

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Larissa Drechsler

**SISTEMA DE POSICIONAMENTO INDOOR UTILIZANDO UMA REDE
DE SENSORES SEM FIOS BASEADA NO PROTOCOLO DE
COMUNICAÇÃO ZIGBEE**

Santa Maria, RS
2018

Larissa Drechsler

SISTEMA DE POSICIONAMENTO INDOOR UTILIZANDO UMA REDE DE SENSORES SEM FIOS BASEADA NO PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO ZIGBEE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**.

Orientador: Prof. Dr. Natanael Rodrigues Gomes

Santa Maria, RS
2018

Larissa Drechsler

SISTEMA DE POSICIONAMENTO INDOOR UTILIZANDO UMA REDE DE SENSORES SEM FIOS BASEADA NO PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO ZIGBEE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**.

Aprovado em 05 de dezembro de 2018:

Natanael Rodrigues Gomes, D.r (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Candice Muller (UFSM)

Samuel Valduga (UFSM)

Santa Maria, RS
2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço meus pais e irmão, Claudete, Valmor e Ralf, por todo apoio e suporte que me deram durante toda a minha trajetória e por serem minha inspiração e a razão de tudo que faço.

Ao meu namorado, Murillo, que é minha base e que, apesar de toda a distância, é quem me mantém em paz, estando presente em todos os meus dias. Quem sempre me motivou, me auxiliou e me deu forças pra continuar.

À minha amiga, Letícia, que me acompanha desde o colégio e que faz parte de grande parte do que sou hoje. Quem me alegra e quem sei que estará por perto quando eu precisar. Sempre!

Aos amigos que fiz durante a graduação, especialmente Élen, Emanuelli e Gustavo, que me deram força pra enfrentar toda a distância e saudade e que estiveram ao meu lado em todos os dias da graduação e todos os trabalhos. Sem vocês, nada disso seria possível. Mantereí vocês comigo independentemente de onde eu estiver. À vocês, um até breve!

Ao meu orientador, professor Natanael, que com toda sua paciência e conhecimento me auxiliou durante todas as etapas do trabalho e quem sempre me motivou a continuar, mesmo quando pensava em desistir. Obrigada professor.

Aos demais amigos e família, todos vocês foram fundamentais e com certeza, de alguma forma, contribuíram para minha formação. Somos nada sozinhos.

À todos, o meu mais sincero agradecimento. Muito obrigada.

RESUMO

SISTEMA DE POSICIONAMENTO INDOOR UTILIZANDO UMA REDE DE SENSORES SEM FIOS BASEADA NO PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO ZIGBEE

AUTOR: Larissa Drechsler
ORIENTADOR: Natanael Rodrigues Gomes

Neste trabalho é apresentado o estudo e a implementação de um sistema de posicionamento *indoor* baseado na intensidade de sinal recebido (RSSI) de dispositivos Xbee, modelo Series 2 e Series 2 PRO, que operam a partir do protocolo Zigbee. Foi criada uma rede de sensores sem fios (WSN) com topologia de rede em árvore (*Cluster Tree*) composta por um dispositivo coordenador, um ou mais roteadores e um dispositivo final.

Dentro de um cenário de testes foram coletadas informações sobre as intensidade de sinal recebidas (RSSI) pelo móvel em relação aos pontos de referência fixados em pontos específicos do mapa de propagação, caracterizando a fase *off-line* da técnica conhecida como *fingerprinting*. Durante a fase *online* as intensidades de sinal medidas pelo móvel são comparadas com as *fingerprintings*, armazenadas nos mapas de propagação obtidos durante a fase *off-line*, e processadas através do algoritmo K vizinhos mais próximos (KNN). O móvel estará mais próximo da posição do mapa que apresentar a menor diferença entre a intensidade de sinal medida e as intensidades armazenadas no mapa, durante a fase *off-line*, em relação a cada um dos pontos de referência.

Palavras-chave: Zigbee. Xbee. RSSI. Indoor. Fingerprinting. KNN.

ABSTRACT

INDOOR POSITION SYSTEM USING A WIRELESS SENSOR NETWORK BASED ON ZIGBEE COMMUNICATION PROTOCOL

AUTHOR: Larissa Drechsler
ADVISOR: Natanael Rodrigues Gomes

In this project is presented the study and implementation of an indoor position system based on the received signal strength (RSSI) of Xbee devices, Series 2 and Series 2 PRO model, which operate from the ZigBee protocol. The wireless sensor network (WSN) created has a tree topology (Cluster Tree) composed of a coordinator, one or more routers and an end device.

