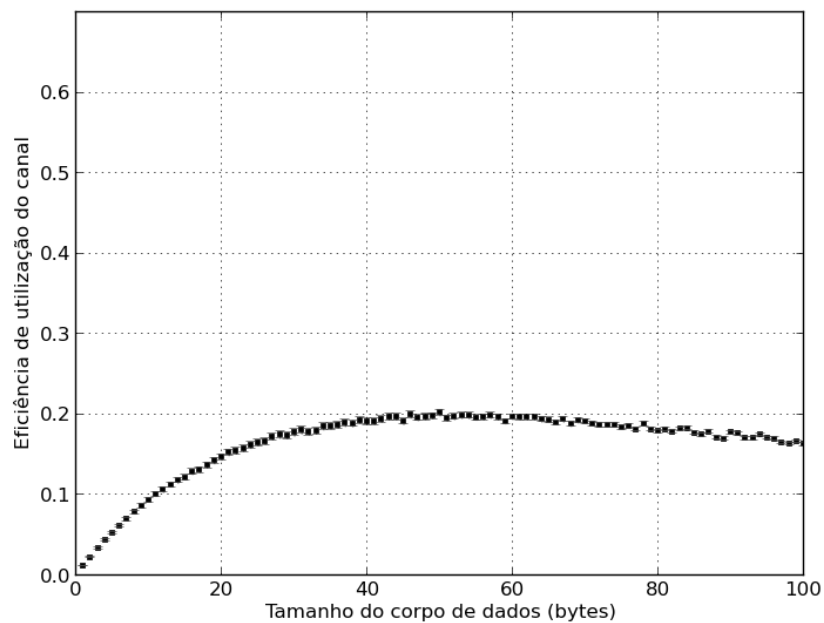


Figura 4.12: Resultados obtidos com o simulador para eficiência de utilização do canal por tamanho do corpo de dados - Nós separados a 45 metros

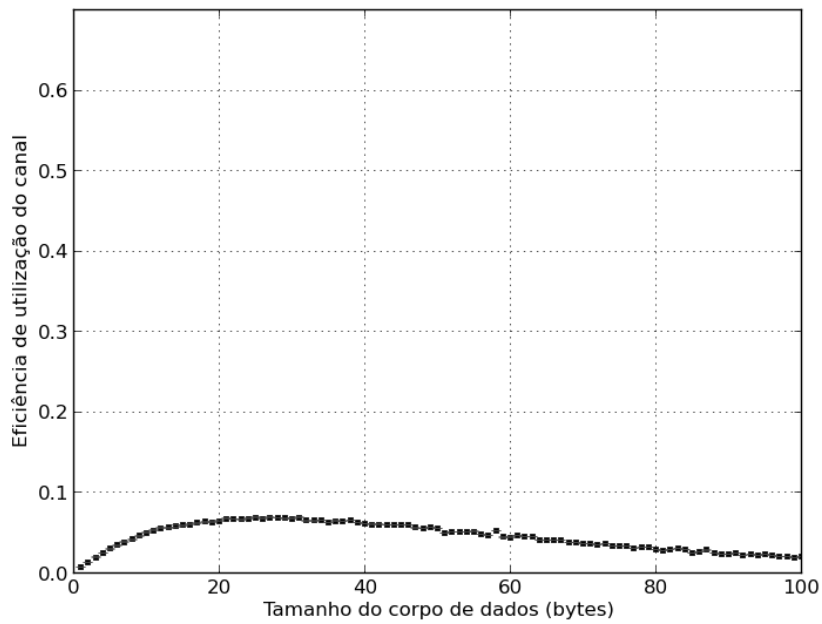


Figura 4.13: Resultados obtidos com o simulador para eficiência de utilização do canal por tamanho do corpo de dados - Nós separados a 50 metros

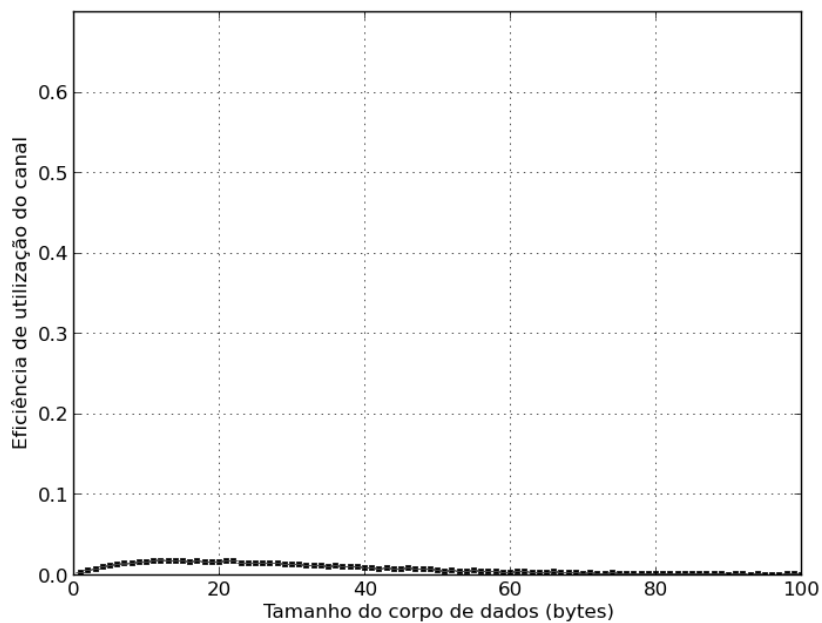


Figura 4.14: Resultados obtidos com o simulador para eficiência de utilização do canal por tamanho do corpo de dados - Nós separados a 55 metros

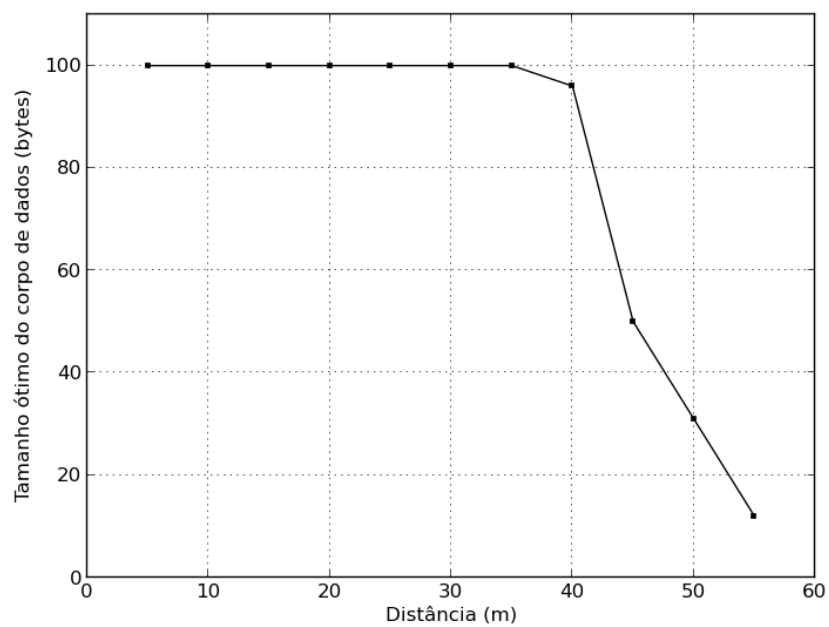


Figura 4.15: Tamanho de corpo de dados ótimo por distância - Resultado obtido com o simulador

4.3 Experimentos em Campo

4.3.1 Equipamentos utilizados

O ideal para a realização desses experimentos seria a utilização dos próprios veículos aéreos de pequeno porte como o AscTec *Hummingbird* mostrado na Figura 4.16. Entretanto, por não ser possível mantê-los fixos por um grande período de tempo, em um local definido, foram utilizados, em substituição, dois rádios Xbee 802.15.4 XBee & DigiMesh [2010], ilustrados na Figura 3.2. Os rádios são do modelo Xbee 802.15.4 com uma antena chicote de aproximadamente 2,5 cm de comprimento. Durante todo o experimento as antenas estavam erguidas, estando uma sempre paralela à outra. Os computadores conectados aos rádios utilizaram a biblioteca Java Xbee-API Rapp [2008] para realizar o controle dos rádios. Um dos rádios se encarregava de enviar os pacotes com o tamanho do corpo de dados variando de um a cem bytes, enquanto o outro rádio, posicionado a uma distância variável do primeiro, ficava com a tarefa de enviar o pacote ACK para confirmar a recepção correta do pacote enviado pelo primeiro rádio. Os dados referentes à quantidade de pacotes recebidos corretamente e ao valor do indicador de força do sinal foram armazenados somente no computador conectado ao primeiro rádio.

4.3.2 Local de realização dos experimentos

Para tentar reproduzir um cenário em que existiam apenas dois VANTs se comunicando no espaço aéreo, foi selecionado, como local para os experimentos, um campo de futebol ilustrado na Figura 4.17. O campo de futebol foi o melhor ambiente que se conseguiu para reproduzir este cenário, pois possibilitava uma menor interferência gerada por outros dispositivos eletromagnéticos nas proximidades, além de não haver obstáculos físicos obstruindo a comunicação entre os dois rádios.

4.3.3 Descrição do experimento

Os dois rádios foram colocados em um suporte com 60 cm de altura e separados por uma determinada distância. Ambos os rádios se encontravam dispostos como na Figura 4.5. Após o envio de, no mínimo 50 pacotes com o seu corpo de dados variando entre 1 byte a 100 bytes feitos pelo primeiro rádio, a distância entre os dois rádios foi aumentada de cinco em cinco metros, até não existir mais uma comunicação satisfatória entre os dois. A distância entre os dois rádios foi controlada com uma trena de três metros. Todos os valores obtidos experimentalmente possuem um intervalo de confiança de 95% . Para

a distância de 40 metros entre os nós, foram enviados 140 pacotes para cada tamanho de corpo de dados possível. Os pacotes de diferentes tamanhos foram enviados em ordem aleatória para reduzir a interferência de eventos externos nos resultados. Esta distância foi a escolhida pois até a separação entre 35 metros não foi notada nenhuma perda considerável de pacotes.



Figura 4.16: Foto do modelo do VANT disponível, o AscTec Hummingbird



Figura 4.17: Posição no mapa em que se encontravam os dois rádios a 40 metros, Ponto 1: $-19^{\circ}51'39.56''\text{O}$ e $-43^{\circ}57'36.79''\text{S}$, Ponto 2: $-19^{\circ}51'39.92''\text{O}$ e $-43^{\circ}57'38.27''\text{S}$

4.3.4 Resultados do Experimento em Campo

Durante os testes realizados nas distâncias iniciais, entre 5 e 35 metros, não foi observado nenhum aumento significativo na quantidade de pacotes perdidos, independente do tamanho máximo do pacote. Por isto a análise será realizada principalmente para a distância de 40 metros. Observou-se que o tamanho total do pacote realmente exerce influência na taxa de recebimentos de pacotes corretos. Na Figura 4.19, mostra-se a quantidade de pacotes recebidos corretamente, expressa em função do tamanho de seu corpo de dados para a distância de 40 metros entre os rádios. Ainda assim, apesar da maior quantidade de pacotes pequenos recebidos, eles ainda não são tão eficientes quanto os pacotes maiores, pois a proporção do tamanho do corpo de dados por dados do cabeçalho é bem menor nos pacotes mais curtos.

