



Universidade Federal de Campina Grande
Coordenação de Estágio, Pesquisa e Extensão - CEPE
Departamento de Engenharia Elétrica

RELATÓRIO DE ESTÁGIO:

ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS VERTICAIS DE PROPAGAÇÃO
DE SINAIS UTILIZANDO O PROTOCOLO IEEE 802.15.4

PROFESSOR ORIENTADOR: José Sérgio da Rocha Neto (UFCG)

PROFESSOR CO-ORIENTADOR: Ian Andrew Glover (University of
Strathclyde)

ESTAGIÁRIO: Diego Pereira Rodrigues

EMPRESA: Universidade Federal de Campina Grande

SETOR: Laboratório de Instrumentação e Controle - LIEC

PERÍODO DE REALIZAÇÃO: Set 09 – Fev 10

FUNÇÃO: Engenheiro Eletricista

FORMAÇÃO PROFISSIONAL: Engenheiro Eletricista

DIEGO PEREIRA RODRIGUES

ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS VERTICAIS DE PROPAGAÇÃO
DO SISTEMA ZIGBEE

Relatório de estágio apresentado como
requisito à obtenção do grau de Engenheiro
Eletricista, no Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade Federal de
Campina Grande.

ORIENTADOR: PROF. DR. JOSÉ SÉRGIO DA ROCHA NETO
CO-ORIENTADOR: PROF. DR. IAN ANDREW GLOVER

CAMPINA GRANDE-PB

2010



DIEGO PEREIRA RODRIGUES

ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS VERTICAIS DE
PROPAGAÇÃO DO SISTEMA ZIGBEE

Aprovado em ____ de Fevereiro de 2010

ORIENTADOR: Dr. José Sérgio da Rocha Neto

CO-ORIENTADOR: Dr. Ian Andrew Glover

ALUNO: Diego Pereira Rodrigues

Campina Grande, ____/____/_____

À Deus, por eu ter chegado até aqui.
Às pessoas que estiveram mais presentes
ao longo desses cinco anos e que me deram
forças para seguir em frente quando eu mais
precisei: Minha irmã Larissa, minha mãe
Roseclê e meu pai Félix.

Agradecimentos

Agradeço aos meus orientadores Dr. José Sérgio da Rocha Neto e Dr. Ian Andrew Glover por tornarem este estágio possível. Agradeço ainda ao Eng. José Maurício José Maurício Ramos de Souza Neto e aos colegas Antonio Agripino da Costa Filho e Tony Carlos Moura Cavalcanti por terem composto um grupo esforçado e altruísta durante a realização deste projeto.

RESUMO

Este trabalho trata da análise das características de propagações de sinais sobre terra plana, mais especificamente sobre o comportamento da transmissão em relação à altura relativa das antenas (emissora e receptora). O resultado proposto aqui será utilizado em um projeto de localização via tecnologia *wireless* (IEEE 802.15.4).

Palavras-Chave: ZigBee. IEEE 802.15.4. Propagação em Terra Plana.

ABSTRACT

This report deals with the analysis of the signal's propagation over plane-earth, more specifically on the behavior of transmission in relation to the relative height of the antennas (transmitter and receiver). The result proposed in this report will be used within a location project via wireless technology (IEEE 802.15.4).

Keywords: ZigBee. IEEE 802.15.4. Propagation over Plane-Earth.

Sumário

1	Introdução	10
1.1	Objetivo Geral	10
1.2	Objetivos Específicos	11
2	Ambiente de Estágio	12
2.1	Etapas do Trabalho Proposto	12
2.2	Cronograma	13
2.3	Infraestrutura de Hardware e Software	13
3	ZigBee	14
3.1	Tipos de Dispositivos	15
3.2	Classes de Dispositivos Lógicos	16
3.3	Topologias de Redes ZigBee	16
3.4	Protocolo 802.15.4	17
4	Propagação no Espaço Livre	19
4.1	Potência Média Recebida no Espaço Livre	19
4.2	Propagação Sobre Terra Plana	20
4.3	Potência Recebida	22
5	Obtenção dos Dados	26
5.1	Características do Solo	27
5.2	Descrição do Experimento	28
5.3	Otimização dos Dados Coletados	32
6	Modelagem das Características do Sistema	34
6.1	Característica dos Dados Coletados	34
6.2	Otimização e Comentário sobre Resultado	36
7	Conclusão	40
	Referências	41
A	Anexos	42
A.1	Dispositivos utilizados	42
A.1.1	Módulo XBee™[9]	42
A.1.2	Módulo XBee-Pro™[9]	44

Lista de Abreviaturas

CEEI	Centro de Engenharia Elétrica e Informática
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
FFD	Full Function Device
IEEE	Institute of Electrical and Eletronics Engineers
ISM	Industrial, Scientific and Medical
LIEC	Laboratório de Instrumentação e Controle
MAC	Media Access Control
NWK	Network
OSI	Open Systems Interconnection
P2P	Peer-To-Peer
PHY	Physical Layer
RFD	Reduced Function Device
SI	Sistema Internacional
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WWAN	Wireless Wide Area Network
ZC	ZigBee Coordinator
ZED	ZigBee End Device
ZR	ZigBee Router

Lista de Figuras

1	Topologias das redes: a) <i>Cluster Tree</i> (Árvore), b) <i>Star</i> (Estrela), c) <i>Mesh</i> (Malha)	17
2	Camadas do protocolo 802.15.4[11]	18
3	Propagação no meio livre[2]	19
4	Propagação em terra plana[2]	20
5	Potência recebida x Distância entre antenas[4]	24
6	Potência recebida x Altura da antena transmissora[4]	25
7	Campo de futebol onde os experimentos foram realizados. a)[10] b)[6]	26
8	Campo sobre o qual se realizou o experimento	28
9	Placas com módulos XBee-Pro™	29
10	Disposição das hastes no experimento	30
11	Haste com o módulo receptor	31
12	Sistema proposto pelo experimento	32
13	Fluxograma da otimização dos dados	33
14	Característica da potência recebida	34
15	Curva prática e teórica para a potência recebida com comprimento de enlace constante e variando-se a altura.	35
16	Fluxograma para obter curva teórica da potência recebida	36
17	Curva prática e curva teórica otimizada	37
18	Fluxograma para obter parâmetros otimizados	39
19	Módulo Xbee™	42
20	Módulo Xbee-Pro™	44

Lista de Tabelas

1	Cronograma de atividades	13
2	Frequência ISM	14

1 Introdução

Com um plano de disciplinas bastante abrangente, o curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG tem ao final da grade curricular a disciplina Estágio, que deve ser cumprida obrigatoriamente. O estágio pode ser feito de dois modos: estágio integral, quando o aluno deve cumprir carga horária superior a 660 horas; e estágio supervisionado, com carga horária que varia entre 120 e 360 horas e que geralmente é feito em um laboratório de pesquisa. Este relatório descreve um estágio supervisionado.

A oportunidade de estagiar é fundamental para a fomentação da base do futuro formando. Na maioria das vezes, é no estágio que o aluno tem os primeiros contatos com os desafios constantes da vida profissional, e tem de utilizar seus conhecimentos para vencê-los. À medida que o graduando tem contato com suas tarefas, começa então a assimilar todo o conteúdo pragmático visto no decorrer da vida acadêmica e facilita o aprendizado até do que há de aprender no futuro.

Pedagogicamente, o aprendizado proveniente da experiência adquirida em situações problemáticas, ou baseadas nas atividades diárias ou repetidas com uma alta frequência, é muito mais eficiente e muito mais provável que seja retido pelo cérebro do que aquele aprendizado que se deve aos livros, aulas ou relativo a exames. Além disso, torna-se possível identificar deficiências e falhas de base, e auferir a qualidade do ensino que foi dado.

No caso do estágio supervisionado, feito dentro da instituição de ensino, têm-se a oportunidade de iniciar-se em pesquisas acadêmicas, desenvolvendo as habilidades críticas e heurísticas do estagiário.

Neste relatório, é descrito o estágio realizado no Laboratório de Instrumentação e Controle - LIEC, na UFCG. Os experimentos, discussões, pesquisas e cálculos foram realizados no laboratório supracitado e/ou na região de Patos, cidade situada no sertão paraibano e distante 310 km de João Pessoa. O estágio durou 5 meses, entre Setembro de 2009 e Janeiro de 2010.

1.1 Objetivo Geral

Este relatório tem como objetivo descrever as tarefas realizadas durante o estágio curricular supervisionado realizado como parte integrante de um projeto com que visa implementar uma técnica de localização por triangulação via tecnologia *wireless* (ZigBee). Esta técnica de localização será essencial para posteriormente simular o processo de alimentação de caprinos e ovinos na região de Patos, cidade situada no sertão paraibano.

