



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO E AUTOMAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

ANÁLISE DA VIABILIDADE DO USO DE XBEE PARA A IMPLEMENTAÇÃO DE UMA REDE MULTI VANTS

Filipe Viana Monteiro

Orientador: Prof. Dr. Pablo Javier Alsina

Natal/RN
Dezembro de 2016

Análise da Viabilidade do Uso de Xbee para a Implementação de um Rede Multi VANTs

Filipe Viana Monteiro

Orientador: Prof. Dr. Pablo Javier Alsina

Monografia apresentada à Banca Examinadora do Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia de Computação, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro de Computação.

Natal/RN
Dezembro de 2016

*Aos meus pais, Américo Monteiro
Filho e Rosalba Viana Monteiro, que
com todos os esforços, puderam me
proporcionar a melhor educação
possível.*

Agradecimentos

Primeiramente tenho que agradecer ao meus pais, Américo Monteiro Filho e Rosalba Viana Monteiro, que sempre me possibilitaram o melhor ensino que nos era acessível. Nunca esquecerei o esforço que fizeram, e ainda fazem, para educar a mim e a minha irmã Andreza. Espero um dia poder me tornar um pai tão bom quanto vocês.

Também devo agradecer aos amigos que sempre me apoiaram durante minha trajetória académica, seja ajudando a entender os conteúdos de sala de aula ou me ajudando a esquecer um pouco desses conteúdos e aliviar um pouco minha cabeça de toda a pressão que é a vida universitária.

Não posso esquecer do meu companheiro de testes, o mestrando Maurício Rabelo, que em muito me ajudou tanto na realização dos experimentos quanto na escrita desse trabalho, revisando meu texto e identificando oportunidades de melhoria.

Por fim tenho que agradecer, em especial, a excepcional turma de Engenharia da Computação formada em 2013, a qual faço parte. Acho que a nossa união foi um ponto que ajudou bastante na nossa formação. Nunca esquecerei das noites de estudos e projetos no DCA. E que venham muitas terças da pizza naquele mesmo lugar para comemorar nossas conquistas daqui pra frente.

Muito Obrigado a todos vocês.

Resumo

Esse trabalho é complementar ao desenvolvimento de uma arquitetura de rede e estratégia de busca a ser implementada no projeto SpaceVANT realizado pelo Centro de Lançamento da Barreira do Inferno (CLBI) em parceria com a Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Aqui é discutida a possibilidade de utilizar a tecnologia XBee, mais especificamente o módulo XBee PRO S3 900HP, para a implementação da rede de comunicação de um sistema multi VANTs para varredura de uma área de impacto de foguetes.

Primeiramente, um breve descrição do projeto SpaceVANT é realizado no intuito de familiarizar o leitor com a problemática que guia o projeto, essa descrição inclui uma comparação entre a solução que está sendo utilizada pelo CLBI atualmente e a solução proposta. Logo após são descritas as funcionalidades do módulo XBee PRO S3 900HP o qual pretende-se utilizar para implementação.

Por fim, o protocolo utilizado para realização dos testes de qualidade da rede XBee é apresentado e seus resultados discutidos na ótica de um sistema multi VANT visando a operação de varredura de área de impacto de foguetes.

Palavras-chave: Rede de Comunicação; VANT; Rede Multi VANTs; Estratégia de Busca; Xbee.

Abstract

This work is complementary to the development of a network architecture and a search strategy to be implemented on the project SPACEVANT realized by the Barreira do Inferno Launch Center (CLBI) in partnership with Rio Grande do Norte Federal University (UFRN). The possibility of using XBee technology, more precisely the XBee PRO S3 900HP model, to implement the communication network on a multi UAVs system for rocket impact area surveillance is discussed here.

First of all, a brief explanation on the SpaceVANT is done in order to familiarize the reader with the problematic that guide the project, that includes a parallel between the solution as it is nowadays at the CLBI and the proposed one. Right after, XBee PRO S3 900HP functionalities are presented, as it is the model intended to be used on the proposed solution.

Lastly, the experimental protocol used for doing the quality tests on the XBee network is presented and its results discussed on the multi UAVs systems point of view, aiming the rocket impact area search operation.

Keywords: Comunication Network; UAV; Multi UAVs Network; Search Strategy; Xbee.

Sumário

Lista de Figuras	iii
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Estrutura do Trabalho	2
2 Projeto SpaceVANT	3
2.1 Solução Atual	3
2.2 Objetivo do Projeto	3
3 Características de um Rede Multi VANTs	5
3.1 Escalabilidade	5
3.2 Capacidade de Sobrevivência	6
3.3 Velocidade da Missão	6
3.4 Complexidade do Controle	7
3.5 Economia de Energia	7
4 Estratégia de Varredura	8
4.1 Varredura sem Divisão em Subáreas	9
4.2 Varredura com Divisão em Subáreas	10
5 XBee PRO S3B 900HP	11
5.1 Especificações Técnicas	11
5.2 Método de Configuração	12
5.2.1 AT Command Mode	12
5.2.2 XCTU Software	12
5.3 Modos de Operação	13
5.3.1 Transparent Mode	13
5.3.2 API Mode	14

6 Procedimento Experimental	16
6.1 Tecnologias Utilizadas	16
6.1.1 XBee <i>Explorer</i>	16
6.1.2 Phantom 3 Standard	17
6.1.3 XCTU	18
6.2 Local dos Experimentos	19
6.3 Experimentos Realizados	19
6.3.1 Teste de Chão	20
6.3.2 Teste em Ar a Distância Fixa	21
7 Resultados Experimentais	22
7.1 Teste em Solo	22
7.2 Teste em Ar a Distância Fixa	24
8 Conclusão	27
Referências bibliográficas	28

Lista de Figuras

2.1	Aeronave modelo Penguin.	4
3.1	Exemplo de topologia de uma rede multi VANTs composta por 4 nós.	6
4.1	Método de Busca em Espiral.	8
4.2	Método de Busca Vai e Volta.	9
4.3	Varredura Vai e Volta sem Subdivisão de Área.	9
4.4	Varredura Vai e Volta com Subdivisão de Área.	10
5.1	Pagina inicial do software XCTU.	15
5.2	Estrutura do <i>frame</i> no modo API.	15
6.1	Módulo XBee PRO S3B 900HP.	17
6.2	XBee <i>Explorer</i> .	17
6.3	Aeronave Phantom 3 Standard.	18
6.4	Tela de teste de força de sinal.	19
6.5	Tela de teste de taxa de transmissão (<i>throughput</i>).	20
6.6	<i>Phantom 3 Standard</i> preparado para experimentos.	21
7.1	Gráfico da taxa de sucesso de envio <i>versus</i> distância entre os dois nós da rede XBee.	23
7.2	Gráfico da taxa de transmissão de envio <i>versus</i> distância entre os dois nós da rede XBee.	23
7.3	Gráfico do RSSI local e remoto <i>versus</i> distância entre os dois nós da rede XBee.	25
7.4	Gráfico da taxa de transmissão de envio <i>versus</i> distância entre os dois nós da rede XBee.	26

Capítulo 1

Introdução

A utilização de veículos não tripulados já é bastante evidente em aplicações tanto civis quanto militares. Podem-se encontrar veículos dessa categoria substituindo a presença humana em situações onde há risco a integridade física ou quando o acesso é simplesmente impossível [Whitehead e Hugenholtz 2014]. Dentre os veículos não tripulados, temos a categoria de veículos aéreos não tripulados (VANTS) que são usados largamente para realização de filmagens aérea a baixo custo. Com o investimento de algumas centenas de dólares, qualquer pessoa pode começar a produzir imagens aéreas utilizando VANTS comerciais. O mercado está repleto de modelos comerciais disponíveis para o público em geral, como por exemplo os quadrirotor fabricados pela DJITM, o recém anunciado *Karma* fabricado pela GoProTM, entre outros.