Assim como previsto pelo modelo analítico, a eficiência do canal de comunicação é sempre maximizada com o pacote de maior tamanho possível até os 35 metros de distância. Entretanto, assim como na simulação, a taxa de pacotes errados para os pacotes maiores começa a aumentar a partir desta distância. Na Figura 4.24, ilustra-se a eficiência obtida por tamanho de pacote para os experimentos realizados na distância de 40 metros. A curva obtida é muito similar à obtida com os resultados da simulação (Figura 4.23) e ambas estão sempre abaixo da curva obtida pelo modelo analítico (Figura 4.22).

É muito importante frisar que estes valores obtidos experimentalmente foram para um ambiente de testes em que o Received Signal Strength Indicator (RSSI) médio do sinal recebido a 40 metros foi de $-76dBm \pm 1$, como é ilustrado na Figura 4.18. Além disto, foi escolhido um ambiente próximo ao de um ambiente ideal com pouca interferência gerada por outros equipamentos eletrônicos e nenhum objeto obstruindo o sinal. O modelo analítico não prevê o efeito de interferência e nem obstruções no canal de transmissão.

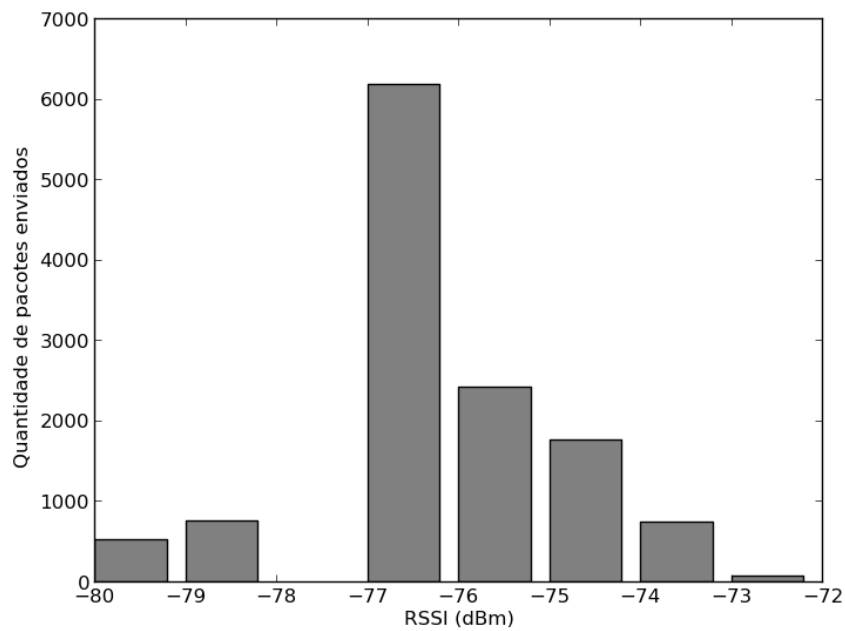


Figura 4.18: Histogramas do experimento realizado com os rádios a 40 metros de distância - Quantidade de pacotes enviados por RSSI recebido para 40 metros

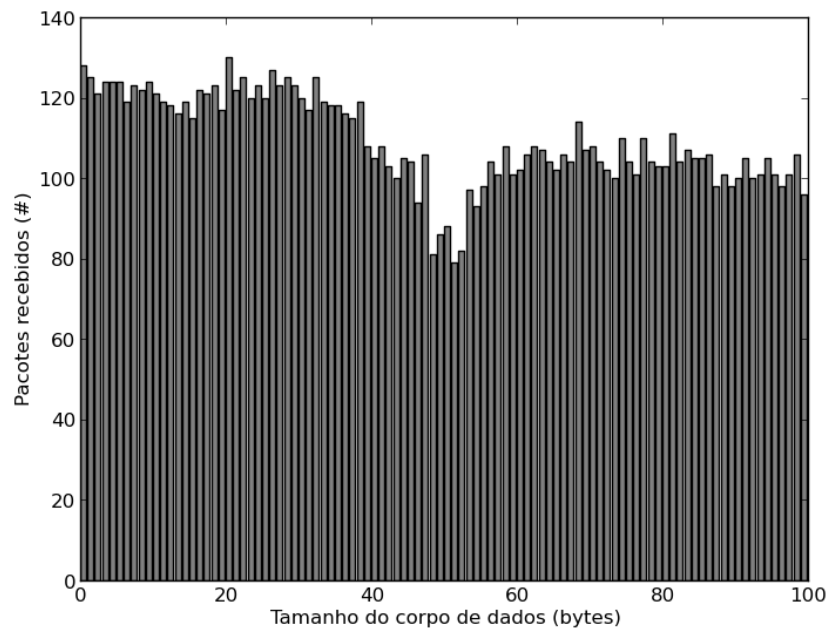


Figura 4.19: Histogramas do experimento realizado com os rádios a 40 metros de distância - Pacotes recebidos por tamanho do corpo de dados a 40 metros

4.4 Análise dos Resultados

A decisão de não instalar os rádios em VANTs e colocá-los em uma altitude considerável foi tomada para que se pudesse realizar os experimentos de forma controlada e de mais fácil execução. Para analisar os resultados, foi escolhida a distância de 40 metros entre os nós (Figura 4.25). Durante o experimento simulado este foi o primeiro valor para a distância em que foi possível observar o ponto ótimo do tamanho do pacote deixar de ser o tamanho máximo para o pacote. Como pode ser visualizado nas Figuras 4.22 e 4.23, as curvas obtidas com os experimentos em campo e com os simulados se comportam de maneira semelhante à prevista pelo modelo analítico. Como o modelo só leva em consideração a perda de potência gerada unicamente pela propagação do sinal eletromagnético, a eficiência nele obtida será sempre superior à eficiência real e simulada dos equipamentos. As curvas obtidas são similares e, portanto, é possível inferir que o comportamento da curva de eficiência de utilização do canal para os rádios reais e simulados acompanham o modelo. Desta maneira, este modelo analítico é insuficiente para prever exatamente o valor ótimo para o tamanho máximo do pacote. Entretanto a curva obtida com o modelo analítico $n(d, L_P)$ pode ser considerada um limite superior para a eficiência de utilização de canal a uma certa distância d .

O intervalo de confiança utilizado para a produção dos resultados foi de 95%. Ao analisar os resultados, é possível observar que em todos os casos, para rádios que possuem um tamanho de pacote total reduzido como os que implementam o protocolo IEEE 802.15.4, o tamanho ótimo é quase sempre o maior tamanho de pacote possível. Portanto VANTs que se encontram bem dentro da área de comunicação de seu par devem se comunicar com o maior tamanho de pacote permitido. Entretanto, à medida em que estes se afastam e se aproximam do limite do alcance de comunicação entre eles, a redução do tamanho máximo de pacote será benéfica para aumentar a eficiência.

Apesar dos resultados obtidos com os experimentos em campo, ficou claro que não é possível encontrar o tamanho ótimo do pacote, baseando-se apenas na informação de distância, pois a força do sinal recebido pelo rádio pode variar drasticamente de acordo com o ambiente em que estes se encontram. Como os experimentos realizados neste trabalho tiveram como objetivo reproduzir um cenário ideal, com pouca interferência e sem obstáculos entre os dois nós, foi possível manter consistente a força do sinal recebido pelos rádios durante todo o experimento e ajustar o modelo analítico e o simulador para reproduzir este ambiente.

Deve-se observar que para rádios com tamanho de pacote máximo pequeno, como o caso do Xbee 802.15.4, não há muita vantagem em se alterar o tamanho máximo do pacote. Como pode ser visto nas curvas da Figura 4.6, o ponto onde é encontrado o

valor máximo está muito além do tamanho máximo de corpo de dados para estes rádios, salvo em distâncias que se aproximam do limite de comunicação. Na Figura 4.20, são mostrados os valores de distância para os quais a alteração do tamanho do pacote aumenta a eficiência de utilização do canal. Na Figura 4.21, compara-se a eficiência de utilização do canal quando o pacote tem o seu tamanho ótimo e o tamanho máximo permitido. Como pode ser observado nesta Figura, apesar da eficiência de utilização do canal ser pequena devido à distância entre os nós, é notável seu o aumento entre o tamanho padrão de pacote e o pacote ótimo encontrado para esta distância.

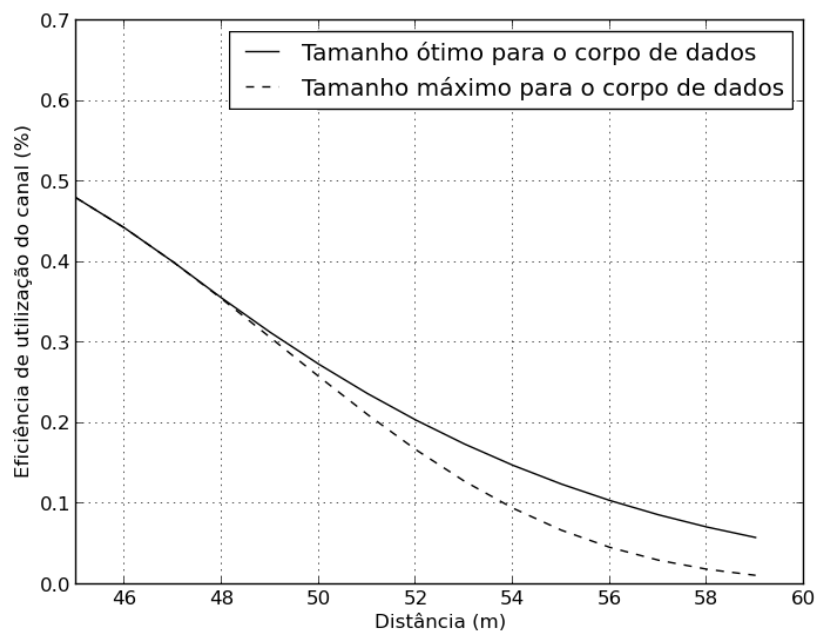


Figura 4.20: Diferença na eficiência de utilização do canal - Eficiência de utilização do canal por distância