Esta etapa do projeto consiste na formalização de um modelo que caracterize a propagação da tecnologia ZigBee em um campo aberto, em termos das alturas dos dispositivos envolvidos.

A fim de verificar o comportamento das curvas de propagação, foi feito um levantamento de dados e um estudo de suas curvas intrínsecas, no intuito de utilizar um método de localização com alta eficiência. Este método de localização tem como objetivo o conhecimento dos locais onde os indivíduos mais pastam, para assim averiguar que tipo de vegetação cada um consome. É também possível obter informação sobre a frequência com que se alimentam e quão diversificada são suas dietas.

1.2 Objetivos Específicos

Dentre os objetivos específicos desta etapa, enumeramos:

1. Obter os dados em campo e analisá-los a fim de retirar informações incertas e mensagens de erro.
2. Plotar a curva obtida nas medições, interpretá-las e compará-las com a curva teórica correspondente.
3. Montar modelo que se adéqüe às características de clima, vegetação e solo do local onde a coleta de dados foi feita, utilizando a teoria sobre refração do solo.

2 Ambiente de Estágio

O trabalho em questão foi feito nas dependências do laboratório LIEC, pertencente ao Centro de Engenharia Elétrica e Informática - CEEI na UFCG.

A UFCG é uma universidade gratuita (Pública Federal) fundada no dia 9 de Abril de 2002, dia em que se separou oficialmente da UFPB. Ainda como UFPB, obteve posição de destaque no cenário nacional pela sua excelente qualidade de seu ensino e pelos serviços prestados à sociedade. A universidade é composta por 7 campus, além de Campina Grande, existem campus nas cidades de Pombal, Patos, Sousa, Cajazeiras, Cuité, e Sumé, na região do cariri paraibano.

O CEEI da UFCG teve sua criação recente, em junho de 2005. Originando do Centro de Ciências e Tecnologia da UFCG é formado por duas Unidades Acadêmicas: Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) e Departamento de Sistemas e Computação (DSC). O CEEI tem como meta principal, criar novos cursos e manter os excelentes índices de desempenho dos cursos atuais[1].

No LIEC são desenvolvidas atividades de pesquisa nas seguintes áreas:

- Estabilidade de sistemas de controle distribuídos operando em tempo real
- Automação e controle de processos industriais utilizando redes de sensores/atuadores sem fio
- Confiabilidade dos Sistemas Instrumentados de Segurança
- Implementação e melhorias no BR-Tuning: Sistema para avaliação e sintonia de Controladores PID
- Automação de procedimentos, identificação de usuários e controle de acesso em unidades industriais utilizando tecnologia RFID e dispositivos móveis
- Interfaces Interativas com uma Network Camera utilizando C# para Aplicações em Automação Industrial[7]

2.1 Etapas do Trabalho Proposto

- A. Análise dos dados coletados a fim de retirar informações incertas e mensagens de erro.
- B. Geração da curva obtida nas medições, interpretação e comparação com a curva teórica correspondente.

- C. Montagem de modelo adequado às características de clima, vegetação e solo do local onde a coleta de dados foi feita, utilizando teoria sobre refração do solo.
- D. Encontrar as curvas de perdas na transmissão através do mapeamento de toda a área observada, de modo a minimizar prováveis fontes de erros devido à altura dos receptores, variáveis em altura, e diferença de ganho dos dispositivos.
- E. Preparar relatório e apresentação.

2.2 Cronograma

Tabela 1: Cronograma de atividades

ETAPAS	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Janeiro
A	X				
B	X	X			
C		X	X		
D			X	X	X
E				X	X

2.3 Infraestrutura de Hardware e Software

Lista de Softwares

- MatLab
- BizAgi Process Modeler

Lista de Hardwares

- Módulos XBee-Pro™ (descrição na página 44)

3 ZigBee

A comunicação sem fio (*wireless*) já está a disposição da sociedade há algum tempo, um exemplo disso são as redes WLANs, WMANs, e WWANs que já apresentam posição de destaque nos empreendimentos cujo objetivo é a transferência de grandes volumes de dados em altas velocidades. As redes wireless podem ser empregadas no controle de dispositivos como relés, trancas eletromagnéticas, motores, eletrodomésticos, aquisição de dados de sensores (como temperatura, luminosidade, umidade, pressão), etc, e dentre as redes WPAN existentes, a mais promissora é a que usa o padrão ZigBee IEEE 802.15.4. A ZigBee *Alliance* juntamente com o IEEE, trabalham no desenvolvimento do padrão a fim de torná-lo de baixo consumo de energia, baixo custo, com alta segurança, confiabilidade, e o mais importante, fazê-lo funcionar com uma norma aberta global.

O termo ZigBee designa um conjunto de especificações para a comunicação sem-fio entre dispositivos eletrônicos, definidos por camadas do modelo OSI subsequentes àquelas estabelecidas pelo padrão IEEE 802.15.4. A tecnologia utilizada é comparável às redes *Wi-Fi* e *Bluetooth* e diferencia-se destas pelo menor consumo, alcance reduzido e pelo fato das comunicações entre duas unidades poder ser feita sucessivamente pelas unidades existentes na rede até atingir o destino final. Com base neste funcionamento, todos os pontos da rede agem como retransmissores de informação fazendo com que uma malha (*Mesh*) de unidades ZigBee possa substituir os fios elétricos na comunicação entre processos dentro do chão fabril ou até mesmo numa função doméstica.

Atualmente, sistemas que utilizam tecnologia ZigBee permitem comunicações robustas, que não requerem licença para funcionamento e que operam na frequência ISM, como pode ser visto na Tabela2.

Frequência ISM		
Europa	Estados Unidos	Demais partes do mundo
868 MHz (1 canal)	915 MHz (10 canais)	2,4 GHz (16 canais)

Tabela 2: Frequência ISM

Este sistema também oferece excelente desempenho frente à interferências (com imunidade razoável contra elas), e capacidade de hospedar uma quantidade enorme de dispositivos em sua rede (mais que 65.000), com taxas de transferências de dados entre 20Kbps a 250Kbps.

A tecnologia ZigBee é destinado a aplicações industriais, portanto, o fator velocidade não é parâmetro de primeira prioridade quanto a implementações.

Os módulos RF padrão ZigBee foram criados para economizar ao máximo energia, com isso, é possível criar dispositivos sensores remotos alimentados com pilhas ou baterias comuns, que durarão meses ou mesmo anos sem precisarem ser substituídas. Isso é dado pelo estado de dormência ou "*Sleep*" que os módulos entram quando não estão transmitindo nem recebendo dados.

Dentre as razões pelas quais utilizamos de dispositivos transmissores e receptores com módulos ZigBee, podemos citar:

- Alcance longo de até 1600m (módulo XBee-Pro™);
- Baixo custo de energia;
- Capacidade de hospedar uma grande quantidade de dispositivos na rede.

de forma que os motivos para cada um desses pontos são entendidos a partir do que é descrito na seção 1.1, na página 10.

3.1 Tipos de Dispositivos

Existem dois tipos de dispositivos presentes em uma rede ZigBee: FFD e RFD.

- FFD - *Full Function Device* - São dispositivos mais complexos e precisam de um hardware mais potente para a implantação da pilha de protocolos, conseqüentemente, consomem mais energia. Numa topologia de rede ZigBee eles podem assumir o papel de Coordenador, Roteador ou mesmo de um dispositivo final (*End Device*). Dispositivos FFDs podem se comunicar com quaisquer membros da Rede. São implementados em microcontroladores com no mínimo 32KB de memória de programa e ter uma certa quantidade de memória RAM, para implementações de tabelas de rotas e configurações de parâmetros.
- RFD - *Reduced Function Device* - São dispositivos mais simples, onde sua pilha de protocolo pode ser implementada usando os mínimos recursos possíveis de hardware, como por exemplo, em microcontroladores de 8 bits com memória de programa próxima a 6KB, mas só podem se comunicar com dispositivos FFDs (Coordenador ou Roteador). Numa topologia de rede ZigBee eles assumem o papel de *End Device* (dispositivo final). Na prática podem ser: interruptores de iluminação, dimmers, controle de relês, sensores, entre outros[9].