As aplicações para veículos aéreos não tripulados não se restringe ao uso civil ou para gravação de imagens aéreas, esta plataforma já vem sendo utilizada também em aplicações militares. Ao aliar o poder da plataforma em questão com outras tecnologias, como por exemplo o processamento digital de imagens, problemas mais complexos podem ser resolvidos.

Um problema que pode ser solucionado com a utilização de VANTS dotados de ferramentas para processamento digital de imagem seria a identificação de embarcações não autorizadas em área de impacto de foguetes, problema esse relevante ao Centro de Lançamento da Barreira do Inferno (CLBI) localizado em Natal no Rio Grande do Norte.

Em parceria com a Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), através do projeto de pesquisa SPACEVANT, o CBLI vem desenvolvendo uma solução, incluindo software e hardware, para a realização da verificação da aérea de impacto de foguetes de forma autónoma utilizando VANTS.

1.1 Objetivos

Como parte do desenvolvimento dessa solução, este trabalho tem por objetivo validar as especificações técnicas do transmissor XBEE PRO S3 900HP adquirido para a implementação da rede de comunicação e a viabilidade da utilização desse tipo de equipamento no contexto de uma rede multi VANT.

A fim de realizar essa validação, foram realizados teste de força de sinal e taxa de transferência de pacotes em uma rede *mesh/ad hoc*, implementada por módulos XBee PRO S3 900HP, usando quadrirotóres *Phantom 3* do modelo Standard fabricados pela DJITM para variar a distância entre os pontos da rede e, posteriormente, verificar os efeitos do distanciamento nos parâmetros estudados.

1.2 Estrutura do Trabalho

Após este capítulo introdutório, é apresentada uma breve descrição do projeto SpaceVANT a fim de familiarizar o leitor com o contexto desse trabalho. Em seguida, no capítulo 3, são discutidas as características das redes multi VANTs.

A estratégia de varredura de área desenvolvida pelo mestrandoo Maurício Rabello para o projeto é apresentada no capítulo 4.

No capítulo 5, são apresentados os módulos XBee adquirido pelo projeto para a implementação da rede, descrevendo suas especificações técnicas e os modos de operação disponíveis.

Em seguida, o procedimento experimental desenvolvido, bem como os equipamentos utilizados para a sua realização, são apresentados no capítulo 6.

Por fim temos a discussão dos resultados experimentais e a conclusão do trabalho nos capítulos 7 e 8, respectivamente.

Capítulo 2

Projeto SpaceVANT

O projeto SpaceVANT é um projeto desenvolvido pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), alocado no Departamento de Engenharia da Computação e Automação, em parceria com o Centro de Lançamento Barreira do Inferno (CLBI). O projeto tem por objetivo tornar o processo de verificação da área de impacto de foguetes lançados pelo CLBI mais eficiente tanto em relação ao tempo gasto quanto ao custo financeiro.

2.1 Solução Atual

Atualmente, a área provável de impacto de um foguete a ser lançado é vistoriada com o auxílio de um avião tripulado que sobrevoa a área em busca de embarcações não autorizadas. Somente quando o avião sobrevoa toda a região e certifica que nenhum embarcação se encontra no local, o lançamento poderá ser autorizado.

A solução empregada no momento possui alguns pontos negativos, primeiramente, o custo com os aviões que realizarão a operação de varredura, bem como o custo de manutenção dos mesmos, é bastante elevado quando comparado com o custo de aquisição e manutenção de VANTS. Além disso, os aviões utilizados, atualmente, para fazer o processo de varredura, bem como os pilotos, são cedidos pela base aérea de Natal, o que gera uma dependência de recurso externo ao CLBI podendo atrasar a operação de lançamento de foguetes devido a indisponibilidade de aviões e pilotos por parte da base aérea.

2.2 Objetivo do Projeto

No intuito solucionar o problema apresentado de forma mais eficaz, o projeto SpaceVANT visa desenvolver sistema de VANTS autónomos que irá realizar a varredura da



Figura 2.1: Aeronave modelo *Penguin*.

área de impacto. O produto final do projeto incluirá: sistema supervisório, estação base, aeronaves autónomas do modelo *Penguin* (Fig 2.1) dotadas de computador e câmera fotográfica embarcados, sistema de processamento de imagens e, por fim, uma rede de comunicação que conectará todas a aeronaves e a estação base.

Para a realização da missão de varredura serão necessárias algumas entradas ao sistema, sendo elas, a quantidade de aeronaves a serem empregadas na missão, tempo de duração da missão, área a ser varrida e estratégia de varredura a ser utilizada, estratégias essas que serão apresentadas no Cap. 4.

Quando fornecidas todas as entradas corretamente, as rotas de voo serão definidas e carregadas nos VANTs e a missão terá inicio. O progresso da missão poderá ser acompanhado através da estação base e, caso alguma embarcação seja identificada, um alerta será lançado pela rede até chegar a estação base alertando o operador da missão. Esse alerta será composto pela imagem da possível embarcação identificada pelo sistema, a localização geográfica do objeto e a hora na qual ele foi identificado.

Dado o contexto em que esse trabalho se encontra e o objetivo do projeto SpaceVANT, as características de um rede multi VANTs para a aplicação serão discutidas a seguir.

Capítulo 3

Características de um Rede Multi VANTs

As redes multi VANTs são uma evolução do sistema de comunicação formado por apenas um VANT e a base de controle, onde toda a troca de informações é realizada através de um *link* entre as duas partes do sistema e, caso esse *link* fosse interrompido por algum motivo, toda a comunicação seria impossibilitada. A rede multi VANTs é, então, proposta com intuito de aumentar o alcance e a confiabilidade do sistema através da adição de novos nós.

[Gupta et al. 2015] apresenta algumas das características de uma rede multi VANTs comparando-as a solução baseada em um único VANT, sendo elas:

- Escalabilidade
- Capacidade de Sobrevivência
- Velocidade da Missão
- Complexidade do Controle
- Economia de Energia

3.1 Escalabilidade

Por definição uma rede multi VANTs é uma versão escalada da solução composta por um único VANT mais base de controle. Dessa forma, a adição de nós se torna uma operação comum a uma rede multi VANTs tornando-a uma solução escalável que pode variar o tamanho e, consequentemente, o alcance da rede dada as necessidades específicas da missão.

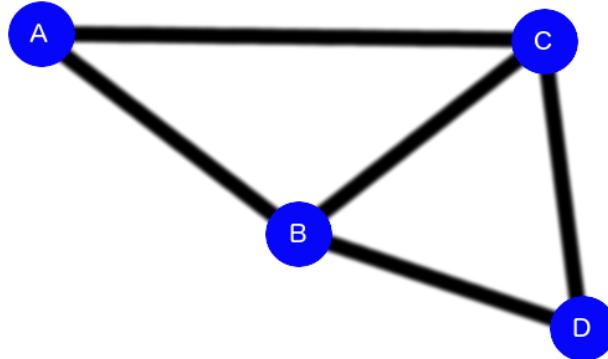


Figura 3.1: Exemplo de topologia de uma rede multi VANTs composta por 4 nós.