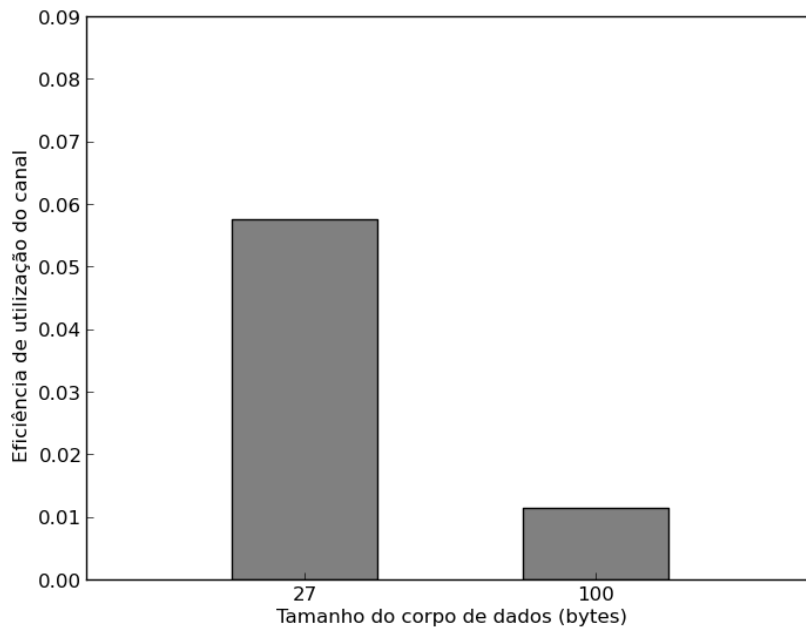


Figura 4.21: Diferença na eficiência de utilização do canal - Valor da eficiência de utilização do canal entre o tamanho para corpo de dados ótimo e máximo a uma distância de 59 metros

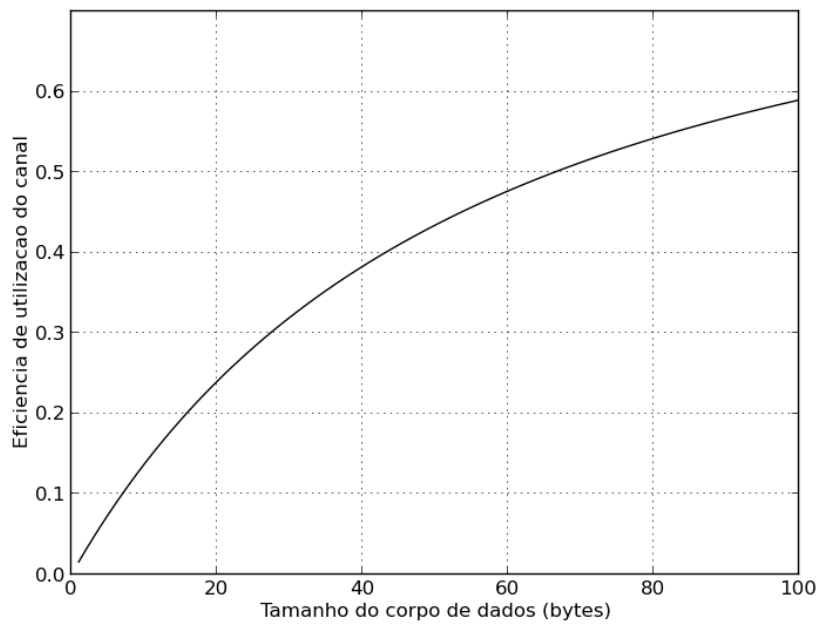


Figura 4.22: Eficiência de utilização do canal por tamanho do corpo de dados com 40 metros de distância entre os nós - Resultado analítico

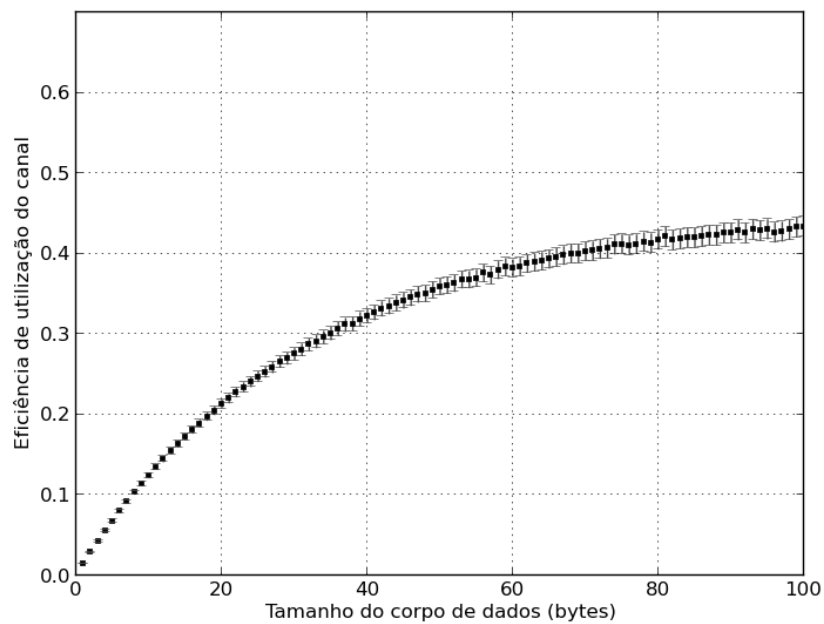


Figura 4.23: Eficiência de utilização do canal por tamanho do corpo de dados com 40 metros de distância entre os nós - Resultado obtido com o simulador

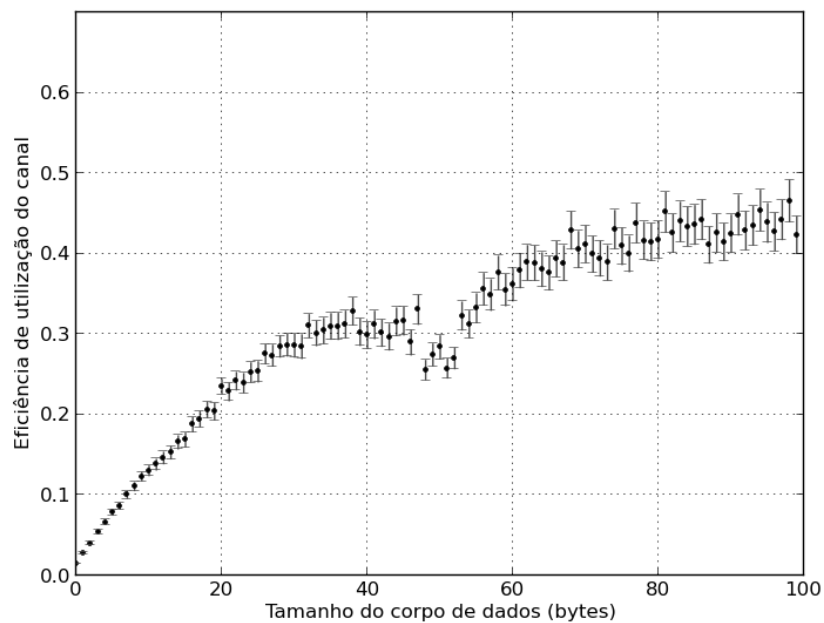


Figura 4.24: Eficiência de utilização do canal por tamanho do corpo de dados com 40 metros de distância entre os nós - Resultado experimental

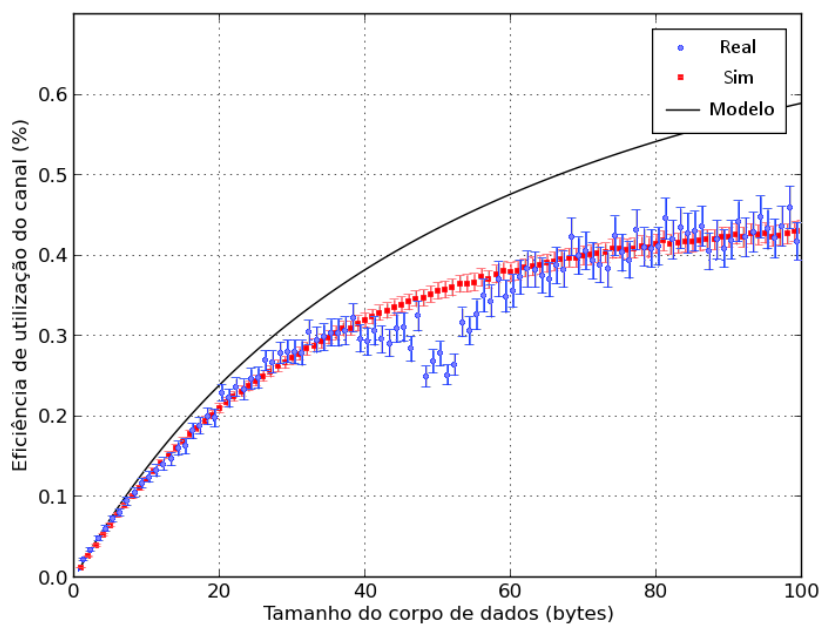


Figura 4.25: Eficiência de utilização do canal por tamanho do payload com 40 metros de distância entre os nós

Capítulo 5

Coleta de Dados

Apesar da existência de nós sensores especializados, que podem realizar comunicação a longas distâncias, como a utilização de uma torre de celular, caso haja a cobertura, a energia por bit consumida para realizar estas operações é muito mais alta do que a necessária para a transmissão entre nós à curta distância. Portanto, redes de sensores que monitoram regiões inóspitas ou isoladas podem utilizar um nó móvel como mula para realizar a coleta dos dados. A principal vantagem desta abordagem é uma possível grande economia de energia e com isso o aumento da vida útil dos nós já instalados, sem a necessidade de manutenção.

Neste capítulo, são apresentados e descritos três métodos diferentes de coleta de dados implementados com um VANT e com uma rede de sensores real. São, então analisadas quais as vantagens e desvantagens de cada método de coleta de dados. A rede de sensores desenvolvida coleta dados sobre a temperatura ambiente ao longo do tempo.

Como a distância entre o nó coletor e os nós transmissores está abaixo de 40 metros os pacotes enviados entre os nós é sempre o tamanho máximo do pacote.

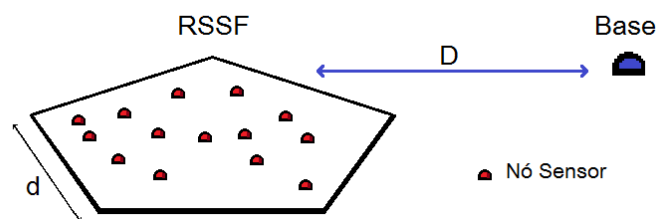


Figura 5.1: Esquema de coleta de dados com nó mula.

5.1 Rede de Sensores

Nesta seção, descreve-se a estrutura da rede de sensores sem fio desenvolvida para que a coleta de dados pudesse ser realizada. Inicialmente, foi idealizada uma rede de sensores sem fio, cujos nós realizam a coleta do valor de temperatura em cada unidade de tempo e em seguida um VANT se aproxima da rede para coletar os dados.

5.1.1 Descrição do Hardware

O nó sensor da rede desenvolvida e o VANT utilizado foram descritos no capítulo 3.