3.2 Classes de Dispositivos Lógicos

Na tecnologia ZigBee existem três classes de dispositivos lógicos (Coordenador, Roteador e Dispositivo final) que definem a Rede:

- ZC - *ZigBee Coordinator* - Só pode ser implementado através de um dispositivo FFD. O coordenador é responsável pela inicialização, distribuição de endereços, manutenção da Rede, reconhecimento de todos os nós, entre outras funções podendo servir como ponte entre várias outras redes ZigBee.
- ZR - *ZigBee Router* - Só pode ser implementado através de um dispositivo FFD. Tem as características de um nó normal na rede, mas com poderes extras de também exercer a função de roteador intermediário entre nós, sem precisar do Coordenador. Por intermédio de um roteador uma rede ZigBee poder ser expandida, e assim ter mais alcance. Na prática um roteador pode ser usado para amplificar o sinal da rede entre andares de um prédio.
- ZED - *ZigBee End Device* - É onde os atuadores ou sensores serão hospedados. Pode ser implementado através de um dos dispositivos FFD ou RFD. Assim ele é o nó que consome menos energia, pois na maioria das vezes ele fica em dormência (*Sleep*)[9].

3.3 Topologias de Redes ZigBee

Existem três topologias diferentes para uma rede Zigbee:

- Mash (Malha ou Ponto-a-Ponto): Na topologia Mesh a rede pode se ajustar automaticamente, tanto na sua inicialização como na entrada ou saídas de dispositivos na Rede. A Rede se auto-organiza para otimizar o tráfego de dados. Com vários caminhos possíveis para a comunicação entre os nós, este tipo de Rede pode abranger em extensão, uma longa área geográfica, podendo ser implementada numa fábrica com vários galpões distantes; controle de irrigação ou mesmo num prédio com vários andares.
- Cluster Tree (Árvore): Semelhante à topologia de Malha, uma Rede em árvore, tem uma hierarquia muito maior e o coordenador assume o papel de nó mestre para a troca de informação entre os nós Router e End Device.
- Star (Estrela): É uma das topologias de Rede ZigBee mais simples de serem implantadas, é composta de um nó Coordenador, e quantos nós

End Device forem precisos. Este tipo de Rede deve ser instalada em locais com poucos obstáculos à transmissão e recepção dos sinais, como por exemplo, em uma sala sem muitas paredes ou locais abertos[9].

A Figura 1 ilustra estas topologias.

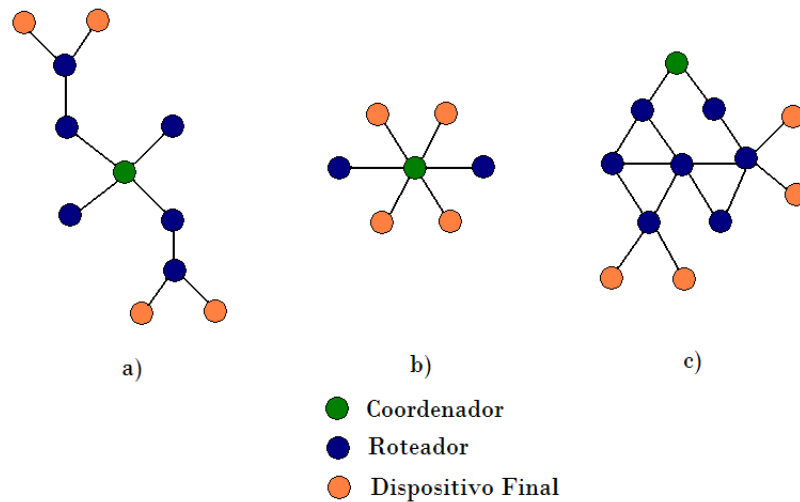


Figura 1: Topologias das redes: a) *Cluster Tree* (Árvore), b) *Star* (Estrela), c) *Mesh* (Malha)

3.4 Protocolo 802.15.4

O protocolo IEEE 802.15.4 de 2003 define as regras e compatibilidade de interconexão para dispositivos de transmissão de informação. Ele usa o método CSMA-CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) que lhe permite ter uma imunidade razoável a ruídos além de suportar as topologia Estrela e P2P (*Peer-To-Peer*).[5]

A pilha de protocolos é estruturada em cinco camadas como pode ser visto na Figura 2: PHY (*Physical Layer*), MAC (*Media Access Control*), NWK (*Network*), Suporte a Aplicação e Aplicação Perfil. As camadas MAC e PHY seguem a definição de IEEE 802.15.4. Já as camadas NWK e Suporte a Aplicação são definidas pela ZigBee Alliance[9].



Figura 2: Camadas do protocolo 802.15.4[11]

4 Propagação no Espaço Livre

O conceito de propagação no espaço livre consiste da transmissão não guiada de ondas no meio, onde são considerados os efeitos causados pelo solo e por obstáculos, bem como considera os efeitos devido ao meio de transmissão, como reflexão, refração, difração e outros.

Esta propagação deve-se às antenas, que permitem a transformação da energia guiada em energia radiada. Esta energia é propagada em diversas direções desde a antena emissora do sinal até à antena receptora. É a propagação típica associada às radiocomunicações. Mesmo que as antenas sejam construídas de forma a radiar a energia com uma área muito restrita, como é caso das antenas parabólicas, após a radiação a energia propaga-se livremente no espaço sem alteração da trajetória.

Um dos problemas neste tipo de propagação é que as perdas por dispersão são bastante consideráveis. O fato da onda não se propagar confinada a um determinado espaço físico, faz com que uma parcela da energia se espalhe, e apenas uma percentagem da energia original chegue ao emissor. Este tipo de propagação apresenta ainda outros tipos de desvantagens como: fraca segurança de informação e suas características variam no tempo.

Entre as vantagens, uma das mais importantes é a facilidade de difusão da informação. Basta ter em consideração a quantidade de receptores de rádio ou de televisão para os quais uma mesma estação consegue emitir. O sinal é espalhado pelo meio de forma que qualquer indivíduo possa capturar esse sinal, considerando sinais sem qualquer restrição de acesso. Como outros exemplos de vantagens podemos citar: a possibilidade de comunicação móvel e comunicação via satélite[8].

4.1 Potência Média Recebida no Espaço Livre

Considere a Figura 3 representando o envio e a recepção de ondas por duas antenas.

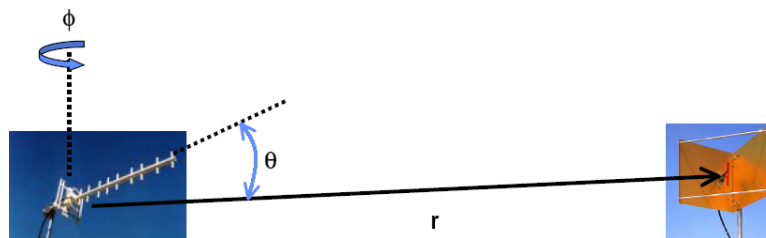


Figura 3: Propagação no meio livre[2]

A densidade de potência transmitida é dado pela equação 1.

$$S_T = \frac{P_T G_T(\theta, \phi)}{4\pi r^2} \quad (1)$$

Sendo a área equivalente da abertura da antenna receptora A_{ef} , a relação é entre área e ganho da antenna receptora é descrito pela equação 2:

$$A_{ef} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_R(\theta, \phi) \quad (2)$$

E a potência média recebida é:

$$P_R = S_T A_{ef} \quad (3)$$

Destas relações, substituímos as equações 1 e 2 na equação 3 e obtemos:

$$P_R = P_T \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 G_T(\theta, \phi) G_R(\theta, \phi) \quad (4)$$

4.2 Propagação Sobre Terra Plana

Em transmissões cujas antenas, transmissora e receptora, localizam-se sobre o mesmo plano, ou seja, a distância que as separa é tal que a curvatura da terra não precisa ser considerada, o solo funciona como meio refletor do sinal, culminando no aparecimento de uma segunda parcela de potência recebida. Temos então que o sinal recebido é composto dos sinais propagados diretamente e por reflexão. Existe ainda uma terceira parcela em termos de propagação (onda de superfície) mas que não contribui no sinal recebido.