3.2 Capacidade de Sobrevida

Como mencionado anteriormente, em uma solução formada por um único VANT mais base de controle, a rede é composta por apenas um *link* e, caso esse seja interrompido, a comunicação entre esses dois nós será perdida. No entanto, dado que uma rede multi VANTs será formada múltiplos nós e *links*, em caso da perda de um nó a rede pode se reorganizar e garantir a sobrevida da rede como um todo.

Por exemplo, em uma rede composta por quatro nós em topologia *mesh* como mostra a fig. 3.1, no caso de falha do nó B, a comunicação entre os nós entre os nós A e D poderá ser feita através do nó C, garantindo assim a sobrevida da rede.

3.3 Velocidade da Missão

A velocidade de realização de uma determinada missão será proporcional ao tamanho da rede multi VANT, quanto maior a quantidade de VANTs em uma determinada rede a ser utilizada para executar uma missão de varredura de área, menor será o tempo da missão. Por exemplo, pode-se dividir a área a ser varrida em sub-áreas que serão varridas simultaneamente, alocando cada VANT disponíveis para a missão a uma sub-área diferente. Por outro lado, a adição de um nó a uma rede resultará no aumento do custo da missão. Dessa forma, é importante analisar os benefícios do aumento de uma rede multi VANTs do ponto de vista financeiro.

3.4 Complexidade do Controle

A complexidade do controle de uma rede composta por apenas um VANT e uma base de controle é baixa quando comparado ao cenário de uma rede multi VANTS. Quanto maior a quantidade de nós em uma rede maior será o custo computacional para controlar os nós e determinar os caminhos para realização da comunicação entre eles.

Outro ponto que aumente ainda mais essa complexidade é a frequente mudança de topologia da rede, seja causada pela movimentação rápida dos nós, que se dá nas três dimensões, ou pela perda de nós devido a problemas de funcionamento ou fim da carga da bateria que alimenta o VANT.

3.5 Economia de Energia

Como VANTS possuem fonte de alimentação limitada, é importante garantir que rede funcione da forma mais eficiente possível quanto ao consumo de energia, de tal forma que os nós possam permanecer ativos na rede pelo máximo de tempo possível. Caso a rede de comunicação consuma muita energia dos VANTS, será necessário a substituição de nós durante a execução de uma missão o que, consequentemente, aumentará o tempo necessário para a realização da mesma.

As características discutidas nesta sessão servirão de base para produção do protocolo de testes e, por fim, desenvolvimento da arquitetura de rede a ser implementada futuramente.

Capítulo 4

Estratégia de Varredura

Quando se utiliza apenas uma aeronave para realizar a varredura de uma área de impacto em busca de possíveis embarcações não autorizadas, pode-se utilizar de diferentes estratégias de voo, por exemplo, o método de varredura em espiral ou o método de varredura vai e volta [Öst 2012].

No primeiro método, a trajetória de voo é iniciada na extremidade da região e a aeronave percorrerá a área em espiral até o centro como mostra a figura 4.1.

O segundo método realiza a varredura em linhas realizando curvas de 180 graus ao atingir a extremidade da área como mostra a figura 4.2.

Em um cenário onde mais de um VANT será utilizado para a varredura de um área, há duas maneiras de acelerar a realização da missão, sendo elas realizar a inspeção com ou sem divisão em subárea.

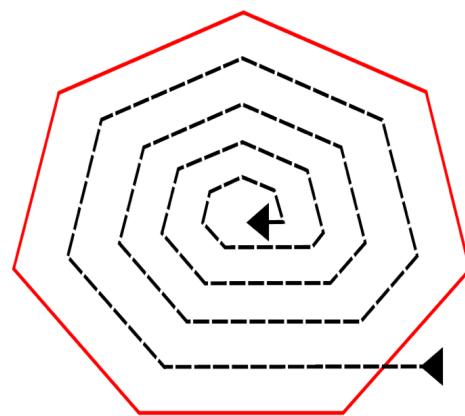


Figura 4.1: Método de Busca em Espiral.

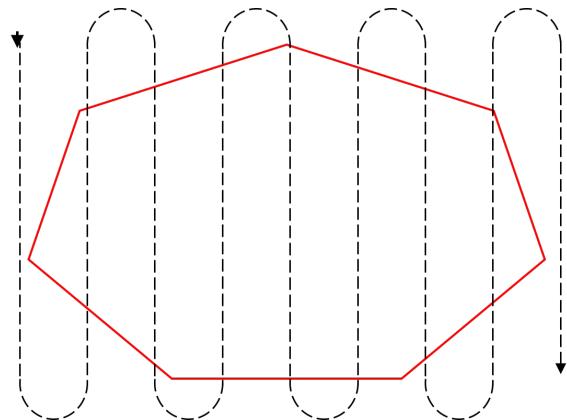


Figura 4.2: Método de Busca Vai e Volta.

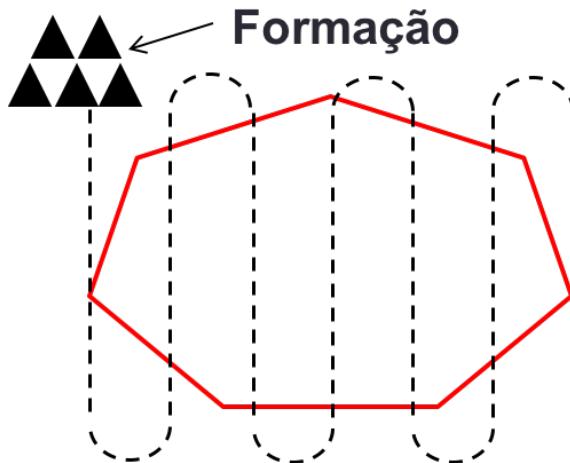


Figura 4.3: Varredura Vai e Volta sem Subdivisão de Área.

4.1 Varredura sem Divisão em Subáreas

Uma maneira de tomar proveito de uma rede multi VANTS para a varredura da área de impacto de foguetes seria realizar a missão varrendo a área por completo, mantendo os VANTS voando a uma mesma velocidade e espaçados igualmente realizando o mesmo percurso, como mostra a figura 4.3. Ambos, velocidade e distância entre VANTS, serão relacionados ao ângulo de abertura da lente da câmera utilizada, a velocidade do processamento de imagem, altura e velocidade de voo.

A utilização da estratégia sem divisão em subárea de varredura não há um considerável aumento de alcance da rede, pois os nós estarão sempre próximos. Por outro lado, em caso de perda de um nós o processo de reorganização é simples, bastando apenas aproximar os nós restantes.

Uma decisão que pode ser tomada para aumentar o alcance da rede seria utilizar um

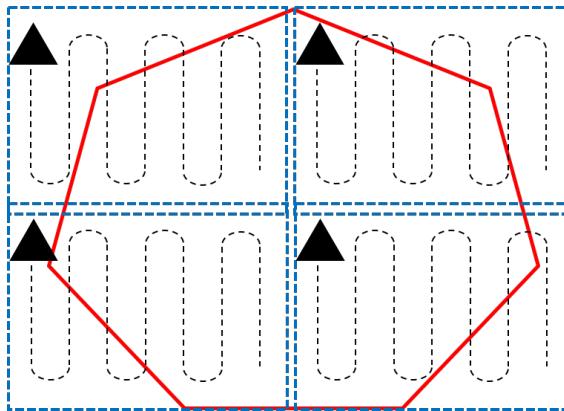


Figura 4.4: Varredura Vai e Volta com Subdivisão de Área.

nó de longo alcance e múltiplos nós de pequeno alcance, deixando a comunicação com a estação base a cargo do nó de maior alcance que funcionaria como *hub* para os demais nós. Um ponto negativo dessa solução seria que caso o nó *hub* perca conexão, os demais nós da rede também perderiam a conexão com a estação base.