5.1.1.1 Decisões de implementação

Dados Armazenados O microcontrolador MSP430g2553 possui um sensor de temperatura interno capaz de coletar o valor desejado a cada intervalo de tempo. Apesar do hardware para a coleta de dados reais existir e estar disponível, a capacidade de armazenamento de dados do microcontrolador é muito pequena. Portanto, os dados de temperatura não serão armazenados. Apenas dados dados que correspondem à características do pacote de transmissão é que são armazenados. O conjunto de informações coletadas de cada pacote corresponde à 9 bytes. Estes 9 bytes salvos em formato hexadecimal na memória flash e estão descritos em sequência na Tabela 5.1. Por este motivo, cada nó sensor envia um total de 180 pacotes, já que o nó móvel acoplado ao VANT deve ser capaz de armazenar as informações de todos os pacotes a ele encaminhados.

Tabela 5.1: Dados de cada pacote armazenado no microcontrolador.

Índice do byte	Informação armazenada
1	Endereço do nó emissor do pacote;
2	Byte mais significativo do tempo em segundos da transmissão;
3	Byte menos significativo do tempo em segundos da transmissão;
4	Byte mais significativo do tempo em milissegundos da transmissão,
5	Byte menos significativo do tempo em milissegundos da transmissão;
6	Endereço do nó original em que o pacote foi criado;
7	O identificador do pacote em seu nó original;
8	O valor do RSSI da transmissão;
9	Envios totais para que seja recebido corretamente.

Ordem de transmissão dos dados No caso deste nó implementado, o microcontrolador não possui acesso aos pinos Clear to Send (CTS) e Request to Send (RTS) do

rádio Xbee, que são os pinos em que é possível obter informações sobre a quantidade de energia no canal de comunicação e realizar o controle da vazão de dados. Desta maneira, foi definido um intervalo de tempo para que cada nó envie um pacote de cada vez e não sobrecarregue o nó coletor, ao exceder a capacidade de bits possíveis de serem recebidos por segundo, definido pela *baud rate*. Por isso, apesar de um byte armazenado ser reservado para a quantidade de vezes que um pacote é retransmitido, na implementação final cada pacote só é transmitido uma vez.

5.2 Descrição dos métodos de coleta implementados

Nesta seção, são descritos os três métodos diferentes de coleta de dados implementados e aplicados. Como descrito anteriormente, devido às limitações de armazenamento dos nós sensores, estes armazenam apenas os dados referentes às propriedades do pacote transmitido. Portanto, apesar de o pacote total transmitido ter um corpo de dados de tamanho de 100 bytes, os outros bytes, além dos iniciais que contém as informações armazenadas, são bytes que apenas ocupam o lugar de hipotéticos valores de temperatura previamente colhidos pelos nós sensores.

5.2.1 Método com transmissões simultâneas

Neste método, todos os nós sensores se comunicam diretamente com o nó acoplado ao VANT que realiza a coleta de dados, como no esquema da Figura 5.2. Neste esquema, as setas representam a direção em que o pacote é encaminhado na rede.

O algoritmo 1 ilustra o código que é executado nos nós 2,3,4 e 5, os nós transmissores. A linha 1 representa o ciclo principal do microcontrolador. A linha 2 é uma cláusula condicional que só é executada no início do experimento. Dentro desta cláusula, o relógio do microcontrolador é iniciado na linha 3; a variável que armazena o código de identificação de cada pacote é iniciada na linha 4. A linha 6 é uma cláusula condicional que é executada logo após a inicialização do experimento e durante toda sua duração; linha 7 verifica se todos os pacotes do experimento já foram enviados. Em caso negativo, são obtidos os valores do tempo atual nas linhas 8 e 9; o pacote a ser enviado é criado na linha 10 e empilhado no *buffer* para ser transmitido; o identificador do pacote é acrescido de uma unidade na linha 11. A linha 13 envia o primeiro pacote do *buffer* de transmissão para o nó 1; os dados como identificação do pacote e o valor do momento em que ele é enviado são armazenados na memória flash na linha 14; após

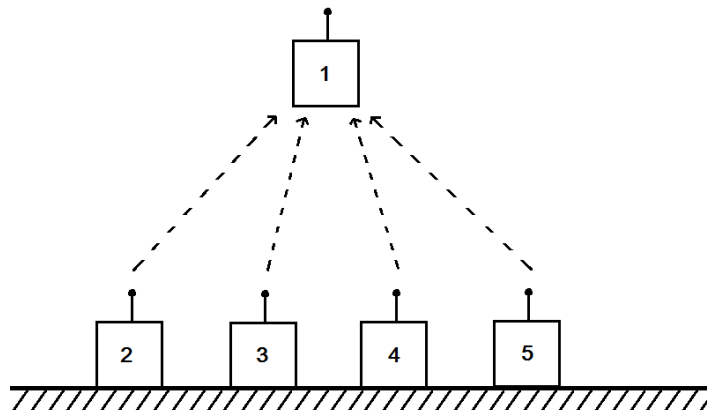


Figura 5.2: Esquema da coleta de dados em que todos os nós se comunicam simultaneamente.

esta operação, na linha 15 o microcontrolador aguarda um tempo predeterminado para que os outros nós possam realizar os seus envios e o ciclo se reinicia.

Algoritmo 1 Método com transmissões simultâneas - Nós transmissores.

```

1: enquanto verdade faça
2:   se flag iniciar experimentos então
3:     iniciar relógio
4:     identificador = 0
5:   fim se
6:   se flag experimento iniciado então
7:     se identificador < maxPacotes então
8:       obter valor milisegundos
9:       obter valor segundos
10:      criar pacote e empilhar no buffer de transmissão
11:      identificador = identificador + 1
12:    fim se
13:    enviar primeiro pacote do buffer de transmissão para nó 1
14:    gravar dados enviados na memória flash
15:    aguardar delay predeterminado
16:  fim se
17: fim enquanto

```

O algoritmo 2 ilustra o código executado continuamente no nó coletor em todos os métodos. Este é o nó que está acoplado ao VANT e é o destinatário final de todos os pacotes. A linha 1 representa o ciclo principal do microcontrolador. A linha 2 é uma cláusula condicional que só é executada no início do experimento; dentro desta

cláusula, o relógio do microcontrolador é iniciado na linha 3. A linha 5 é uma cláusula condicional que é executada logo após a inicialização do experimento e durante toda sua duração; linha 6 verifica se algum pacote foi recebido; caso algum pacote tenha sido recebido, são obtidos os valores do tempo atual nas linhas 7 e 8; a diferença do tempo em que o pacote foi inicialmente enviado e foi finalmente recebido é calculada na linha 9; na linha 10 os dados deste pacote recebido são armazenados na memória flash e o ciclo se reinicia.

Algoritmo 2 Nó receptor.

```
1: enquanto verdade faça
2:   se flag iniciar experimentos então
3:     iniciar relógio
4:   fim se
5:   se flag experimento iniciado então
6:     se pacote recebido então
7:       obter valor milisegundos
8:       obter valor segundos
9:       calcular diferença de tempo
10:      gravar dados recebidos na memória flash
11:     fim se
12:   fim se
13: fim enquanto
```

5.2.2 Método com transmissões mistas

Neste método, os nós sensores periféricos transmitem a informação coletada para os nós centrais. Estes, por sua vez, irão se comunicar diretamente com o nó acoplado ao VANT que realiza a coleta de dados como no esquema da Figura 5.3.

O algoritmo 3 ilustra o código que é executado nos nós 3 e 4. A linha 1 representa o ciclo principal do microcontrolador. A linha 2 é uma cláusula condicional que só é executada no início do experimento; dentro desta cláusula, o relógio do microcontrolador é iniciado na linha 3; a variável que armazena o código de identificação de cada pacote é iniciada na linha 4. A linha 6 é uma cláusula condicional que é executada logo após a inicialização do experimento e durante toda sua duração; linha 7 verifica se todos os pacotes do experimento já foram enviados; em caso negativo, são obtidos os valores do tempo atual nas linhas 8 e 9; o pacote a ser enviado é criado na linha 10 e empilhado no *buffer* para ser transmitido; o identificador do pacote é acrescido de uma unidade na linha 11. A linha 13 verifica se algum pacote foi recebido; caso algum pacote tenha sido recebido, ele é empilhado no *buffer* de transmissão na linha 14. A

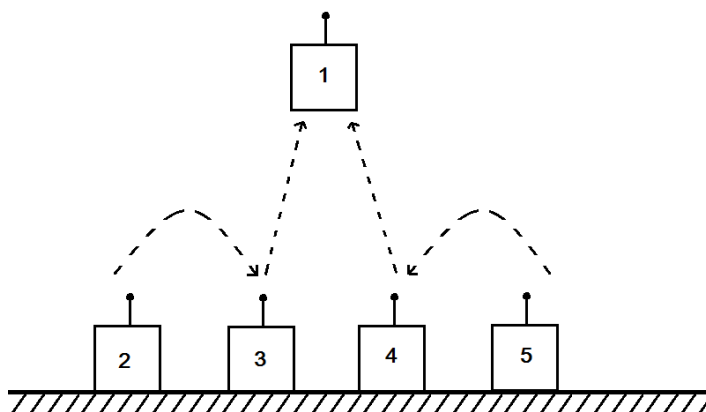


Figura 5.3: Esquema da coleta de dados em que todos os nós enviam a informação parcialmente.

linha 16 envia o primeiro pacote do *buffer* de transmissão para o nó 1; os dados como identificação do pacote e o valor do momento em que ele é enviado são armazenados na memória flash na linha 17; após esta operação, na linha 18 o microcontrolador aguarda um tempo predeterminado para que os outros nós possam realizar os seus envios e o ciclo se reinicia.

O algoritmo 4 ilustra o código executado nos nós 2 e 5. A linha 1 representa o ciclo principal do microcontrolador. A linha 2 é uma cláusula condicional que só é executada no início do experimento; dentro desta cláusula, o relógio do microcontrolador é iniciado na linha 3; a variável que armazena o código de identificação de cada pacote é iniciada na linha 4. A linha 6 é uma cláusula condicional que é executada logo após a inicialização do experimento e durante toda sua duração; linha 7 verifica se todos os pacotes do experimento já foram enviados; em caso negativo, são obtidos os valores do tempo atual nas linhas 8 e 9; o pacote a ser enviado é criado na linha 10 e empilhado no *buffer* para ser transmitido; o identificador do pacote é acrescido de uma unidade na linha 11. A linha 13 envia o primeiro pacote do *buffer* de transmissão para os nós ao centro, o nó 2 envia para o nó 3 e o nó 4 envia para o nó 5; os dados como identificação do pacote e o valor do momento em que ele é enviado são armazenados na memória flash na linha 14; após esta operação, na linha 18 o microcontrolador aguarda um tempo predeterminado para que os outros nós possam realizar os seus envios e o ciclo se reinicia.