Considere a situação proposta na figura 4:

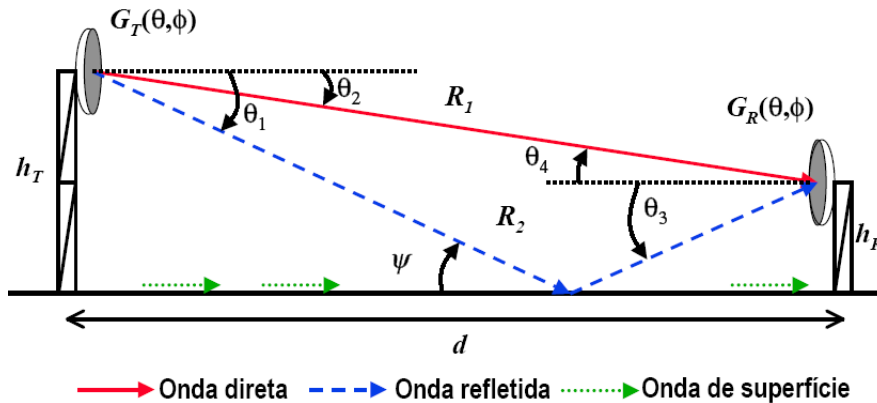


Figura 4: Propagação em terra plana[2]

Observa-se que o ponto onde ocorre a reflexão obedece a lei de Snell, que se traduz na relação de igualdade entre o ângulo de incidência e o de reflexão.

A intensidade do sinal refletido no solo depende de quatro fatores fundamentais: largura do feixe da antena; disposição do canal de comunicação entre as antenas (altura das antenas e distância entre elas); as características elétricas do solo no ponto de reflexão; e a suavidade do ponto de reflexão (a heterogeneidade do solo influi diretamente no sinal refletido)[4].

O campo elétrico que se propaga no meio na presença da terra plana apresenta 3 parcelas, e cada uma delas pode ser associada a um mecanismo de propagação:

- a) Campo direto: Campo que percorre o caminho direto entre as antenas transmissora e receptora.

A relação entre a densidade de potência e os campos eletromagnéticos irradiados é dado pela equação 5:

$$S_T = |E||H| = \frac{|E|^2}{120\pi} = \frac{P_T G_T(\theta_2, \phi)}{4\pi R_1^2} \quad (5)$$

desta forma, é possível escrever o campo elétrico na forma:

$$E_{direto} = \frac{\sqrt{30P_T G_T(\theta_2, \phi)}}{R_1} e^{-jkR_1} \quad (6)$$

- b) Campo refletido: Campo que percorre o caminho refletido entre as antenas.

Fazendo uma analogia com a equação 6, podemos escrever o campo refletido na forma da equação 7:

$$E_{refletido} = R_F \frac{\sqrt{30P_T G_T(\theta_1, \phi)}}{R_2} e^{-jkR_2} \quad (7)$$

onde R_F é o coeficiente de reflexão de Fresnel, expresso pela equação 8:

$$R_F = \begin{cases} \frac{n_c^2 \operatorname{sen}\psi - \sqrt{n_c^2 - \cos^2\psi}}{n_c^2 \operatorname{sen}\psi + \sqrt{n_c^2 - \cos^2\psi}}, & \text{pol. vertical} \\ \frac{\operatorname{sen}\psi - \sqrt{n_c^2 - \cos^2\psi}}{\operatorname{sen}\psi + \sqrt{n_c^2 - \cos^2\psi}}, & \text{pol. horizontal} \end{cases} \quad (8)$$

com

$$n_c = \sqrt{\varepsilon_R - j60\lambda\sigma} \quad (9)$$

Em que n_c é um inteiro que representa a ordem da elipsóide de Fresnel. E para pequenos valores de ψ temos $R_F \simeq -1$.

- c) Onda de superfície: Campo que percorre o caminho sobre o solo e que não participa da potência recebida pela antena receptora.

O campo elétrico devido à onda de superfície é descrito pela equação 10:

$$E_S = F_S \frac{\sqrt{30P_T G_T(\theta_1, \phi)}}{d} e^{-jkR_1} \quad (10)$$

onde F_S é um fator que depende da polarização do campo irradiado, do tipo de antena utilizado das características do solo e da frequência. Para sistemas de comunicação que utilizam antenas elevadas e operam em frequências altas, este fator tende a zero[2]. Este fator pode ser melhor entendido na subseção 4.3.

As variáveis e parâmetros relacionados nas equações acima são:

ϵ_R : permissividade relativa [F/m]

λ : comprimento de onda [m]

ψ : ângulo de incidência sobre o solo [rad]

σ : condutividade elétrica [Ω]

A_{ef} : área equivalente da abertura da antena receptora [m²]

d : tamanho do enlace [m]

E : campo elétrico [N/C]

$G_R(\theta, \phi)$: ganho da antena transmissora

$G_T(\theta, \phi)$: ganho da antena receptora

h_T : altura da antena transmissora [m]

h_R : altura da antena receptora [m]

H : campo magnético [T]

k : inteiro que representa a variação de fase

n_c : inteiro que representa a ordem da elipsóide de Fresnel

P_R : potência média recebida [W]

P_T : potência média transmitida [W]

r : distância entre as antenas transmissora e receptora [m]

R_1 : caminho percorrido pelo raio direto (linha de visada) [m]

R_2 : caminho percorrido pelo raio refletido [m]

S_T : densidade de potência transmitida [W/m²]

4.3 Potência Recebida

Em sistemas reais, as perdas de propagação direta e refletida são essencialmente iguais, porém, o defasamento total ocorrido nos sinais são diferentes.

Assumindo que os ângulos de partida e recebimento do raio refletido são pequenos comparados com a largura do feixe das antenas, então a intensidade do campo na antena receptora é apresentada pelo fator:

$$F_s = 1 + \rho e^{j\phi} e^{\frac{-j2\pi(R_2 - R_1)}{\lambda}} \quad (11)$$

onde $\rho e^{j\phi}$ é um coeficiente de reflexão, ρ é dado pela razão entre intensidade do campo da onda refletida e a intensidade do campo da onda de incidência, ϕ é o avanço de fase que ocorre devido à reflexão, $(R_2 - R_1)$ é a diferença entre as distâncias percorridas pelo raio refletido e direto.

O avanço de fase correspondente à reflexão pode ser descrito pela equação 12:

$$\beta = \frac{2\pi(R_2 - R_1)}{\lambda} \quad (12)$$

Este defasamento pode ser aproximado pela equação 13, em caso de sistemas reais.

$$\beta = \frac{4\pi h_T h_R}{\lambda d} \quad (13)$$

Desta forma, a equação 11 pode ser reescrita como:

$$F_s = 1 + \rho e^{j(\phi - \beta)} \quad (14)$$

No caso da superfície ser perfeitamente condutora, então $\rho = 1$ e $\phi = \pi$. Assim, a equação 14 torna-se:

$$\begin{aligned} F_s &= 1 + \rho e^{j(\pi - \beta)} \\ &= 1 - e^{-j\beta} \\ &= 1 - [\cos(-\beta) + j\text{sen}(-\beta)] \\ F_s &= 1 - \cos(\beta) + j\text{sen}(\beta) \end{aligned} \quad (15)$$

A magnitude de F_s , chamada de fator de ganho do caminho é dada por:

$$\begin{aligned} |F_s| &= \sqrt{1 - 2\cos(\beta) + \cos^2(\beta) + \text{sen}^2(\beta)} \\ &= \sqrt{2(1 - \cos(\beta))} \end{aligned}$$

$$= \sqrt{4\text{sen}^2(\beta/2)}$$

$$|F_s| = 2\text{sen}(\beta/2) \quad (16)$$

que representa a razão entre a intensidade de campo que chega à antena destino sob condições ideais de propagação sobre terra plana e sob condições de espaço livre. A razão das densidades de potência na antena receptora sob estas mesmas duas condições respectivamente é portanto $|F_s|^2$. A potência recebida da portadora em terra plana pode ser encontrada pela seguinte relação:

$$C = P_T G_T \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 4\text{sen}^2\left(\frac{2\pi h_T h_R}{\lambda d}\right) G_R \quad (17)$$

Podemos ainda escrever a equação 17 em dB:

$$C = P_T + G_T - FSPL + 6.0 + 20\log_{10} \left| \text{sen}\left(\frac{2\pi h_T h_R}{\lambda d}\right) \right| + G_R \quad (18)$$

onde $FSPL$ (free space path loss) representa a perda ao longo do enlace sob condições de propagação no espaço livre.

Nas Figuras 5 e 6 pode ser vista a relação entre a potência recebida, sua altura e o comprimento do enlace nas duas seguintes situações:

- a) Mantendo-se fixas as alturas de ambas antenas e variando-se o comprimento do enlace.