4.2 Varredura com Divisão em Subáreas

Uma outra estratégia que poderia ser tomada seria dividir a área de varredura em subáreas de mesmo tamanho e utilizar os VANTs disponíveis para realizar a varredura de cada uma dessas subáreas como mostra a figura 4.4. Nessa solução teríamos um aumento significante de alcance da rede, de modo que os pacotes serão transportados de nó em nó até chegar a estação base ou nó de destino.

Em caso de perda de um dos nós da rede, a decisão a ser tomada para continuar a missão e garantir a varredura da área por completa não é tão trivial quanto na estratégia de varredura sem divisão em subáreas, sendo necessário dividir novamente a área levando em consideração a área já varrida utilizando, por exemplo, a técnica proposta por [Marro e Gonçalves 2013].

Ambas as estratégias de varredura apresentadas nesta sessão possuem seus pontos negativos e positivos e a decisão de qual deles deve ser utilizada será função do operador do sistema de varredura. Na sessão a seguir serão discutidas as especificações técnicas do módulo XBee adquirido pelo projeto.

Capítulo 5

XBee PRO S3B 900HP

O módulo XBee adquirido pelo projeto SpaceVANT para a implementação da rede multi VANTs foi o modelo XBee PRO S3B 900HP fabricado pela Digi InternationTM. Esse capítulo descreve as especificações técnicas, método de configuração dos módulos e modos de operação como apresentado no guia de usuário do dispositivo. [Dig 2015]

5.1 Especificações Técnicas

O guia do usuário do módulo XBee PRO S3B 900HP indica que o mesmo possui um alcance de comunicação de até 610 metros quando em ambiente interno ou urbano e transmitindo a 10 Kbps. Quando a taxa de transmissão aumenta para 200 Kbps, o alcance do módulo deve cair pela metade, ou seja, 305 metros. Para ambiente externo e com visada direta, o alcance será de 15,5 quilómetros transmitindo a uma taxa 10 Kb/s e 6,5 quilómetros quando transmitindo a uma taxa de 200 Kbps.

O módulo, que ocupa uma volume de aproximadamente 3.66 cm³ e pesa entre 5 e 8 gramas, deve ser alimentado com uma fonte de 2.1 até 3.6 volts de corrente contínua, mas para fontes inferiores a 3.0 VDC a performance do módulo pode ser reduzida. A Banda de frequência de operação é selecionável via software e varia entre 902 e 927 MHz. Quanto à *Interface* de dados, UART e SPI estão disponíveis para envio ou requisição de dados do módulo. O XBee PRO S3B 900HP também possui 15 pinos de I/O digital e 4 conversores analógico-digital de 10-bits distribuídos em 20 pinos físicos.

A respeito de rede e segurança, o módulo suporta redes de topologia *mesh*, ponto-a-ponto, estrela ou *peer-to-peer* utilizando IDs de 64 bits para endereçamento. Além disso, estão disponíveis 64 canais de comunicação que podem ser selecionados pelo usuário e opção de criptografia avançada padrão de 128 bits.

5.2 Método de Configuração

A respeito do processo de configuração dos módulos XBee, os parâmetros podem ser consultados e alterados de duas maneiras diferentes: forçando o aparelho a entrar em *AT Command Mode*, solicitando ou enviando os valores do parâmetros do XBee através da *interface* de dados, ou fazendo uso de do software XCTU disponibilizado pela Digi InternationalTM.

5.2.1 AT Command Mode

A maneira mais básica de configurar um módulo XBee é fazer uso do modo *AT Command Mode* enviando mensagens, de forma serial, requisitando valores de parâmetros ou solicitando alteração de algum parâmetro. É importante alertar que esse modo de configuração só é acessível através do uso da *interface* UART.

Para forçar um modulo XBee a entrar em modo de configuração é necessário enviar um sequência específica de caracteres, sendo essa sequência composta por três caracteres de adição (+++). Após receber essa sequência, o módulo retornará ‘OK’ indicando que o mesmo se encontra em *AT Command Mode* aguardando algum comando, caso nenhum comando seja enviado em até um segundo, o modulo sai automaticamente do modo de configuração.

Um vez que o módulo já se encontra em *AT Command Mode*, para solicitar o valor de um determinado parâmetro deve-se enviar a mensagem ‘AT’ acompanhada da sigla do parâmetro que deseja-se obter o valor. Por exemplo, para verificar o valor do parâmetro *Preamble ID* (HP), deve-se enviar o comando ‘ATHP’ e aguardar o retorno do valor atual do parâmetro.

Para alterar o valor de um parâmetro em *AT Command Mode*, deve-se enviar a mensagem ‘AT’ acompanhada da sigla do parâmetro a ser modificado e o novo valor do parâmetro em hexadecimal, o uso de um espaço para separar a sigla do parametro do valor a ser atribuído é opcional. Por exemplo, caso deseja-se modificar o valor do *Preamble ID* para 7FFF, envia-se ‘ATHP7FFF’ ou ‘ATHP 7FFF’.

5.2.2 XCTU Software

Uma forma mais simples de visualizar e alterar os parâmetros de um módulo XBee é fazer uso do software fornecido pela fabricante do módulo, no caso do XBee PRO S3B 900HP, o XCTU (figura 5.1) distribuido pela Digi InternationalTM.

Através do XCTU, pode-se procurar por módulos XBee conectados fisicamente ao computador onde a aplicação está rodando, visualizar e alterar os parâmetros do módulo conectado e até mesmo procurar os outros nós pertencentes a rede a qual o módulo está conectado, bem como visualizar e alterar os parâmetros dos outros nós da rede.

Além de visualizar e editar parâmetros, o XCTU também possui um modo de console, onde pode-se enviar mensagens ao módulo conectado e visualizar o conteúdo dos mensagens que estão entrando e saindo do módulo, e um modo de visualização de rede, disponível apenas para módulos operando em *API Mode*, onde são mostrados os nós que pertencem a rede do módulo conectado, bem como a topologia da rede.

O XCTU também possui algumas ferramentas para análise da qualidade da rede à qual o módulo XBee está conectado, por exemplo testes de força de sinal e *throughput*, os quais foram utilizados para aferir a qualidade dos *links* formados pelos XBee neste trabalho.

5.3 Modos de Operação

O módulo XBee PRO S3B 900HP possui três possíveis modos de operação, sendo eles: *Transparent Mode*, *API Mode* e *AT Command Mode*, utilizado exclusivamente para configuração do módulo e previamente explicado.

5.3.1 Transparent Mode

O *Transparent Mode* é o modo de operação padrão do XBee e é obrigatório o uso da interface UART ao utilizar desse modo. Quando funcionando em modo transparente, o módulo receberá dados, continuamente, através da porta UART e quando a quantidade de dados atingir o limite de *bytes*, determinado na configuração do parâmetro *Maximum RF Payload Bytes* (NP), os dados serão organizados em um *frame* pelo próprio XBee e esse pacote é então enviado para o destinatário definido pelos parâmetros *Destination Address High* (DH) e *Destination Address Low* (DL).