In a test scenario, the mobile device collected information about the received signal strength (RSSI) by relative to the reference points fixed at specific points on the propagation map, characterizing the off-line phase of the technique known as fingerprinting. During the online phase, the signal strength measured by the mobile device are compared to the fingerprintings, stored in the propagation maps obtained during the off-line phase, and processed through the nearest neighbor algorithm (KNN). In the end, the mobile will be closer to the position of the propagation map that has the smallest difference between the measured signal strength and the values stored on the map during the off-line phase in relation to each of the reference points.

Keywords: Zigbee. Xbee. RSSI. Indoor. Fingerprinting. KNN.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de trilateração de satélites.	4
Figura 2 - Funcionamento do A-GPS.	5
Figura 3 - GLONASS x GPS	5
Figura 4 - Divisão das redes sem fio.	7
Figura 5 - Comparação entre Bluetooth e ZigBee.	7
Figura 6 - Tecnologias Wireless.	9
Figura 7 - Técnica de localização TOA.....	11
Figura 8 - Técnica TDOA.....	12
Figura 9 - Técnica de triangulação direta.	13
Figura 10 - Técnica de AOA.	14
Figura 11 - Técnica de Fingerprinting.	15
Figura 12 - Topologia de Rede ZigBee.	17
Figura 13 - Principais modelos de Xbee.....	19
Figura 14 - Arquitetura dos módulos Xbee.	20
Figura 15 - Diferença entre Xbee s2 e s2 PRO.	21
Figura 16 - Propagação do sinal entre uma antena transmissora e uma receptor. ...	24
Figura 17 - Caracterização da região de campo perto e de campo distante da antena.	25
Figura 18. Expoente de perda de caminho.	26
Figura 19 - Software X-CTU utilizado para configurar os módulos.....	33
Figura 20 - Módulo Xbee conectado ao adaptador Xbee Explorer.	33
Figura 21 - Shield Xbee para Arduino Uno.	34
Figura 22 - Parâmetros comumente utilizados para procurar um dispositivo pela X- CTU.....	35
Figura 23 - Tela de configuração dos parâmetros do módulo.....	36
Figura 24 - Identificação do número de série do módulo Xbee.	37
Figura 25 - Identificação da família do Xbee.	38
Figura 26 - Update do módulo.....	39
Figura 27 - Quadro de dados API.....	39
Figura 28 - Tipos de frame API.....	40
Figura 29 - Operação no modo Console.	41
Figura 30 - Criando um frame utilizando a ferramenta 'Frame Generator.'	41

Figura 31 - Tipos de frames API.....	42
Figura 32 - Frame obtido através do X-CTU.....	42
Figura 33 - Opções de transmissão suportadas.....	43
Figura 34 - Parâmetros do frame.....	44
Figura 35 - Testando a comunicação AT entre dois módulos Xbee.....	45
Figura 36 - Variação da intensidade de sinal do Xbee conforme a variação de distância.	46
Figura 37 - Range Test com o software XCTU.....	48
Figura 38 - Arduino UNO.....	49
Figura 39 - Pinos Xbee.....	50
Figura 40 - Esquema de Ligação.....	51
Figura 41 - Código para o Arduino de uma comunicação AT.....	52
Figura 42 - Comunicação entre roteador conectado na X-CTU e coordenador conectado ao Arduino.....	53
Figura 43 - Coordenador conectado ao Arduino em modo AT e roteador em modo API conectado a X-CTU.....	53
Figura 44 - Resposta do coordenador recebida pelo roteador.....	54
Figura 45 - Resposta obtida pelo roteador conectado ao XCTU.....	56
Figura 46 - Enviando um frame em Loop Infinitely no XCTU.....	57
Figura 47 – Frame Remote Command Response contendo RSSI através do Arduino.	60
Figura 48 - Composição da rede de sensores.....	61
Figura 49 - Arquitetura da rede de sensores ZigBee.....	62
Figura 50 – Descrição do método de fingerprinting.....	63
Figura 51- Aplicação do algoritmo KNN.....	64
Figura 52 - Teste da antena do dispositivo.....	66
Figura 53 - Posição das bases e pontos medidos no cenário de testes 1.....	67
Figura 54 - Pontos medidos durante a Fase Online no cenário de testes 1.....	69
Figura 55- Pontos medidos durante a Fase Online no cenário de testes 1.....	72
Figura 56 - Pontos medidos durante a Fase Online no cenário de testes 2.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficiente de atenuação com a distância.	27
Tabela 2 - Coeficiente de atenuação por andar.	27
Tabela 3 - Desvio padrão da variável log-normal responsável pelo sombreamento (X_{σ}).	28
Tabela 4 - Perdas de penetração em obstáculos.	30
Tabela 5 - Fator de perda através de paredes.....	30
Tabela 6 - Configuração dos módulos Xbee.....	44
Tabela 7 - Comparação entre Xbee s2 e Xbee s2 PRO	65
Tabela 8 - Posição das bases.....	67
Tabela 9 - Base de dados cromatográfica da intensidade de sinal do móvel em relação à Base 1.	68
Tabela 10 - Base de dados cromatográfica da intensidade de sinal do móvel em relação à Base 2.	68
Tabela 11 - RSSI medidos durante a fase online.....	69
Tabela 12 - Representação cromatográfica da posição do móvel referente ao ponto 7.	70
Tabela 13 - Representação cromatográfica da posição do móvel referente ao ponto 4.	71
Tabela 14 - Posição das bases.....	71
Tabela 15 - Representação cromatográfica da base de dados.	72
Tabela 16 - Pontos medidos durante a fase online.....	73
Tabela 17 – Pontos em que a fingerprinting correspondente a posição do móvel foi encontrada corretamente.	74
Tabela 18 - Ponto em que a fingerprinting correspondente à posição do móvel não foi encontrada corretamente.	74
Tabela 19 - Representação cromatográfica da posição do móvel referente ao ponto 3.	80
Tabela 20 - Representação cromatográfica da posição do móvel referente ao ponto 2.	80
Tabela 21 - Representação cromatográfica da posição do móvel referente ao ponto 1.	80