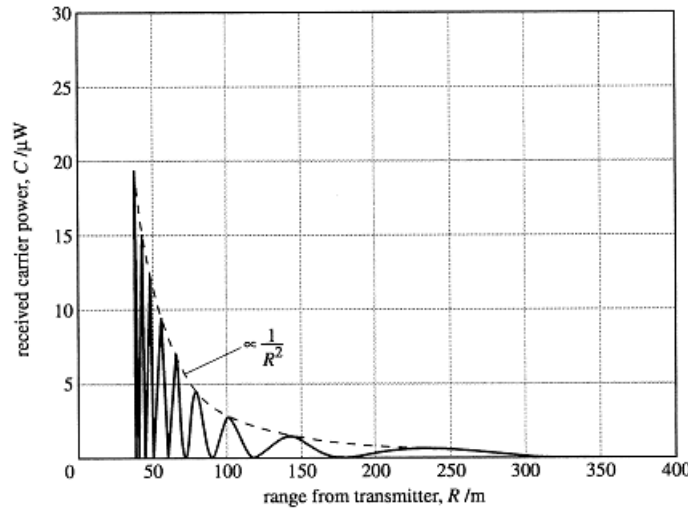


Figura 5: Potência recebida x Distância entre antenas[4]

- b) Mantendo-se o comprimento do enlace fixo e variando-se a altura apenas da antena transmissora.

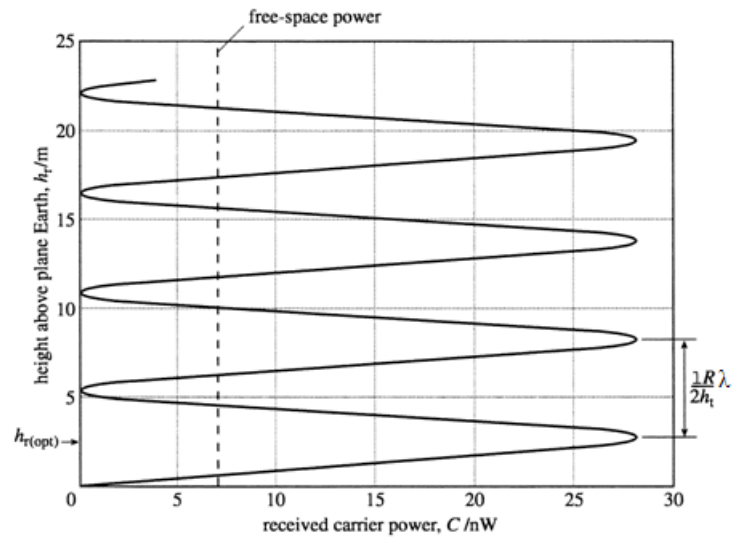


Figura 6: Potência recebida x Altura da antena transmissora[4]

A Figura 6 sugere que haja uma certa altura que otimize a potência recebida num enlace. Mas para se obter todo o benefício dessa otimização, a reflexão no solo deve ser estável a fim de que as alturas possam ser ajustadas. Considerando uma otimização útil e prática, a melhor altura para o sistema (e mais barata) é obtida no pico mais baixo da Figura[4].

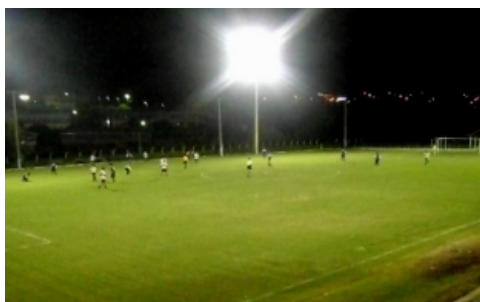
5 Obtenção dos Dados

Com base na maior dificuldade do deslocamento semanal para a cidade de Patos, a primeira decisão a ser tomada foi a escolha de um local próximo ao laboratório, que fosse amplo, que não trouxesse grandes interferências ao experimento e que pudesse simular as grandezas elétricas do solo da região na qual o trabalho será posteriormente utilizado.

A partir disso, utilizamos o campo de futebol presente no campus da universidade, o qual é visto na Figura 7 abaixo.



a)



b)

Figura 7: Campo de futebol onde os experimentos foram realizados. a)[10]
b)[6]

Dentre os requisitos desejados na procura do ambiente propício, o campo de futebol se mostrou razoável em todos eles, com exceção ao tipo de solo. O solo predominante na região do planalto da Borborema, mais especificamente no bairro de Bodocongó, onde a UFCG se situa, é do tipo Solo Netz Solodizado, diferente do tipo encontrado na cidade de Patos, Solo Bruno Não Cálculo[3]. Uma vez que as propriedades do solo variam conforme sua umidade, a taxa de precipitação do local, dentro outros, entendemos que o estudo

poderia ser feito em um tipo de solo diferente do de Patos, já que o sistema se propõe a funcionar mesmo com variações eventuais dessas características.

5.1 Características do Solo

As características do solo sobre o qual é realizado o experimento são importantes pois uma parcela do campo eletromagnético que chega à antena receptora percorre o caminho refletido (ver subseção 4.2, na página 20), e o ganho desse campo elétrico depende basicamente de três características do solo, as quais são descritas agora.

- a) Permittividade (ϵ): constante física que descreve como um campo elétrico afeta e é afetado por um meio. É determinada pela habilidade que um material apresenta de polarizar-se em resposta a um campo elétrico aplicado e, dessa forma, cancelar parcialmente o campo dentro do material. Está diretamente relacionado com a suscetibilidade elétrica. A permissividade do vácuo é $\epsilon_0 = 8,8541878176 \text{ pF/m}$ [13].
- b) Condutividade elétrica (σ): inversamente proporcional à resistividade elétrica, é indicativa da facilidade com a qual um material é capaz de conduzir uma corrente elétrica. A unidade no SI é $[(\Omega * m)^{-1}]$ [12].
- c) Desvio padrão do solo: medida da uniformidade do solo. Em um solo perfeitamente plano, todo o feixe do campo que atinge o solo na posição descrita pela lei de Snell, chega à antena destino. Conforme a densidade dos desníveis na área atingida por esse feixe aumenta, a intensidade do campo eletromagnético refletido diminui. Desta forma, este é um parâmetro igualmente relevante neste estudo.

Por se tratar de um campo de futebol, ele precisa ser irrigado com frequência. No caso da UFCG, ela acontece rigorosamente duas vezes por semana, às terças e quintas-feiras, durante 3 horas. Em decorrência desta prática e analisando o desvio padrão de umidade durante toda a semana, pode-se classificá-lo como um solo de carácter mediamente úmido. Além disso, a taxa pluviométrica da região também foi considerada.



Figura 8: Campo sobre o qual se realizou o experimento

5.2 Descrição do Experimento

O experimento consiste na medição da potencia recebida pela antena receptora trabalhando com comprimento de enlace fixo, enquanto varia-se a altura da antena transmissora. A partir disso, pode-se caracterizar o comportamento da transmissão entre as antenas com a variação de altura, e encontrar a altura ótima para determinado comprimento de enlace.

Neste experimento foram usados os seguintes materiais:

- 2 placas com módulos XBee-Pro™ (transmissor e receptor);

- 2 hastes de PCV para sustentação (uma de 2m e outra com 1.05m);
- 1 módulo para aquisição de dados;
- Fios de nylon para estear as hastes;
- 3 baterias;
- 1 computador para armazenar os dados.

Deve-se inicialmente estabelecer o reconhecimento dos módulos entre si, de forma a evitar problemas da emissão dos dados. Posteriormente, é feita a identificação do módulo transmissor e do módulo receptor, este último ligado à central de aquisição de dados dentro do enlace. As placas com os módulos tem seu *design* como mostrado na Figura 9.



Figura 9: Placas com módulos XBee-Pro™

Quando os módulos já estão habilitados à comunicação e já foram devidamente identificados, devemos criar o ambiente propício para o experimento. Estabelecemos a área onde as hastes serão sustentadas medindo a distância entre elas rigidamente. A haste maior, de 2 metros, foi dividida em seções de 5 cm para o encaixe da placa do módulo, como visto na Figura 9. Para sua sustentação, evitou-se o uso de materiais metálicos para evitar distúrbios na medição da potência recebida. Posto isto, a solução encontrada foi realizar

o esteio dessa haste. Utiliza-se os fios de nylon por dentro da haste e presas por estacas no chão.

Em seguida, a haste menor, sem seções, é posta 10 m adiante da primeira. Pode-se entender a disposição destas hastes pela Figura 10.