Apesar da facilidade de uso, esse modo de operação é indicado apenas para uso em redes com topologia ponto-a-ponto, onde o destinatário dos pacotes não varia com frequência, pois para mudar o destinatário de um pacote nesse modo de operação será necessário entrar em modo de configuração e alterar múltiplos parâmetros para cada envio. Sendo assim, esse modo não é adequado para a implementação de uma rede multi VANTs onde um mesmo pacote poderá ser enviado para múltiplos nós na rede, por exemplo.

5.3.2 API Mode

Diferentemente do *Transparente Mode*, onde o XBee realiza a operação de criação do *frame* que será transmitido, no *API Mode* o módulo já recebe o frame contendo todas informações como destinatário e tipo de dado, por exemplo, e apenas transmite o *frame* recebido de acordo com as informações do mesmo. Esse modo é compatível com ambas as *interfaces* UART e SPI.

A estrutura do *frame* a ser recebido pelo XBee está ilustrada na figura 5.2 e contém quatro campos principais. O primeiro *byte* do frame indica apenas o início do mesmo, seguido por dois *bytes* que irão indicar o tamanho do frame, sem contar o *byte* que é utilizado para garantir a integridade do *frame* através de um operação *checksum* e, por fim, a maior porção do *frame* contém o dado que está sendo transmitido e o identificador daquele tipo de dado.

Esse modo de operação é indicado para redes com topologia *mesh*, pois o destinatário do *frame* está indicado dentro do mesmo, sem a necessidade de configurar o módulo a cada novo envio. Sendo assim, o *API Mode* se apresenta como um modo de operação compatível com o contexto de um rede multi VANTs.

Apresentadas as especificações técnicas do módulo XBee PRO S3B 900HP, os modos de operação disponíveis e o ambiente de configuração e testes XCTU, o próximo capítulo descreve o procedimento dos testes realizados para avaliar a viabilidade desse módulo na implementação de uma rede multi VANTs, bem como os componentes utilizados nos testes.

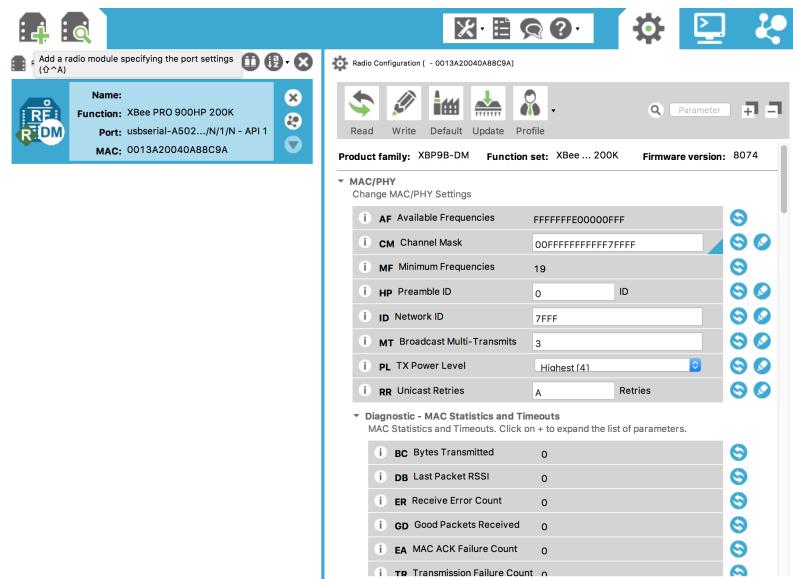
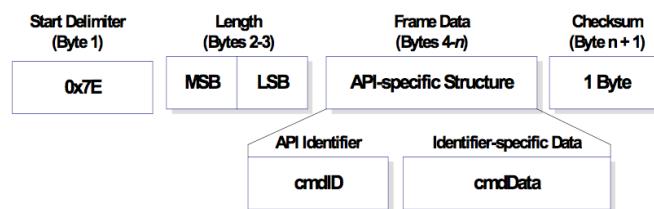


Figura 5.1: Pagina inicial do software XCTU.

Figura 5.2: Estrutura do *frame* no modo API.

Capítulo 6

Procedimento Experimental

Esse capítulo descreve os dispositivos e a metodologia utilizados na execução dos experimentos, o cenário onde esses experimentos foram realizados e, por fim, os experimentos realizados para aferir parâmetros de funcionamento dos módulos XBee PRO S3B 900HP.

6.1 Tecnologias Utilizadas

Além do módulo XBee PRO S3B 900HP (fig 6.1), foram utilizados na execução dos experimentos: módulos XBee *Explorer*, aeronaves *Phantom 3 Standard*, o software XCTU utilizado para a realização dos testes e uma fonte de alimentação externa para alimentar o conjunto módulo XBee + XBee *Explorer*.

As especificações técnicas, bem como o modo de funcionamento, dos módulos XBee já foram discutidos no capítulo 5. Os demais materiais utilizados serão descritos a seguir.

6.1.1 XBee *Explorer*

O XBee *Explorer* é a *interface de hardware* utilizada para conectar um módulo XBee a outros dispositivos, como por exemplo um computador. O módulo adquirido pelo projeto, como mostra a figura 6.2, possui duas formas de acesso ao módulo XBee acoplado a ele, sendo essas uma porta micro usb, utilizada para alimentação e comunicação, ou um conjunto de pinos contendo Rx, Tx, *reset* e os pinos a serem utilizados para alimentação.

Apesar da voltagem de alimentação dos módulos XBee ser de +3.3 volts, o XBee *Explorer* deve ser alimentado com uma fonte que forneça um tensão de +5 volts, que é reduzida para a voltagem de alimentação requerida pelo módulo XBee.

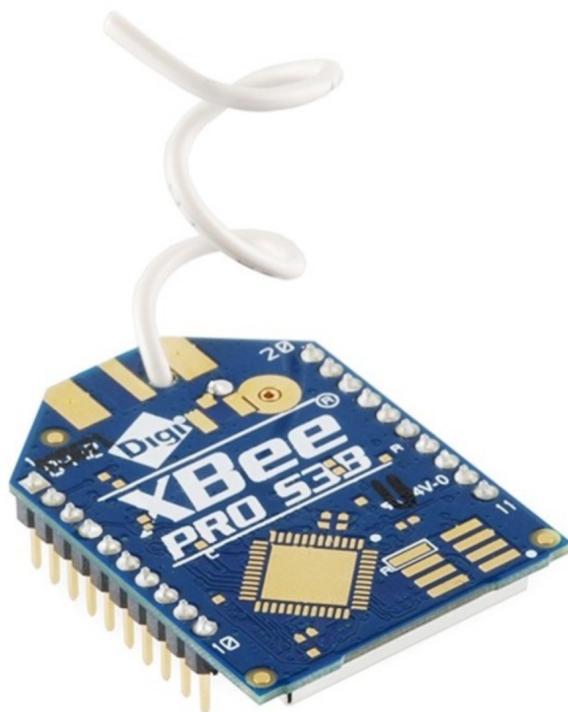


Figura 6.1: Módulo XBee PRO S3B 900HP.