Tabela 22 - Representação cromatográfica da posição do móvel referente ao ponto 5.	81
Tabela 23 - Representação cromatográfica da posição do móvel referente ao ponto 6.	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GPS – Sistema Norte-Americano de Posicionamento Global

GLONASS - Sistema Russo de Navegação Global por Satélite

GSM - *Global System for Mobile Communications*

WiFi - *Wireless Fidelity*

RFID - *Radio-Frequency Identification*

UWB - *Ultra Wide Band*

WLAN - *Wireless Local Area Network*

WPAN - *Wireless Personal Area Network*

WMAN - *Wireless Metropolitan Area Network*

WWANs - *Wireless Wide Area Network*

RNA - Rede Neural Artificial

KNN - K-Vizinhos mais Próximos

RSSI – *Received Signal Strength Indication*

LVD – Linha de Visada Direta

dB – Decibéis

EIRP - *Effective Isotropic Radiated Power*

TOA - *Time of Arrival*

TDOA - *Time Difference Of Arrival*

AOA - *Angle of Arrival*

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Descrição geral	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Organização da monografia	2
2	Revisão bibliográfica	3
2.1	Sistemas de posicionamento	3
2.1.1	Sistemas de posicionamento <i>outdoor</i>	3
2.1.1.1	Diferença entre GPS e GLONASS	4
2.1.2	Sistemas de Posicionamento Indoor	5
2.1.3	Tecnologias que não utilizam rádio.....	6
2.1.3.1	Posicionamento Magnético	6
2.1.3.2	Sistemas Inerciais	6
2.1.4	Tecnologia Wireless.....	6
2.1.4.1	WiFi.....	7
2.1.4.2	Bluetooth.....	8
2.1.4.3	ZigBee.....	8
2.2	Técnicas de Localização.....	10
2.2.1	Proximidade.....	10
2.2.2	Trilateração.....	10
2.2.2.1	TOA (Time Of Arrival)	10
2.2.2.2	TDOA (Time Difference Of Arrival)	11
2.2.2.3	Direta	12
2.2.3	Triangulação	13
2.2.3.1	AOA (Angle of Arrival)	13
2.2.4	Fingerprinting.....	14
3	Fingerprinting	16

3.1	Protocolo Zigbee.....	16
3.1.1	Topologia de Rede.....	16
3.1.2	Xbee	18
3.1.3	Modos de Operação	21
3.2	Algoritmos de localização.....	22
3.2.1	K-Nearest Neighbor (KNN).....	22
3.2.2	Rede Neural Artificial (RNA)	22
3.3	Métodos para estimar a intensidade de sinal	23
3.3.1	Outdoor.....	23
3.3.1.1	Fórmula de Friis	23
3.3.2	Indoor	26
3.3.2.1	Modelo Log-Distance	26
3.3.2.2	ITU-R P.1238-1	27
3.3.2.3	Modelos da European Cost 231	28
4	Desenvolvimento prático	32
4.1	XCTU	32
4.1.1	Configuração dos Módulos Xbee.....	33
4.1.2	Rede de Sensores Xbee.....	35
4.1.3	Frame API.....	39
4.1.4	Comunicação entre Módulos Xbee.....	44
4.2	Received signal strength indicator (Rssi).....	45
4.2.1	Frame ATDB	46
	• Remote AT Command Request (API 1).....	47
4.2.2	Range Test.....	47
4.3	Arduino.....	48
4.3.1	Comunicação AT usando Arduino	50
4.3.2	Comunicação API usando Arduino	54