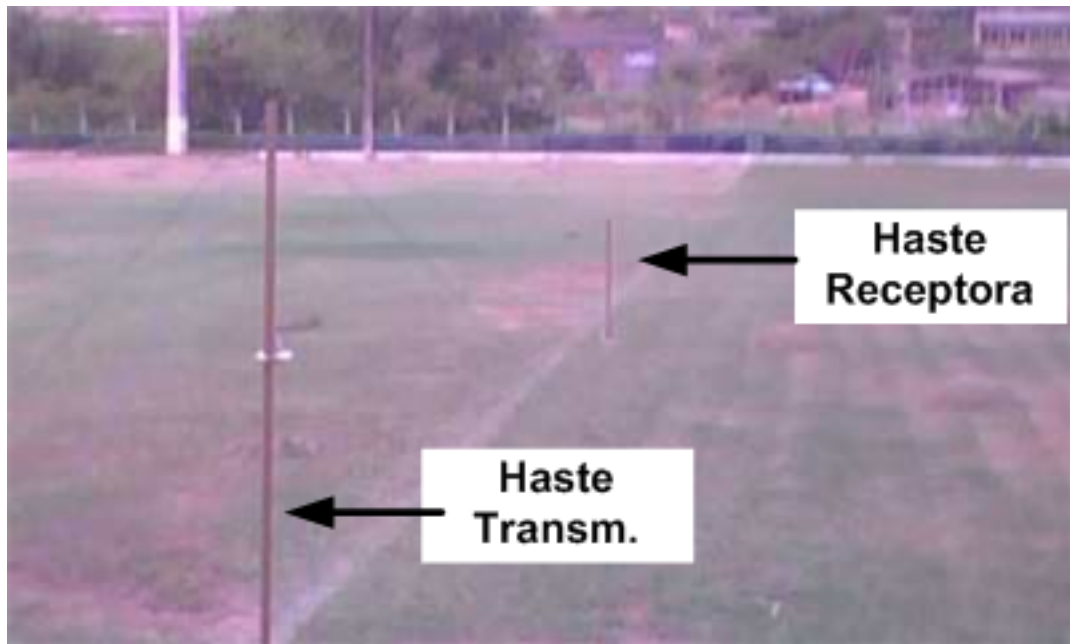


Figura 10: Disposição das hastes no experimento

Sobre a haste de PVC menor, foi colocado a placa com o módulo receptor, cuja altura foi fixada em 1,05m. A Figura 11 mostra o experimento a partir da visada do módulo receptor.

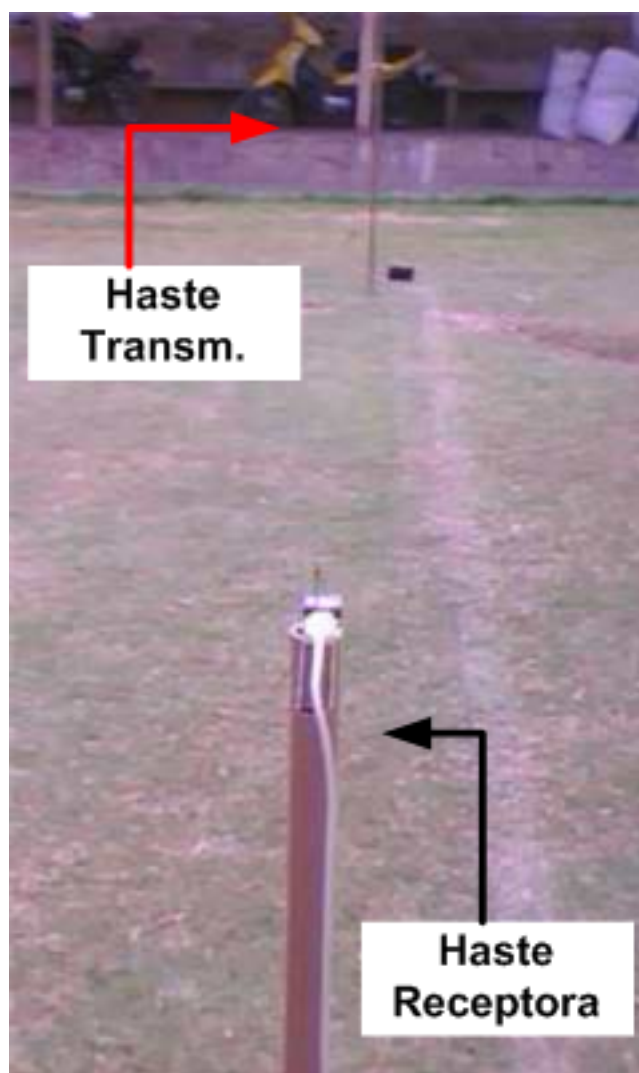


Figura 11: Haste com o módulo receptor

O próximo passo é a configuração do sistema de banco de dados para reconhecer os dados e seqüenciá-los de forma inteligível posteriormente.

Conectando-se as baterias, os módulos são ligados e o sistema estará pronto para o experimento. Coloca-se a placa do transmissor na primeira seção da haste maior, e mede-se a potência recebida pelo módulo receptor. O caminho que esta informação faz durante o experimento pode ser visualizada pela Figura 12. Como estamos tratando de um enlace, passamos a utilizar a nomenclatura correta, tratando as placas como "nós".

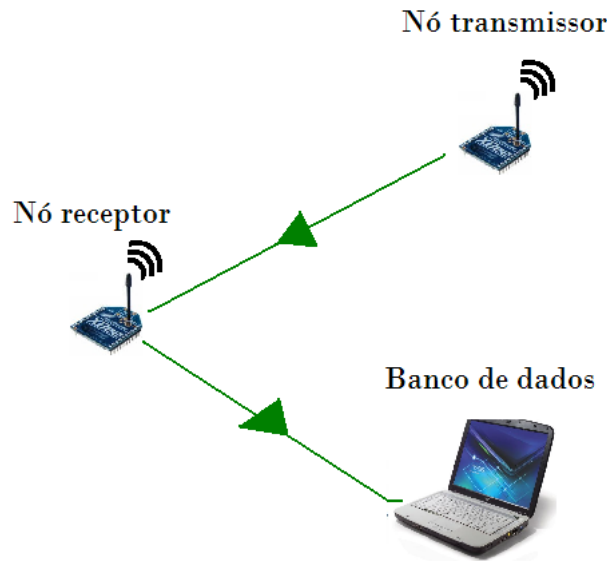


Figura 12: Sistema proposto pelo experimento

O nó transmissor sempre manda o sinal com a mesma intensidade para que a comparação de todas as alturas possa ser feita. O receptor recebe este sinal, analisa a potência recebida, e coloca o valor de potência no buffer de saída, que prontamente envia o dado para o módulo de aquisição, conectado fisicamente ao computador responsável pelo banco de dados. Este procedimento é repetido 100 vezes antes do módulo no nó transmissor ser colocado na posição seguinte. Em outras palavras, para cada seção da haste maior, teremos uma gama de 100 amostras de potência, aumentando assim o espectro de amostras e facilitando o reconhecimento de dados nulos e/ou inválidos, intrínsecos a qualquer medição.

Com o recebimento e validação das amostras, move-se para a próxima seção e assim por diante. Ao fim do experimento teremos 4000 amostras de potência (40 seções x 100 amostras), que é um número razoável para o propósito do projeto.

5.3 Otimização dos Dados Coletados

Ao término do experimento, foram obtidas 2000 amostras, mas nem todas podem ser utilizadas diretamente nos algoritmos propostos na seção 6. Como dito anteriormente, um número de dados devem ser descartados por serem nulos (frutos de erros no processamento nos nós) ou por serem incorretos (frutos de interferências provocadas por eventos do ambiente). Um algoritmo

então é necessário para varrer todo o banco de dados filtrando os dados incorretos. Este algoritmo é apresentado na Figura 13.

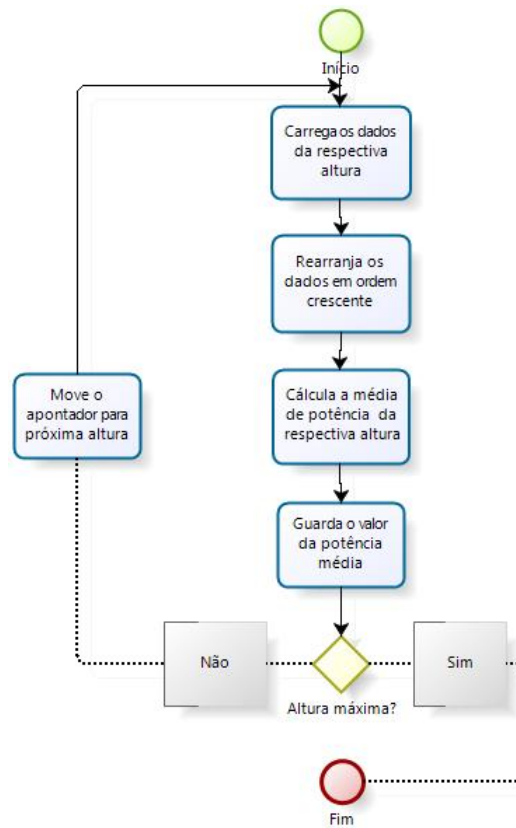


Figura 13: Fluxograma da otimização dos dados

Este algoritmo coloca os dados em ordem crescente a fim de eliminar os 25% de dados de menor valor e os 25% de dados com valores mais altos. Portanto, o cálculo da potência feito na tarefa seguinte do fluxograma é feito sempre com a faixa de valores intermediária, o que propicia um valor médio mais coerente. Ao final, teremos um vetor de potências recebidas médias para cada altura, e o utilizamos para a modelagem e caracterização do sistema.