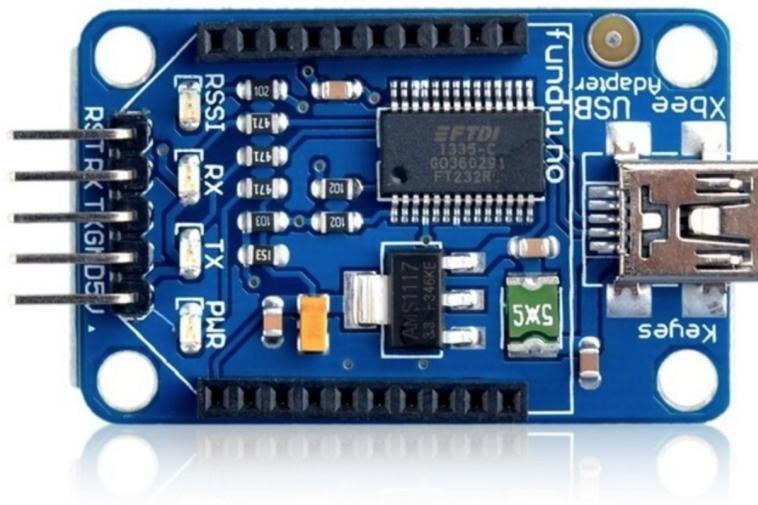


Figura 6.2: XBee Explorer.

6.1.2 Phantom 3 Standard

Outro dispositivo de grande importância para a realização dos experimentos foram os quadrirrotores do modelo *Phantom 3 Standard* (figura 6.3) adquiridos pelo projeto e

utilizados para variação e medição da distância entre os nós da rede *mesh* formada para a realização dos teste de performance.

As aeronaves são controladas utilizando um controle remoto que as acompanha e um *smartphone* executando o aplicativo DJI Go, que da suporte visual para a operação das aeronaves. Parâmetros como altitude de voo, velocidade vertical e horizontal, nível de bateria, distância entre a aeronave e o operador, entre outros, estão sempre de fácil acesso visual, bem como a imagem capturada pela câmera embarcada que é transmitida em tempo real para o operador.



Figura 6.3: Aeronave Phantom 3 *Standard*.

6.1.3 XCTU

O XCTU, brevemente apresentado no capítulo 5, é o *software*, disponibilizado pela fabricante dos módulos XBee, utilizado para configuração dos dispositivos e que também possui algumas ferramentas para análise da qualidade da rede formada. Ferramentas essas que foram utilizadas nesse trabalho para aferir a qualidade da rede, em especial o teste de força de sinal e o de taxa de transmissão (*throughput*).

As figuras 6.4 e 6.5 apresentam, respectivamente, as telas dos testes de força de sinal e taxa de transmissão disponíveis no *software* XCTU.

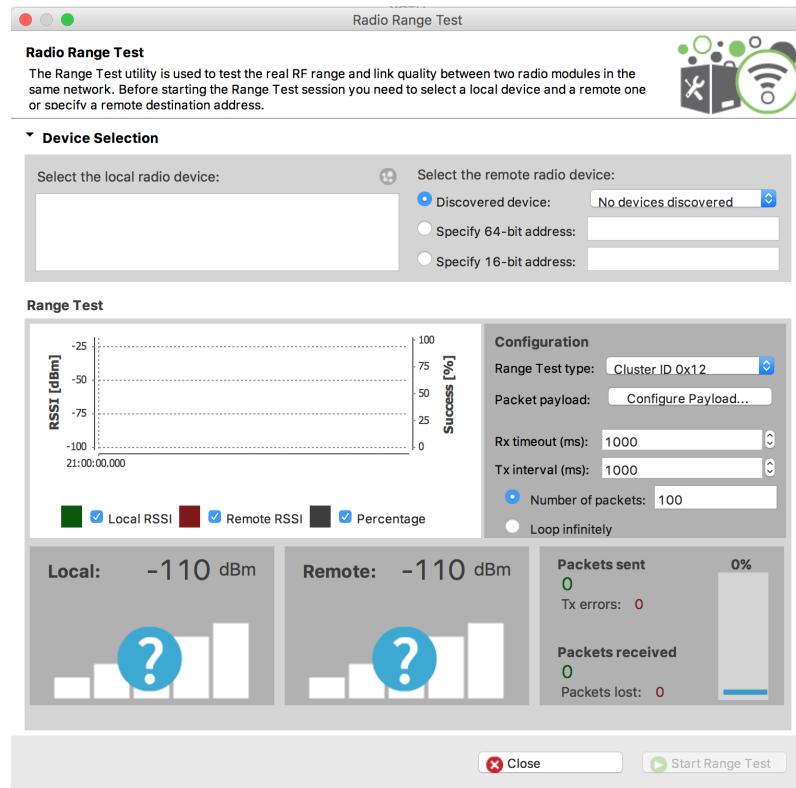


Figura 6.4: Tela de teste de força de sinal.

6.2 Local dos Experimentos

O local ideal para a realização dos experimentos seria o local onde o sistema final seria utilizado, ou seja, o próprio Centro de Lançamento Barreira do Inferno (CLBI), pois os testes refletiriam as condições específicas de interferência e meio de comunicação onde a rede multi VANTs será operada.

Infelizmente, devido a indisponibilidade de tempo e acesso, os testes de campo aqui apresentados foram realizados em sua maioria no campo central da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), o que pode ser considerado um ambiente urbano e pode apresentar níveis de interferência de sinal maiores que o ambiente onde a rede será de fato operacionalizada.

6.3 Experimentos Realizados

No intuito de aferir a qualidade dos *links* e, consequentemente, a rede a qual eles fazem parte, no contexto de um rede multi VANTs, foram realizados múltiplos testes de força de sinal e taxa de transmissão para diferentes cenários, sendo eles:

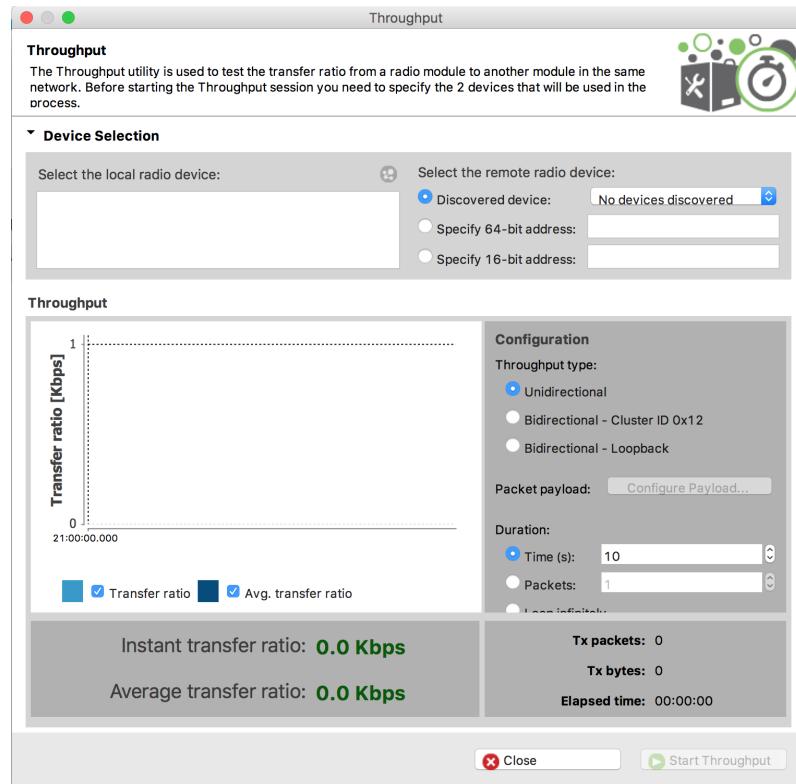


Figura 6.5: Tela de teste de taxa de transmissão (*throughput*).