Algoritmo 3 Método com transmissões mistas - Nós transmissores centrais.

```
1: enquanto verdade faça
2:   se flag iniciar experimentos então
3:     iniciar relógio
4:     identificador = 0
5:   fim se
6:   se flag experimento iniciado então
7:     se identificador < maxPacotes então
8:       obter valor milisegundos
9:       obter valor segundos
10:      criar pacote e empilhar no buffer de transmissão
11:      identificador = identificador + 1
12:    fim se
13:    se pacote recebido então
14:      empilhar pacote recebido no buffer de transmissão
15:    fim se
16:    enviar primeiro pacote do buffer de transmissão para nó 1
17:    gravar dados na memória flash
18:    aguardar delay predeterminado
19:  fim se
20: fim enquanto
```

Algoritmo 4 Método com transmissões mistas - Nós transmissores periféricos.

```
1: enquanto verdade faça
2:   se flag iniciar experimentos então
3:     iniciar relógio
4:     identificador = 0
5:   fim se
6:   se flag experimento iniciado então
7:     se identificador < maxPacotes então
8:       obter valor milisegundos
9:       obter valor segundos
10:      criar pacote e empilhar no buffer de transmissão
11:      identificador = identificador + 1
12:    fim se
13:    enviar primeiro pacote do buffer de transmissão para nós centrais
14:    gravar dados na memória flash
15:    aguardar delay predeterminado
16:  fim se
17: fim enquanto
```

5.2.3 Método com transmissões em sequência

Neste método, os nós sensores transmitem a informação coletada em sequência na ordem ilustrada no esquema da Figura 5.4. Neste método apenas o nó 2 se comunica diretamente com o nó acoplado ao VANT, que realiza a coleta de dados.

5.3

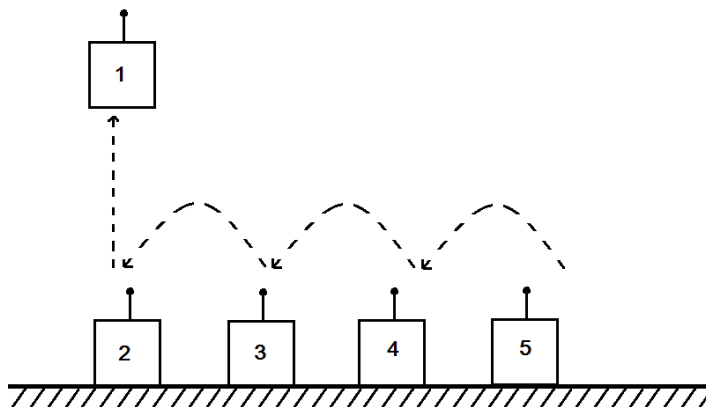


Figura 5.4: Esquema da coleta de dados em que todos os nós enviam a informação para um sink.

O algoritmo 5 ilustra o código que é executado no nó 2. A linha 1 representa o ciclo principal do microcontrolador. A linha 2 é uma cláusula condicional que só é executada no início do experimento; dentro desta cláusula, o relógio do microcontrolador é iniciado na linha 3; a variável que armazena o código de identificação de cada pacote é iniciada na linha 4. A linha 6 é uma cláusula condicional que é executada logo após a inicialização do experimento e durante toda sua duração; linha 7 verifica se todos os pacotes do experimento já foram enviados; em caso negativo, são obtidos os valores do tempo atual nas linhas 8 e 9; o pacote a ser enviado é criado na linha 10 e empilhado no *buffer* para ser transmitido; o identificador do pacote é acrescido de uma unidade na linha 11. A linha 13 verifica se algum pacote foi recebido; caso algum pacote tenha sido recebido, ele é empilhado no *buffer* de transmissão na linha 14. A linha 16 envia o primeiro pacote do *buffer* de transmissão para o nó 1; os dados como identificação do pacote e o valor do momento em que ele é enviado são armazenados na memória flash na linha 17; após esta operação, na linha 18 o microcontrolador aguarda um tempo predeterminado para que os outros nós possam realizar os seus envios e o ciclo se reinicia.

Algoritmo 5 Método com transmissões em sequência - Nó final.

```

1: enquanto verdade faça
2:   se flag iniciar experimentos então
3:     iniciar relógio
4:     identificador = 0
5:   fim se
6:   se flag experimento iniciado então
7:     se identificador < maxPacotes então
8:       obter valor milisegundos
9:       obter valor segundos
10:      criar pacote e empilhar no buffer de transmissão
11:      identificador = identificador + 1
12:    fim se
13:    se pacote recebido então
14:      empilhar pacote recebido no buffer de transmissão
15:    fim se
16:    enviar primeiro pacote do buffer de transmissão para nó 1
17:    gravar dados na memória flash
18:    aguardar delay predeterminado
19:  fim se
20: fim enquanto

```

O algoritmo 6 ilustra o código executado nos nós 3 e 4. A linha 1 representa o ciclo principal do microcontrolador. A linha 2 é uma cláusula condicional que só é executada no início do experimento; dentro desta cláusula, o relógio do microcontrolador é iniciado na linha 3; a variável que armazena o código de identificação de cada pacote é iniciada na linha 4. A linha 6 é uma cláusula condicional que é executada logo após a inicialização do experimento e durante toda sua duração; linha 7 verifica se todos os pacotes do experimento já foram enviados; em caso negativo, são obtidos os valores do tempo atual nas linhas 8 e 9; o pacote a ser enviado é criado na linha 10 e empilhado no *buffer* para ser transmitido; o identificador do pacote é acrescido de uma unidade na linha 11. A linha 13 verifica se algum pacote foi recebido; caso algum pacote tenha sido recebido, ele é empilhado no *buffer* de transmissão na linha 14. Na linha 16 o nó 4 envia o primeiro pacote do *buffer* de transmissão para o nó 3 e o nó 3 envia para o nó 2; os dados como identificação do pacote e o valor do momento em que ele é enviado são armazenados na memória flash na linha 17; após esta operação, na linha 18 o microcontrolador aguarda um tempo predeterminado para que os outros nós possam realizar os seus envios e o ciclo se reinicia.

O algoritmo 7 ilustra o código executado no nó 5. A linha 1 representa o ciclo principal do microcontrolador. A linha 2 é uma cláusula condicional que só é execu-

Algoritmo 6 Método com transmissões em sequência - Nós intermediários.

```

1: enquanto verdade faça
2:   se flag iniciar experimentos então
3:     iniciar relógio
4:     identificador = 0
5:   fim se
6:   se flag experimento iniciado então
7:     se identificador < maxPacotes então
8:       obter valor milisegundos
9:       obter valor segundos
10:      criar pacote e empilhar no buffer de transmissão
11:      identificador = identificador + 1
12:    fim se
13:    se pacote recebido então
14:      empilhar pacote recebido no buffer de transmissão
15:    fim se
16:    enviar primeiro pacote do buffer de transmissão para o nó seguinte
17:    gravar dados na memória flash
18:    aguardar delay predeterminado
19:  fim se
20: fim enquanto

```

tada no início do experimento; dentro desta cláusula, o relógio do microcontrolador é iniciado na linha 3; a variável que armazena o código de identificação de cada pacote é iniciada na linha 4. A linha 6 é uma cláusula condicional que é executada logo após a inicialização do experimento e durante toda sua duração; linha 7 verifica se todos os pacotes do experimento já foram enviados; em caso negativo, são obtidos os valores do tempo atual nas linhas 8 e 9; o pacote a ser enviado é criado na linha 10 e empilhado no *buffer* para ser transmitido; o identificador do pacote é acrescido de uma unidade na linha 11. A linha 13 envia o primeiro pacote do *buffer* de transmissão para o nó 4; os dados como identificação do pacote e o valor do momento em que ele é enviado são armazenados na memória flash na linha 14; após esta operação, na linha 18 o microcontrolador aguarda um tempo predeterminado para que os outros nós possam realizar os seus envios e o ciclo se reinicia.

Algoritmo 7 Método com transmissões em sequência - Nó inicial.

```
1: enquanto verdade faça
2:   se flag iniciar experimentos então
3:     iniciar relógio
4:     identificador = 0
5:   fim se
6:   se flag experimento iniciado então
7:     se identificador < maxPacotes então
8:       obter valor milisegundos
9:       obter valor segundos
10:      criar pacote e empilhar no buffer de transmissão
11:      identificador = identificador + 1
12:    fim se
13:    enviar primeiro pacote do buffer de transmissão para o nó seguinte
14:    gravar dados na memória flash
15:    aguardar delay predeterminado
16:  fim se
17: fim enquanto
```

5.3 Análise Experimental

Na Figura 5.5, são mostrados os quatro nós sensores instalados no solo. Na Figura 5.7 mostra-se como ficou a disposição dos nós no campo real. Há uma distância de 10 metros entre cada nó, e os nós da ponta, no caso os nós 2 e 5, não tem a capacidade de se comunicarem entre si. A Figura 5.6 é uma imagem do VANT com o nó sensor acoplado ao mesmo durante um voo. A posição do VANT em voo é a mesma mostrada nos esquemas na seção anterior. No primeiro e no segundo métodos, o VANT se encontra entre os nós 3 e 4, e no terceiro método o VANT se encontra sobre o nó 2.

A coleta de dados com auxílio de um VANT foi avaliada com três métricas diferentes; i) Perda de pacote - a quantidade de pacotes perdidos por nó durante o processo; ii) Número total de mensagens - a quantidade total de mensagens trocadas para realizar a coleta de dados com sucesso; iii) Latência e vazão de dados.

5.3.1 Método com transmissões simultâneas

A Figura 5.8 corresponde à quantidade de pacotes perdidos por cada nó, com este gráfico é possível visualizar que os nós mais afastados do VANT são os nós em que há uma maior perda de pacotes, por outro lado, a Figura 5.9 demonstra que neste método o número total de mensagens enviadas por nó é equilibrado e cada nó envia a mesma quantidade de pacotes.



Figura 5.5: Os quatro nós no solo.

5.3.2 Método com transmissões mistas

A Figura 5.10 corresponde à quantidade de pacotes perdidos por cada nó no método com transmissões mistas. Neste método a quantidade de pacotes perdidos é próxima para todos os nós e a sua diferença é devida às oscilações da posição do VANT durante o experimento. Já a Figura 5.11 remete ao número total de mensagens enviadas por nó e nela é possível perceber que os nós centrais são mais sobrecarregados neste método.

5.3.3 Método com transmissões em sequência

A Figura 5.12, que corresponde à quantidade de pacotes perdidos por cada nó, para o método com transmissões em sequência também mostra que não há uma grande diferença de perda de pacotes entre os nós sensores neste caso. Entretanto, já na Figura 5.13 referente ao número total de mensagens enviadas por nó, mostra como a quantidade de pacotes enviados é incrementada sequencialmente.



Figura 5.6: O quadrotor no ar.



Figura 5.7: Visão geral do ambiente de testes.