6 Modelagem das Características do Sistema

A modelagem de um sistema consiste na formulação de modelos matemáticos que descrevem suas características. Os modelos podem apresentar-se como protótipos ou como modelos matemáticos, os quais podem prestar-se a soluções analíticas (modelos de regressão) ou à simulação, permitindo assim reconstituir a rotina funcional de um dado sistema real. Conforme o sistema proposto neste trabalho tem como parâmetro a ser estudado a potência recebida, devemos primeiramente observar se a característica da curva obtida é coerente com a teoria existente sobre o assunto.

6.1 Característica dos Dados Coletados

O comportamento da potência recebida no experimento pode ser observado na Figura 14.

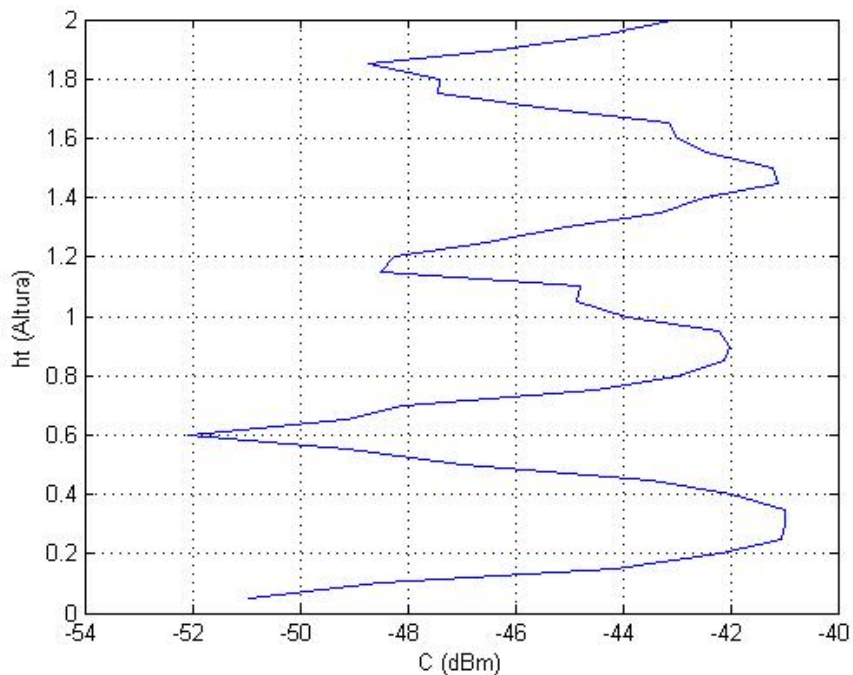


Figura 14: Característica da potência recebida

Comparando a Figura 14 com a Figura 6 na página 25, conseguimos a validação dos nossos resultados uma vez que eles apresentam-se com a mesma característica.

Plotando as duas curvas no mesmo gráfico, curva prática e teórica (Figura 15), pode-se ver que, embora tenham o mesmo comportamento, as duas curvas não são iguais. Isso se deve ao fato de que os parâmetros do solo não foram considerados corretamente (ver seção 5.1 na página 27), além do erro proveniente dos ganhos naturais dos módulos (*offset* de potência e de distância). O fluxograma do algoritmo que provê a curva teórica encontra-se na Figura 16, página 36.

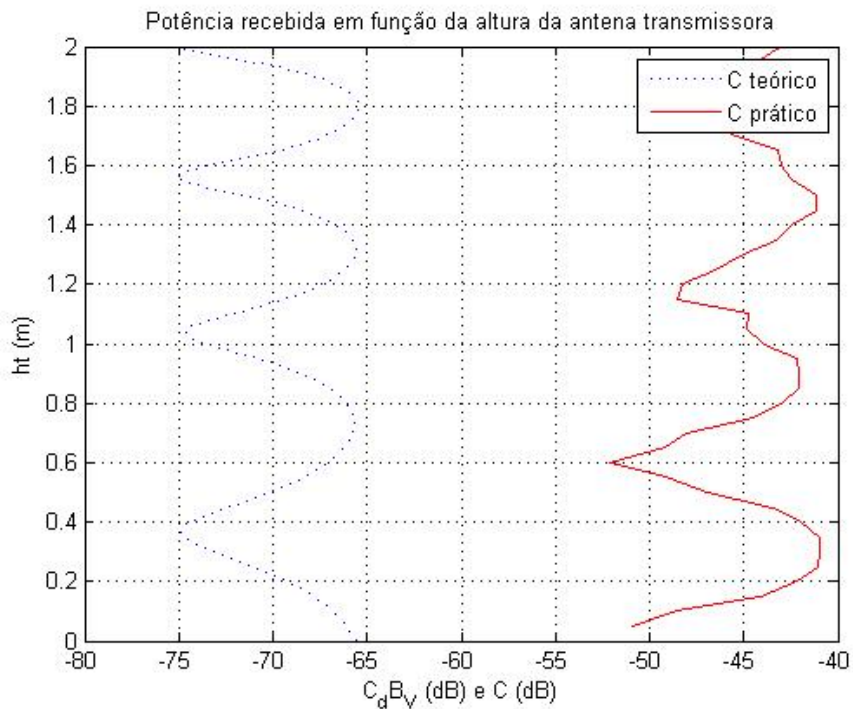


Figura 15: Curva prática e teórica para a potência recebida com comprimento de enlace constante e variando-se a altura.

Os valores corretos para estes parâmetros são encontrados a partir da otimização da curva teórica em termos de sua aproximação para com a curva prática. Ao se diminuir o erro entre as curvas, podemos avaliar com quais parâmetros de solo e ganho dos módulos se trabalhou.

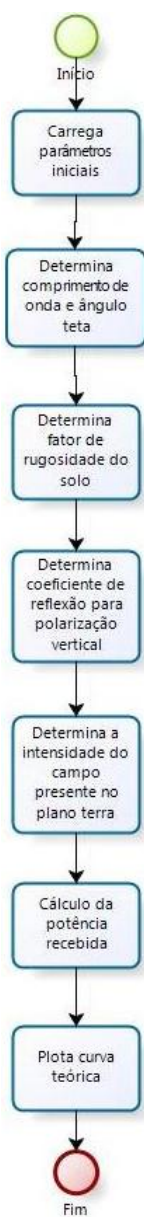


Figura 16: Fluxograma para obter curva teórica da potência recebida

6.2 Otimização e Comentário sobre Resultado

A curva teórica otimizada e a curva prática podem ser vistas na Figura 17 a seguir.