- Teste em Solo
- Teste em ar a distância fixa

6.3.1 Teste em Solo

Para a realização dos testes em solo, o conjunto de equipamentos necessários (módulo XBee + XBee *Explorer* + bateria portátil) foram afixados ao *Phantom 3 Standard* com o auxílio de fita colante do tipo *silver tape*, como mostra a figura 6.6, e um outro módulo XBee foi conectado a um *notebook* dotado do *software* XCTU, através do módulo XBee *Explorer*.

O aeromodelo, embarcado com os equipamentos requeridos, foi então posicionado em diferentes pontos do campo e os testes de força de sinal e taxa de transferência, disponíveis no XCTU, foram executados e seus resultados armazenados para análise. Os testes foram realizados 5 vezes para cada distância e a média desses cinco resultados foi considerada para análise de desempenho.



Figura 6.6: *Phantom 3 Standard* preparado para experimentos.

6.3.2 Teste em Ar a Distância Fixa

Assim como nos testes de chão, com o auxilio de fita colante, um módulo XBee, um XBee *Explorer* e uma bateria portátil foram afixados ao aeromodelo (fig. 6.6) e um outro módulo XBee foi conectado, através do XBee *Explorer*, a um *notebook* dotado do software XCTU.

Uma vez que todos os equipamentos estavam devidamente conectados, a aeronave *Phantom* foi guiada, através do controle com o auxilio do supervisório DJI Go, para uma determinada região em ar para a realização dos testes. Para cada conjunto de testes, foi definida uma altitude e apenas a distância horizontal entre os módulos XBee foi variada.

Mais uma vez, os testes de força de sinal e taxa de transferência, disponíveis no XCTU, foram executados cinco vezes para cada distância e seus resultados armazenados para análise.

Capítulo 7

Resultados Experimentais

Antes mesmo de testar a qualidade da comunicação dos módulos XBee em chão, foram realizados testes de comportamento do aeromodelo *Phantom* quanto a possível interferência que a rede formada pelos XBee poderia causar na comunicação entre o mesmo e o controle remoto, afim de garantir a integridade de ambos os equipamentos envolvidos. Certificou-se, então, que o funcionamento da aeronave em nada era afetado com a presença da rede XBee.

7.1 Teste em Solo

Para a análise da qualidade da rede XBee em solo, foram realizados três testes de força de sinal a três diferentes distâncias, sendo elas 50, 100 e 236. Para cada teste foram enviados 40 pacotes de dados com metade da capacidade máxima de *payload*. Como mostra a figura 7.1, a taxa de sucesso de envio de pacotes cai de aproximadamente 95 por cento para 5 por cento entre as distâncias de 100 e 236 metros, praticamente eliminando o *link* de comunicação entre os dois nós da rede.

Para os testes realizados com 236 metros de afastamento entre os nós, nas quarenta tentativas de envio de pacote entre os nós da rede, trinta e oito delas acusaram *TX Errors*, o que significa que o nó remetente não foi capaz de criar o *link* de comunicação com o nó destinatário do pacote, resultando assim em apenas duas transmissões de dados bem sucedidas, resultando na taxa de sucesso de 5 por cento.

Quanto ao teste da taxa de transmissão de dados, foram realizados apenas dois testes sendo o primeiro com 50 metros de afastamento entre os nós e o segundo com 100 metros. Para a terceira distância, sendo essa 236 metros, foi impossível a realização do teste de taxa de transferência devido a má qualidade de comunicação. Os resultados desses dois testes podem ser vistos na figura 7.2.

O resultado de ambos os testes de força de sinal e taxa de transmissão não corres-

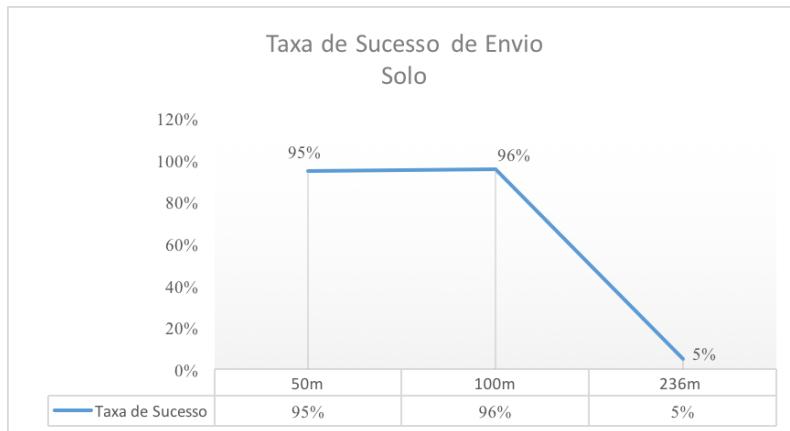


Figura 7.1: Gráfico da taxa de sucesso de envio *versus* distância entre os dois nós da rede XBee.

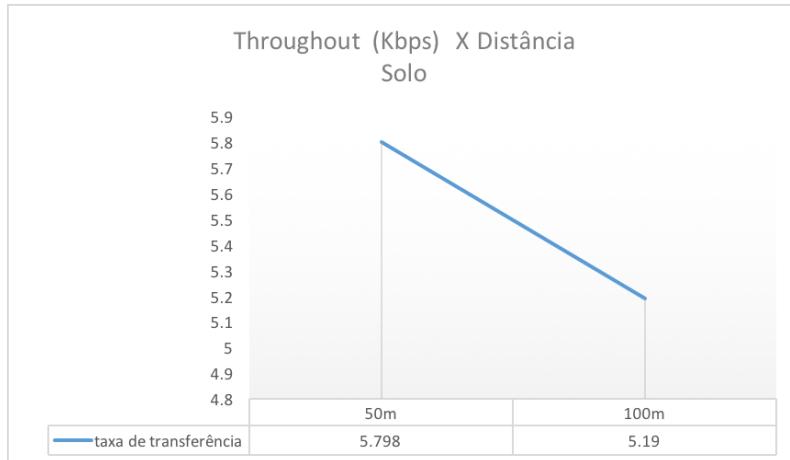


Figura 7.2: Gráfico da taxa de transmissão de envio *versus* distância entre os dois nós da rede XBee.

ponderam ao esperado. Como os testes foram realizados no campo central da UFRN, considera-se área urbana, esperava-se que os módulos tivessem uma performance próxima a indicada no manual do equipamento, que seria um alcance de aproximadamente 610 metros com uma taxa de transmissão de 10 kbps, ou 305 metros com uma taxa de transmissão de 200 kbps. Em contra partida, a comunicação entre os nós já foi comprometida a aproximadamente 235 metros e a taxa de transmissão alcançada nos testes a menor distância não ultrapassou os 6 kbps.

7.2 Teste em Ar a Distância Fixa

Os resultados obtidos nos testes realizados em ar foram consistentes com as especificações do módulo XBee. Foram realizados testes de força de sinal e taxa de transmissão com afastamentos entre os nós de 50 até 700 metros e altitude fixada em 80 metros, sendo de 50 a 400 metros com aumentos de 50 metros e de 400 a 700 metros com aumentos de 100 metros.

Para todos os testes realizados, todos os quarenta pacotes enviados, por teste, foram transmitidos com sucesso entre o nó remetente e o nó destinatário, resultando em um taxa de sucesso de envio de cem por cento em toda essa faixa de distância, que vai de 50 até 700 metros de afastamento entre os nós.