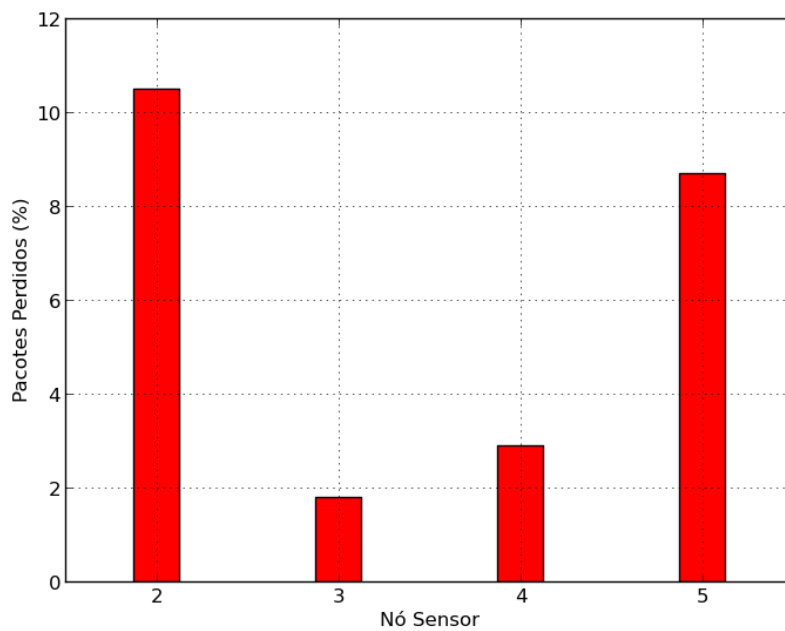


Figura 5.8: Perda de pacote por nó : transmissões simultâneas.

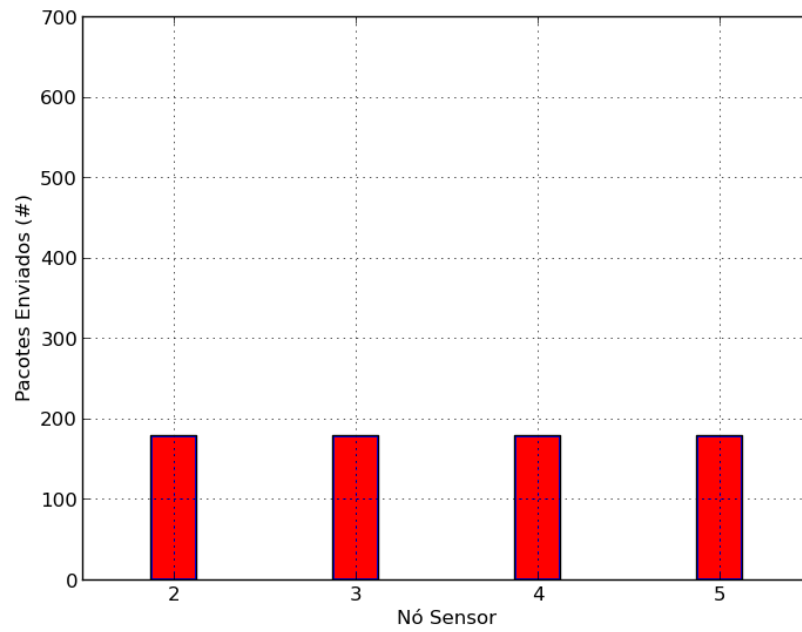


Figura 5.9: Número total de mensagens enviadas por nó: transmissões simultâneas.

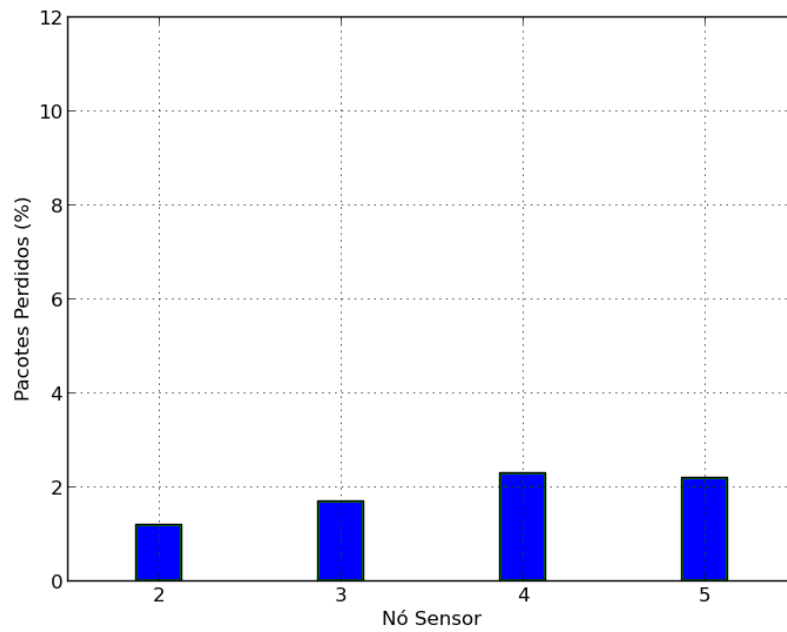


Figura 5.10: Perda de pacote por nó : transmissões mistas.

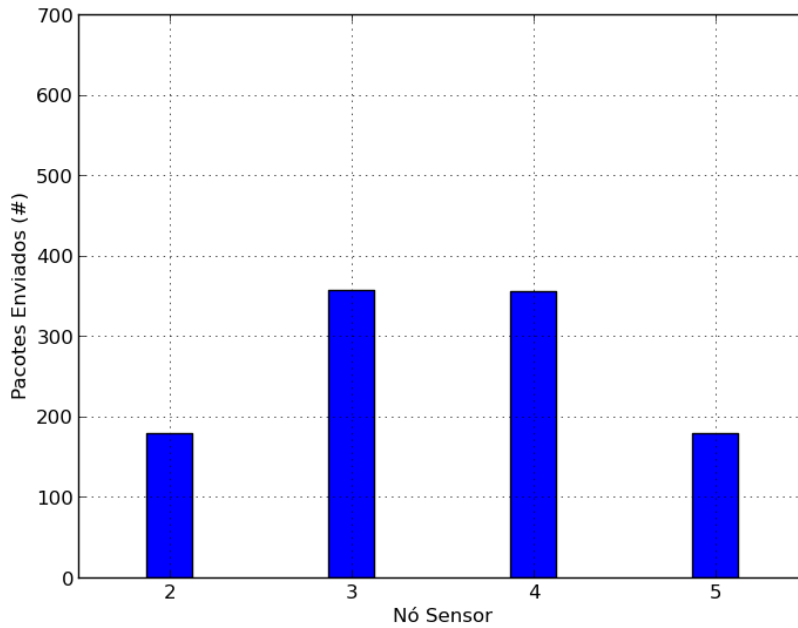


Figura 5.11: Número total de mensagens enviadas por nó: transmissões mistas.

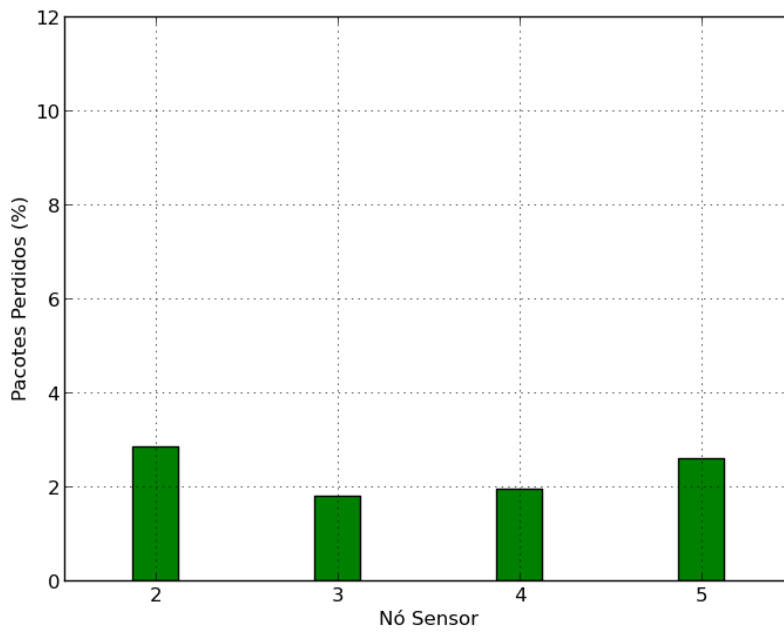


Figura 5.12: Perda de pacote por nó : transmissões em sequência.

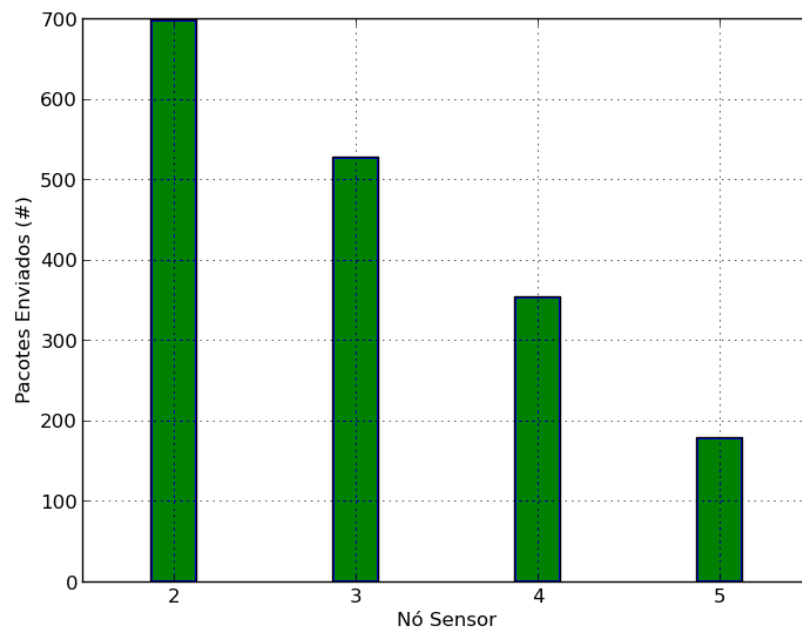


Figura 5.13: Número total de mensagens enviadas por nó: transmissões em sequência.

5.4 Resultados da Coleta de Dados

Em geral, os resultados obtidos foram próximos aos resultados esperados. A perda de pacotes só foi significativamente maior nos nós sensores que tentaram se comunicar diretamente com o nó acoplado ao VANT, apesar da distância maior entre eles, como no caso dos nós 2 e 5 do primeiro método, que é o método com transmissões simultâneas. Já a perda de pacotes dos outros dois métodos é similar, já que a distância entre os nós, neste caso, é menor que no primeiro, como pode ser visualizado na Figura 5.14. Já a quantidade total de pacotes enviados pela rede aumentou progressivamente, à medida em que os pacotes precisaram ser redirecionados, como é ilustrado na Figura 5.15. A latência média de um pacote para ser recebido no nó coletor também aumenta à medida que o número de redirecionamentos do pacote aumenta, como mostrado na Figura 5.16. Apesar da diferença de latência entre os métodos, ela pode ser desconsiderada, se comparada à latência gerada pelo deslocamento físico do VANT até o local da coleta dos dados. Como esta não é uma coleta de dados obtida em tempo real, mesmo a maior latência do terceiro método se torna irrelevante. Já a vazão total da rede ficou limitada ao *baud rate* predeterminado dos rádios.