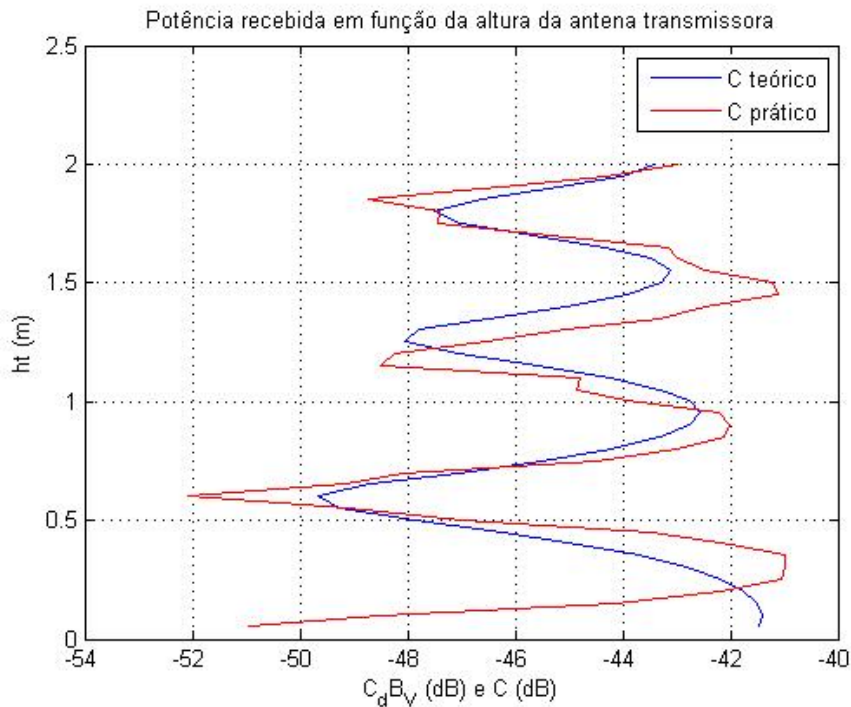


Figura 17: Curva prática e curva teórica otimizada

A otimização foi feita utilizando-se uma função do MatLab, chamada *fminimax()*. Esta função compara o erro quadrático entre as melhores soluções apresentadas para enfim encontrar a solução ótima. Após este processo, os parâmetros encontrados que retornam a solução ótima são listados abaixo:

- Permittividade (ε): 4,7722 F/m;
- Condutividade elétrica (σ): $0,8964 (\Omega * m)^{-1}$;
- Desvio padrão do solo: 0,03 m;
- Offset de potência: -6,07 dB;
- Offset de distância: 0,0017 m.

Foi obtido um erro quadrático de $e = 2,4939$. Os valores obtidos para os parâmetros são razoáveis e fazem com que a curva teórica se aproxime bastante da curva obtida experimentalmente. Assim, é entendível que o experimento foi bem sucedido e agora é possível saber a relação distância x altura que nos dá a menor perda de potência. No caso da distância proposta entre antenas, 10m, e altura da antena receptora de 1,05m, os pontos de máximo

são: 0,35m, 0,90m e 1,45m. Com base na futura utilização do projeto, escolhemos a altura de 1,45m, pois os módulos ficariam acima dos indivíduos do pasto e não sofreriam interferências devido à vegetação rasteira do local.

Além disso, podemos utilizar o nosso modelo para melhorar ainda mais o algoritmo de localização do projeto do qual este relatório faz parte, pois a partir do modelo em altura, em união com o modelo no plano horizontal, temos uma noção tridimensional do local a ser coberto pelo sistema. O fluxograma que gera a otimização pode ser visto na Figura 18, página 39.



Figura 18: Fluxograma para obter parâmetros otimizados

7 Conclusão

O uso de tecnologias *wireless* vem crescendo rapidamente conforme sua taxa de transferência aumenta e seu custo diminui. O resultado disso é a migração de diversos tipos de sistemas para este nexo. O sistema de localização utiliza-se predominantemente dessa tecnologia e para seu uso é necessário ter controle de alguma de suas características. Neste estágio, foi estudado as características de transmissão no que tange a altura das antenas. Os resultados obtidos foram razoáveis porém, embora os parâmetros obtidos fossem coerentes, fizeram com que a curva teórica sofresse um pequeno amortecimento e a função de minimização de erros não conseguiu encontrar parâmetros bons suficientes que não causassem este efeito.

Por fim, a realização do estágio foi comprovadamente importante para o aluno em questão, já que os conhecimentos teóricos adquiridos ao longo do curso puderam ser postos em prática e com isso perceber como esses conhecimentos são usados em aplicações do dia-a-dia.

Referências

- [1] CEEI. Ceei. <http://www.ceei.ufcg.edu.br/>.
- [2] C. G. do REGO. Conceitos básicos em propagação de ondas de rádio. Technical report, UFMG, 2003.
- [3] Embrapa. Solos do nordeste. <http://www.uep.cnps.embrapa.br/solos/>.
- [4] I. A. GLOVER, P. M. GRANT. *Digital Communications*. Prentice Hall, 2004.
- [5] IEEE. *Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*. IEEE Computer Society.
- [6] Janderson Jason. Iv jogos universitários da ufcg. <http://www.dsc.ufcg.edu.br/pet/jornal/julho2009/materias/ufcg.html>.
- [7] LIEC. Liec. <http://liec.ufcg.edu.br/wiki>, 2008.
- [8] R. C. P. MARQUES. Antenas e propagação de ondas. Technical report, Cefet - CE, 2009.
- [9] A. R. MESSIAS. Controle remoto e aquisição de dados via xbee/zigbee (ieee 802.15.4). <http://www.rogercom.com/ZigBee/ZigBee.htm>.
- [10] Diego Tavares. Serviços de apoio estudantil: um direito muitas vezes desconhecido. <http://www.dsc.ufcg.edu.br/pet/jornal/outubro2007/ufcg.html>.
- [11] Equipe Vivasemfio.com. Zigbee. <http://www.vivasemfio.com/blog/category/zigbee/>.
- [12] Wikipedia. Condutividade elétrica. <http://en.wikipedia.org/wiki/condutividade>.
- [13] Wikipedia. Permissividade. <http://pt.wikipedia.org/wiki/Permissividade>.

A Anexos

A.1 Dispositivos utilizados

A.1.1 Módulo XBee™[9]



Figura 19: Módulo Xbee™

Performance

- Rendimento da Potência de saída: 1 mW (0 dBm);
- Alcance em ambientes internos/zonas urbanas: 30m;
- Alcance de RF em linha visível para ambientes externos: 100m;
- Sensibilidade do receptor: -92 dBm;
- Frequência de operação: ISM 2.4 GHz;
- Taxa de dados de RF: 250.000 bps;
- Taxa de dados da Interface (Data Rate): 115.200 bps;

Alimentação

- Tensão de alimentação: 2.8 à 3.4v;
- Corrente de transmissão (típico): 45 mA @ 3.3 V;
- Corrente de Recepção (típico): 50 mA @ 3.3 V;

- Corrente de Power-down Sleep: $<10 \mu\text{A}$;

Propriedades Físicas

- Dimensões: (2.438cm x 2.761cm); - Peso: 0.10 oz (3g);
- Temperatura de operação: -40 to 85^o C (industrial);
- Opções de antena: Conector U.FL RF, Chip ou Chicote (whip);

Rede

- Tipo de espalhamento espectral: DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum);
- Manipulação de erro: Retransmite novamente (Retries) & reconhecimento (acknowledgements);
- Topologia de Rede: Peer-to-peer(Par-a-par), ponto-a-ponto, ponto-a-multiponto e malha;
- Endereçamento: 65.000 endereços de rede disponíveis para cada canal;
- Opções de filtros: PAN ID, canais e endereços;
- Criptografia: 128-bit AES;
- Número de canais selecionáveis via software: 16 canais de seqüência direta;

Geral

- Faixa de frequência: 2.4000
- 2.4835 GHz;

A.1.2 Módulo XBee-Pro™[9]



Figura 20: Módulo Xbee-Pro™

Performance

- Rendimento da Potência de saída: 60 mW (18 dBm), 100 mW EIRP;
- Alcance em ambientes internos/zonas urbanas: 100m;
- Alcance de RF em linha visível para ambientes externos: 1,6Km;
- Sensibilidade do receptor: -100 dBm (1% PER);
- Frequência de operação: ISM 2.4 GHz;
- Taxa de dados de RF: 250.000 bps;
- Taxa de dados da Interface (Data Rate): 115.200 bps;

Alimentação

- Tensão de alimentação: 2.8 à 3.4v;
- Corrente de transmissão (típico): 215 mA @ 3.3 V;
- Corrente de Recepção (típico): 55 mA @ 3.3 V;
- Corrente de Power-down Sleep: <10 µA;

Propriedades Físicas

- Dimensões: (2.438cm x 3.294cm); - Peso: 0.10 oz (3g);

- Temperatura de operação: -40 to 85^o C (industrial);
- Opções de antena: Conector U.FL RF, Chip ou Chicote (whip);

Rede

- Tipo de espalhamento espectral: DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum);
- Manipulação de erro: Retransmite novamente (Retries) & reconhecimento (acknowledgements);
- Topologia de Rede: Peer-to-peer(Par-a-par), ponto-a-ponto, ponto-a-multiponto e malha;
- Endereçamento: 65.000 endereços de rede disponíveis para cada canal;
- Opções de filtros: PAN ID, canais e endereços;
- Criptografia: 128-bit AES;
- Número de canais selecionáveis via software: 12 canais de sequência direta;

Geral

- Faixa de frequência: 2.4000;
- 2.4835 GHZ;