Apesar da excelente taxa de sucesso, a força do sinal transmitido entre os nós teve um comportamento inesperado. Em um cenário de afastamento entre os nós, o valor de RSSI deveria decai proporcional ao afastamento os nós, resultando em um *link* de conexão mais fraco entre os nós. No entanto, nos resultados do experimento esse indicador varia com a distância de afastamento de forma irregular. Esse comportamento pode ser verificado na figura 7.3, onde é possível observar que o valor apresentado decai até os 350 metros de afastamento, onde tem uma repentina subida, decai mais um pouco até os 400 metros e começa a aumentar novamente.

Quanto a taxa de transmissão, nos testes realizados em ar, os módulos XBee se comportaram de forma altamente inesperada, variando a taxa de transmissão de dados bruscamente, inicialmente, por razão indefinida. A figura 7.4 apresenta os resultados obtidos, onde pode-se observar que a taxa de transmissão tem um aumento repentino a partir dos 350 metros de afastamento entre os nós e permanece aumentando com o afastamento, chegando a atingir um *throughput* de aproximadamente 30 kbps.

Apesar do comportamento inesperado, os testes em ar foram condicente com as especificações do módulo. Já a respeito do comportamento inesperado, testes preliminares apontaram que fatores como o tamanho do pacote a ser enviado, bem como *baudrate*, possuem grande efeito tanto na taxa de sucesso da comunicação quanto na taxa de transmissão desses pacotes, o que leva a acreditar que a taxa de transmissão de 200 kbps apresentada no manual do módulo XBee poderá vir a ser alcançada mudando alguns parâmetros de configuração do módulo e características do pacote a ser enviado.

Os resultados obtidos nesse trabalho foram importantes para direcionar os testes futuros a serem realizados dentro do projeto SpaceVANT e produzir um protocolo de testes mais formalizado levando em consideração todos os parâmetros que afetam a qualidade

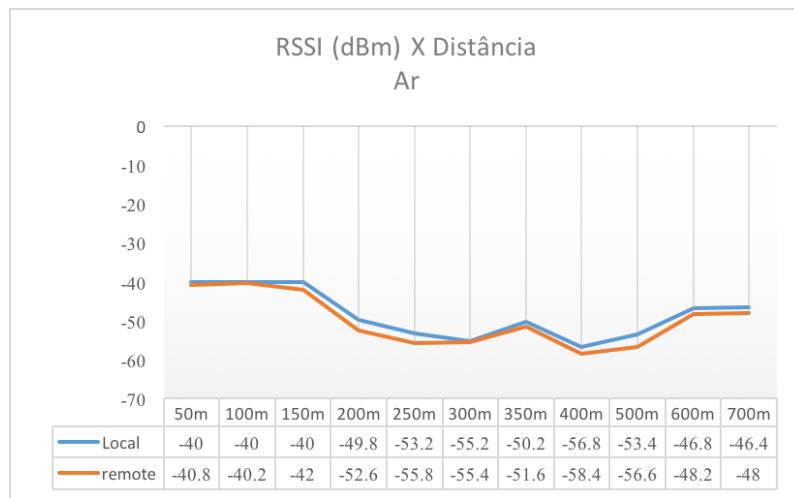


Figura 7.3: Gráfico do RSSI local e remoto *versus* distância entre os dois nós da rede XBee.

da conexão na rede XBee.

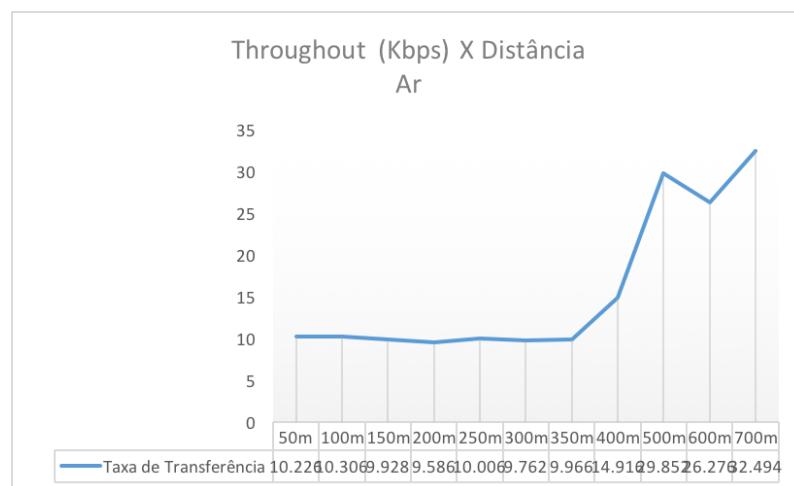


Figura 7.4: Gráfico da taxa de transmissão de envio *versus* distância entre os dois nós da rede XBee.

Capítulo 8

Conclusão

Apesar do local de realização dos testes não ter sido o ideal e alguns dos dados coletados não corresponderem com o que era esperado, os testes descritos nesse trabalho são de relevância para o estudo que está sendo realizado pelo mestrando Maurício Rabelo e, consequentemente, para o projeto SpaceVANT.

A partir dos testes realizados na própria UFRN, mais especificamente no campo de futebol central, foi possível identificar diversos parâmetros que interferem na taxa de sucesso de envio dos pacotes na rede XBee, parâmetros esses como: tamanho do *payload* do pacote sendo enviado e a configuração de *baudrate* do módulo XBee.

Sendo assim, por mais que os valores especificados no manual do dispositivo não tenham sido confirmados nos testes, principalmente nos testes em solo, os resultados se mostraram promissores. No entanto, ainda é prematuro dizer que o módulo XBee PRO S3 900HP é adequado para implementação do sistema proposto pelo projeto SpaceVANT, mas acredita-se que essa premissa se confirmará com a realização de testes mais direcionados, de preferência realizados nas instalações do CLBI, analisando os efeitos de uma configuração mais refinada do módulo XBee e mensurando o impacto do tamanho da mensagem transmitida no perda de pacotes.

Referências Bibliográficas

- Dig [2015], *XBee-PRO 900HP and XSC RF Modules S3 and S3B*. Revision R.
- Everaerts, Jurgen et al. [2008], ‘The use of unmanned aerial vehicles (uavs) for remote sensing and mapping’, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **37**, 1187–1192.
- Gupta, Lav, Raj Jain e Gabor Vaszkun [2015], ‘Survey of important issues in uav communication networks’, *IEEE Communications Surveys & Tutorials* **18**(2), 1123–1152.
- Marro, Alessandro Assi e Luiz Marcos Garcia Gonçalves [2013], A path planning method for multi-uav system, em ‘Robotics Symposium and Competition (LARS/LARC), 2013 Latin American’, IEEE, pp. 129–135.
- Mauricio R. Silva, Filipe V. Monteir, Pablo J. Alsina Adelardo A. D. de Medeiros Luiz F. Q. Silveira Marcelo B. Nogueira Glauberto L. A. de Albuquerque João B. D. Dantas [2016], ‘Análise comparativa de estratégias de varredura de Área para um sistema de comunicação multi vants no monitoramento da Área de impacto de foguetes sobre o mar’.
- Öst, Gustav [2012], ‘Search path generation with uav applications using approximate convex decomposition’.
- Whitehead, Ken e Chris H Hugenholtz [2014], ‘Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (uass), part 1: A review of progress and challenges 1’, *Journal of Unmanned Vehicle Systems* **2**(3), 69–85.