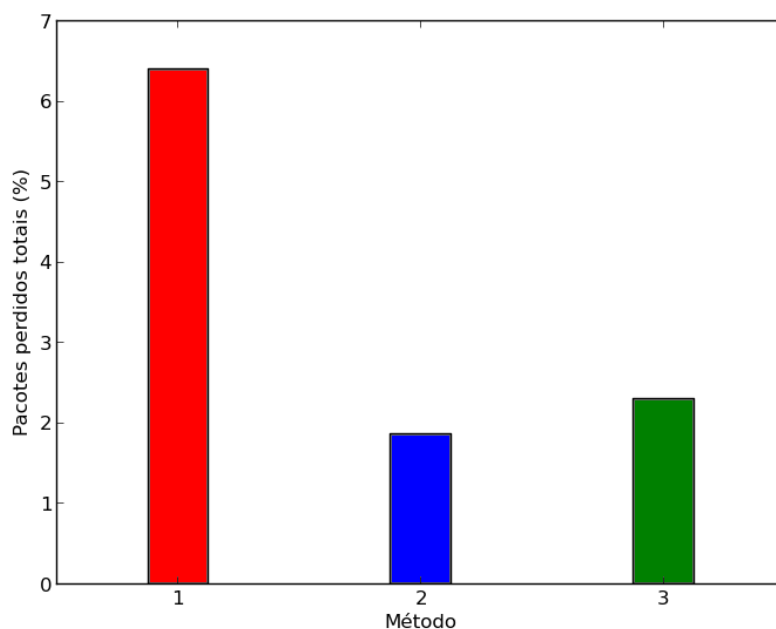


Figura 5.14: Perda de pacote por cada método de comunicação utilizado em que 1 - Método com transmissões simultâneas, 2- Método com transmissões mistas e 3- Método com transmissões em sequência.

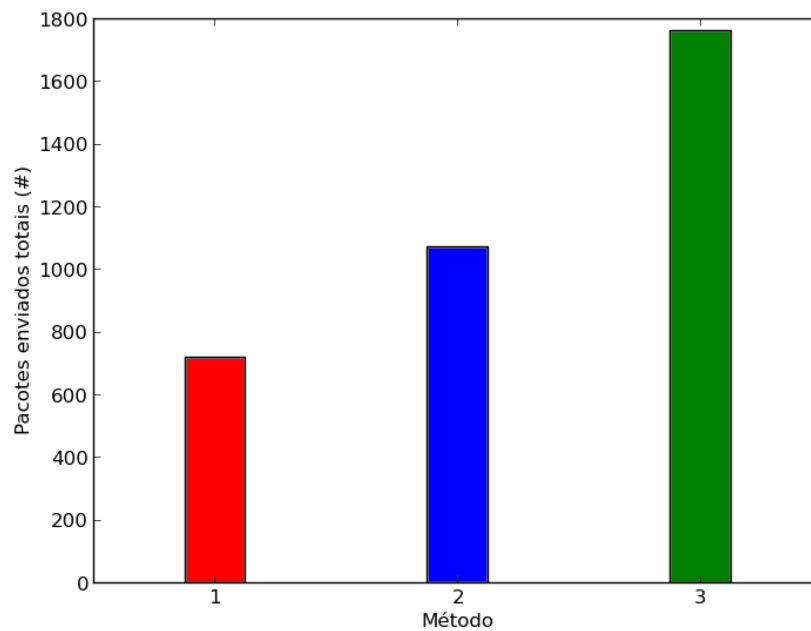


Figura 5.15: Número total de pacotes enviados por cada método de comunicação utilizado em que 1 - Método com transmissões simultâneas, 2- Método com transmissões mistas e 3- Método com transmissões em sequência.

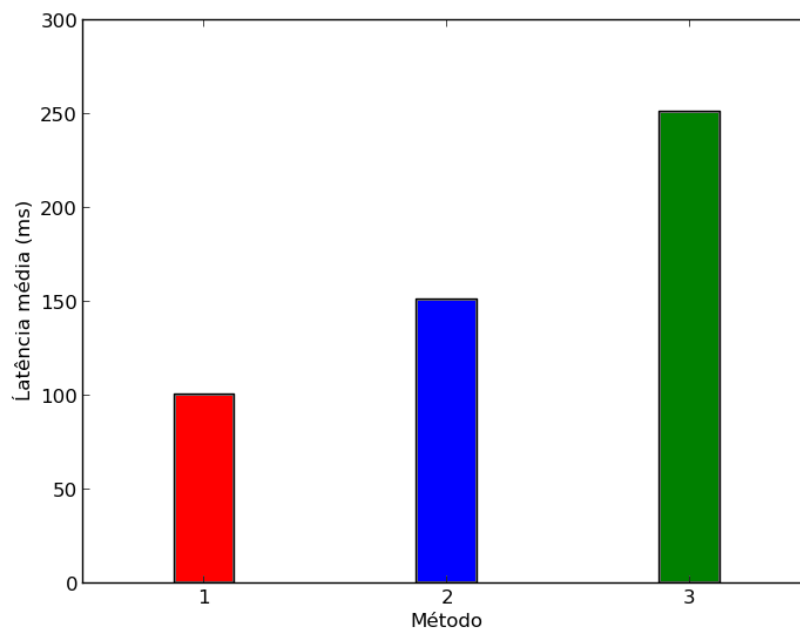


Figura 5.16: Latência média de cada método de comunicação utilizado em que 1 - Método com transmissões simultâneas, 2- Método com transmissões mistas e 3- Método com transmissões em sequência.

5.5 Análise dos Resultados

O experimento, com nós sensores reais e um nó móvel real, demonstrou que a coleta de dados realizada por um nó aéreo não é possível e não apresenta alto nível de complexidade para ser implementado. Como o experimento realizado foi uma prova de conceito, e pelas dificuldades técnicas para se repetir o experimento inúmeras vezes, todos os resultados apresentados neste capítulo levam em conta apenas uma iteração e são valores absolutos. Portanto, não há como estimar um intervalo de confiança para os resultados apresentados.

Ao contrário dos métodos de coleta de dados tradicionais, como a coleta de dados realizada por comunicação em sinais de rádio de longo alcance e redes de celular, onde a energia por bit consumida para a transmissão através de uma grande área é maior, como descrito em Rappaport [2009], a energia por bit exigida para realizar a transmissão de dados em uma coleta de dados realizada localmente por um VANT é bem menor. Isto se deve ao fato de que as distâncias envolvidas nesta transmissão são bem menores e a energia necessária está diretamente ligada ao quadrado da distância em questão.

No caso da coleta de dados realizada por um VANT, métodos como a coleta com transmissões simultâneas, apesar de proporcionarem uma maior perda proporcional de pacotes, exigem que menos pacotes totais sejam enviados e, além disso, a quantidade de pacotes enviadas por nó é mais uniforme, proporcionando consumo de energia por cada nó mais igual. Isto proporciona uma longevidade maior e mais igual para todos os nós da rede. Apesar disto, a coleta de dados realizada por um VANT está diretamente limitada pela autonomia deste e por sua capacidade de suportar diferentes condições ambientais adversas como neve, chuva e ventos fortes. Algumas destas condições ocorreram durante a realização do próprio experimento aqui descrito.

Capítulo 6

Conclusões

Com essa dissertação, pode-se explorar possibilidades de otimização e novos usos para redes aéreas que implementam o protocolo IEEE 802.15.4.

O uso de redes de sensores sem fio com nós móveis ainda é um tema que pode ser muito mais explorado. Os protocolos de comunicação IEEE 802.15.4 tradicionais não consideram a possibilidade de movimento de um ou mais nós em uma rede, apenas nós fixos. Para propor uma otimização da comunicação par a par, em redes, cujos nós possuem a distância entre si variável, foi desenvolvido um modelo para a análise do impacto real que o tamanho máximo do pacote pode exercer. As análises tiveram o foco em redes compostas por rádios de baixa potência e baixo consumo de energia como o Xbee 802.15.4. Estes rádios tendem a utilizar protocolos que implementam pacotes de transmissão de tamanho reduzido. Neste caso, a redução dinâmica do tamanho do pacote só é interessante em situações adversas, onde a força do sinal recebido está muito próxima do limite de sensibilidade do rádio que, em um ambiente de comunicação ideal, é quando os rádios se encontram quase no limite de seu alcance. Para rádios de baixa potência, como o utilizado nos experimentos, em condições ideais, a eficiência de utilização do canal de comunicação, em geral, é maior o quão maior for o tamanho de seu pacote. O modelo analítico aplicado nesta análise pode ser utilizado como um limite superior para a eficiência de utilização de canal a uma certa distância d . Entretanto, a variação da força do sinal recebido, em relação ao ambiente em que os rádios se encontram, prejudica muito este tipo de previsão quando baseada em apenas um parâmetro, como, no caso, a distância entre os nós. É interessante desenvolver um modelo de utilização da eficiência do canal, que também leve em consideração a força do sinal recebido, RSSI, ou seja, um modelo que não dependa apenas da distância entre os nós. Para facilitar a adaptação de modelos analíticos e simuladores a ambientes dinâmicos, seria bem-vinda a realização de um estudo para caracterizar ambientes de

comunicação que se baseiam em mais de um parâmetro, como a variação do valor da força do sinal recebido e a distância entre os nós. Esta caracterização com mais parâmetros deve tornar o modelo analítico para previsão mais robusto.

A prova de conceito de uso de um VANT em uma rede aérea como mola de dados foi proposta e implementada neste trabalho. Foi demonstrado que é possível a realização de coleta de dados de uma rede de sensores reais por um VANT. Apesar da baixa vazão de dados, os nós sensores consomem uma menor quantidade de energia para se comunicarem com o VANT. Em uma rede de sensores sem fio, de topologia previamente indefinida e com nós idênticos, esta maneira de coletar os dados promove um consumo mais uniforme da bateria entre os nós sensores. Isto aumenta a vida útil de cada um dos nós. Além disto, foi desenvolvida uma biblioteca que realiza a interface entre o microcontrolador MSP430g2553 e o rádio Xbee 802.15.4, que pode ser expandida e facilmente utilizada em outros projetos que utilizem estes dois componentes. O experimento, com nós sensores reais e um nó móvel real, demonstrou que a coleta de dados realizada por um nó aéreo não só é possível como não apresenta alto nível de complexidade. Portanto já pode ser implementada em redes de sensores existentes. Dos três diferentes métodos implementados, a coleta com transmissões simultâneas resulta em uma maior perda proporcional de pacotes. Em contrapartida, exige que uma menor quantidade de pacotes seja transmitida. Os resultados indicam que, para priorizar economia de energia e, portanto, aumentar o tempo de vida médio da rede de sensores, o método de coleta ideal, neste cenário, é mover o VANT entre os nós e coletar diretamente de cada um, ao invés de rotear os pacotes pela rede, em cenários que apenas um ou uma menor quantidade de nós funciona como ponte entre o VANT e os nós sensores.

O desenvolvimento de um protocolo de roteamento, que leve em consideração a distância e a força do sinal recebido entre os nós, para definir dinamicamente o tamanho máximo de seu pacote, pode ser de grande valia para melhorar a qualidade de comunicação entre VANTs e pode ser objeto de estudo em próximos trabalhos sobre o tema. Além disto, este protocolo pode ser planejado para rotear os pacotes da maneira mais eficiente possível em uma rede, no caso em que um nó com mobilidade seja a ponte entre um grupo de sensores e outro, ou entre um grupo e o centro de operações. Os resultados obtidos indicam que se o foco for a economia de energia para prolongar a vida útil da rede de sensores, o protocolo pode dividir os nós distribuídos em grupos e cada grupo requisitar a presença do nó coletor em diferentes momentos, para que eles entreguem o pacote diretamente, ao invés de rotearem os pacotes pela rede.

Referências Bibliográficas

- Allred, J.; Hasan, A.; Panichsakul, S.; Pisano, W.; Gray, P.; Huang, J.; Han, R.; Lawrence, D. & Mohseni, K. (2007). Sensorflock: an airborne wireless sensor network of micro-air vehicles. Em *Proceedings of the 5th international conference on Embedded networked sensor systems*, pp. 117--129. ACM.
- Atomics, G. (2012). *Photo :: MQ-9 Reaper (weaponized)*. http://www.ga-asi.com/resources/library/index.php/Images/Aircraft-Platforms/Predator-B/JG-AF008_7537_PRED-B-MODIFIED (acessado em 18 de agosto de 2015).
- Balduccini, M.; Nguyen, D. N. & Regli, W. C. (2014). Coordinating uavs in dynamic environments by network-aware mission planning. Em *Military Communications Conference (MILCOM), 2014 IEEE*, pp. 983--988. IEEE.
- Boulis, A. (2009). Castalia, a simulator for wireless sensor networks and body area networks, version 2.2. *User's manual, NICTA*.
- Brasil, B. (2013). *Amazon testa drones para agilizar entregas*. http://www.bbc.co.uk/portuguese/videos_e_fotos/2013/12/131202_video_amazon_drones_f1 (acessado em 18 de agosto de 2015).
- Cameron, S.; Parr, G.; Nardi, R.; Hailes, S.; Symington, A.; Julier, S.; Teacy, L.; Mclean, S.; Mcphillips, G.; Waharte, S. et al. (2010). Suaave: Combining aerial robots and wireless networking. *Unmanned Air Vehicle Systems, Bristol*, 1865:7--20.
- Chirgwin, R. (2014). *Stop the IoT revolution! We need to figure out packet sizes first*. http://www.theregister.co.uk/2014/11/25/optimising_wireless_for_iiot_is_hard_say_boffins/ (acessado em 18 de agosto de 2015).
- Diamond, S. & Ceruti, M. (2007). Application of wireless sensor network to military information integration. Em *Industrial Informatics, 2007 5th IEEE International Conference on*, volume 1, pp. 317--322. IEEE.

- Erol, M.; Vieira, F.; Caruso, A.; Paparella, F.; Gerla, M. & Oktug, S. (2008). Multi stage underwater sensor localization using mobile beacons. Em *Sensor Technologies and Applications, 2008. SENSORCOMM'08. Second International Conference on*, pp. 710--714. IEEE.
- Erol, M.; Vieira, F. & Gerla, M. (2007). Auv-aided localization for underwater sensor networks. Em *Wireless Algorithms, Systems and Applications, 2007. WASA 2007. International Conference on*, pp. 44--54. IEEE.
- FierceMobileIT (2014). *Installed Base of 802.15.4-enabled Devices to Exceed 2 Billion by 2019; ZigBee to Face Increasing Competition.* <http://www.fiercemobileit.com/press-releases/installed-base-802154-enabled-devices-exceed-2-billion-2019-zigbee-face-inc> (acessado em 18 de agosto de 2015).
- Fu, S.; Zhang, Y.; Jiang, Y.; Shih, C.-Y. & Marron, P. J. (2014). An experimental study towards understanding data delivery performance over a wsn link. *arXiv preprint arXiv:1411.5210*.
- Gao, Q.; Blow, K. J.; Holding, D. J.; Marshall, I. W. & Peng, X. (2006). Radio range adjustment for energy efficient wireless sensor networks. *Ad hoc networks*, 4(1):75--82.
- Gao, S.; Zhang, H. & Das, S. K. (2011). Efficient data collection in wireless sensor networks with path-constrained mobile sinks. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, 10(4):592--608.
- Goldsmith, A. (2005). *Wireless communications*. Cambridge university press.
- Gomes, H. S. (2014). *Pizzaria de SP faz delivery com drone e entra na mira de Anac e FAB.* <http://g1.globo.com/tecnologia/noticia/2014/12/pizzaria-de-sp-faz-delivery-com-drone-e-entra-na-mira-de-anac-e-fab.html> (acessado em 18 de agosto de 2015).
- Gruener, W. (2012). *WWF Uses Google Money for Drones to Fight Poaching.* <http://www.tomshardware.com/news/google-wwf-drone-Poaching,19682.html> (acessado em 18 de agosto de 2015).
- Heimfarth, T.; Araujo, J. P. d. & Giacomini, J. C. (2014). Unmanned aerial vehicle as data mule for connecting disjoint segments of wireless sensor network with unbalanced traffic. Em *Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed*

- Computing (ISORC), 2014 IEEE 17th International Symposium on*, pp. 246--252. IEEE.
- Industry, D. (2012). *Quadrotor VTOL civilian UAV - U130*. <http://www.directindustry.com/prod/novadem/quadrotor-vtol-civilian-uavs-100893-934403.html> (acessado em 18 de agosto de 2015).
- Instruments, T. (2014). *MSP430G2553*. <http://www.ti.com/product/MSP430G255> (acessado em 18 de agosto de 2015).
- Jarvis, B. (2014). *Drones Are Helping Meteorologists Decipher Tropical Cyclones*. <http://www.pbs.org/wgbh/nova/next/earth/drone-meteorology/> (acessado em 18 de agosto de 2015).
- Joosting, J.-P. (2012). *IEEE 802.15.4 IC market to exceed \$1.1 billion in 2016*. http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1266509 (acessado em 18 de agosto de 2015).
- Korhonen, J. & Wang, Y. (2005). Effect of packet size on loss rate and delay in wireless links. Em *Wireless Communications and Networking Conference, 2005 IEEE*, volume 3, pp. 1608--1613. IEEE.
- Lee, J. (2005). An experiment on performance study of ieee 802.15. 4 wireless networks. Em *Emerging Technologies and Factory Automation, 2005. ETFA 2005. 10th IEEE Conference on*, volume 2, pp. 8--pp. IEEE.
- Oh, S.; Schenato, L.; Chen, P. & Sastry, S. (2007). Tracking and coordination of multiple agents using sensor networks: system design, algorithms and experiments. *Proceedings of the IEEE*, 95(1):234--254.
- Pompili, D.; Melodia, T. & Akyildiz, I. (2006). Routing algorithms for delay-insensitive and delay-sensitive applications in underwater sensor networks. Em *Proceedings of the 12th annual international conference on Mobile computing and networking*, pp. 298--309. ACM.
- Pottie, G. J. & Kaiser, W. J. (2000). Wireless integrated network sensors. *Communications of the ACM*, 43(5):51--58.
- Puri, A. (2005). A survey of unmanned aerial vehicles (uav) for traffic surveillance. *Department of computer science and engineering, University of South Florida*.

- Rabaey, J. M.; Ammer, M. J.; da Silva Jr, J. L.; Patel, D. & Roundy, S. (2000). Picoradio supports ad hoc ultra-low power wireless networking. *Computer*, 33(7):42-48.
- Rangel, R.; Kienitz, K. & Brandao, M. (2009). Development of a complete uav system using cots equipment. Em *Aerospace conference, 2009 IEEE*, pp. 1--11. IEEE.
- Rapp, A. (2008). *A Java API for Digi XBee/XBee-Pro OEM RF Modules*. <https://code.google.com/p/xbee-api/> (acessado em 18 de agosto de 2015).
- Rappaport, T. (2009). *Comunicações sem fio: Princípios e práticas*.
- Rappaport, T. S. et al. (1996). *Wireless communications: principles and practice*, volume 2. Prentice Hall PTR New Jersey.
- Ryan, A.; Zennaro, M.; Howell, A.; Sengupta, R. & Hedrick, J. (2004). An overview of emerging results in cooperative uav control. Em *Decision and Control, 2004. CDC. 43rd IEEE Conference on*, volume 1, pp. 602--607. IEEE.
- Sankarasubramaniam, Y.; Akyildiz, I. & McLaughlin, S. (2003). Energy efficiency based packet size optimization in wireless sensor networks. Em *Sensor Network Protocols and Applications, 2003. Proceedings of the First IEEE. 2003 IEEE International Workshop on*, pp. 1--8. IEEE.
- Sarris, Z. & ATLAS, S. (2001). Survey of uav applications in civil markets (june 2001). Em *The 9 th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation (MED'01)*.
- Sugihara, R. & Gupta, R. K. (2010). Speed control and scheduling of data mules in sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 7(1):4.
- Sullivan, J. (2005). Revolution or evolution? the rise of the uavs. Em *Technology and Society, 2005. Weapons and Wires: Prevention and Safety in a Time of Fear. ISTAS 2005. Proceedings. 2005 International Symposium on*, pp. 94--101. IEEE.
- Teh, S. K.; Mejias, L.; Corke, P. & Hu, W. (2008). Experiments in integrating autonomous uninhabited aerial vehicles (uavs) and wireless sensor networks.
- Vasilescu, I.; Kotay, K.; Rus, D.; Dunbabin, M. & Corke, P. (2005). Data collection, storage, and retrieval with an underwater sensor network. Em *Proceedings of the 3rd international conference on Embedded networked sensor systems*, pp. 154--165. ACM.

- Werner-Allen, G.; Lorincz, K.; Ruiz, M.; Marcillo, O.; Johnson, J.; Lees, J. & Welsh, M. (2006). Deploying a wireless sensor network on an active volcano. *Internet Computing, IEEE*, 10(2):18--25.
- XBee, P. M. & DigiMesh, X.-P. (2010). 2.4 oem rf modules, digi international.
- Yin, J.; Wang, X. & Agrawal, D. (2004). Optimal packet size in error-prone channel for ieee 802.11 distributed coordination function. Em *Wireless Communications and Networking Conference, 2004. WCNC. 2004 IEEE*, volume 3, pp. 1654--1659. IEEE.
- Zelinski, S.; Koo, T. & Sastry, S. (2003). Hybrid system design for formations of autonomous vehicles. Em *Decision and Control, 2003. Proceedings. 42nd IEEE Conference on*, volume 1, pp. 1--6. IEEE.