4.3.3	RSSI com Arduino	56
4.4	Configuração da Rede de Sensores	60
5	Testes e Resultados	65
5.1	Análise dos módulos xbee	65
5.1.1	Comparação entre Xbee s2 e Xbee s2 PRO	65
5.1.2	Antena Isotrópica	66
5.2	Sistema de Posicionamento Indoor	66
5.2.1	Cenário de Testes 1	66
5.2.1.1	Fase Off-line	66
5.2.1.2	Fase Online	68
5.2.2	Cenário de testes 2	71
5.2.2.1	Fase Off-line	71
5.2.2.2	Fase Online	72
6	Conclusão	75
8	ANEXO A – Representação Cromatográfica da Posição do Móvel no Cenário 1 de Testes	80

1 INTRODUÇÃO

1.1 DESCRIÇÃO GERAL

Os métodos de localização, empregando sistemas de posicionamento, têm por objetivo determinar a localização de um dispositivo. Podem ser divididos em duas categorias: *outdoor* e *indoor*. A localização *outdoor*, fora de ambientes fechados, pode ser obtida através de sistemas como o GPS (Sistema Norte-Americano de Posicionamento Global) ou GLONASS (Sistema Russo de Navegação Global por Satélite). Esses sistemas de posicionamento são utilizados para as mais variadas aplicações: aviação, turística, militares, navegação marítima, agricultura, deslocamento em bairros e cidades, entre outros. Entretanto, esses sistemas não são capazes de prover geoposicionamento com precisão no interior de ambientes fechados (*indoor*) pois a intensidade do sinal eletromagnético é atenuada ao atravessar paredes de edificações.

As pessoas passam em média 90% de seu tempo em ambientes *indoor* (REPACE; LOWREY, 1980). Dessa forma, faz-se necessária a utilização de um sistema de posicionamento com maior precisão específico para ambientes fechados. Para isso, foram desenvolvidos inúmeros algoritmos baseados nas mais diversas tecnologias, como o WiFi (Wireless Fidelity), Bluetooth, RFID (Radio-Frequency IDentification), Zigbee, UWB (Ultra Wide Band), etc. As principais aplicações para os sistema de posicionamento indoor são a localização de dispositivos em uma rede de sensores, navegação de robôs, navegação em museus, grandes eventos e shoppings, localização de pessoas com necessidades especiais como idosos, crianças e animais domésticos, entre outros.

A tecnologia WLAN (Wireless Local Area Network) é atualmente a mais utilizada, pois está cada vez mais presente no cotidiano das pessoas. No entanto, essa tecnologia possui certas limitações, devido à complexidade da construção das edificações, visto que obstáculos e reflexões internas interferem na potência do sinal recebido. Para amenizar o efeito destas limitações em um sistema de posicionamento *indoor*, são utilizadas diversas técnicas matemáticas como o processo de fingerprinting, trilateração, triangulação e algoritmos de posicionamento como rede neural artificial (RNA), K-Vizinhos mais Próximos (KNN), entre outras.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é implementar um sistema de posicionamento para ambientes *indoor* suportado por uma rede de comunicação sem fios baseada no protocolo Zigbee. A localização do dispositivo móvel será obtida através da informação da potência do sinal recebido (RSSI) pela estação móvel em relação à cada uma das estações base. Os dados sobre as bases e a intensidade do sinal detectado serão processados e, em conjunto com um mapa de rádio sinal (fase *off-line*), utilizados para estimar a localização de um dispositivo ou usuário do sistema a partir do método conhecido como *fingerprinting*. Para a fase *online* do sistema, onde é necessário comparar a intensidade de sinal atual do móvel com os valores armazenados na base de dados durante a fase *off-line*, será utilizado o algoritmo de localização K-vizinhos mais próximos (KNN).

1.3 ORGANIZAÇÃO DA MONOGRAFIA

No Capítulo 2 será apresentada uma revisão bibliográfica sobre os principais métodos de posicionamento *indoor* e *outdoor* e as principais técnicas utilizadas por esses sistemas para a estimativa da posição do objeto/dispositivo móvel.

A técnica de localização escolhida para este trabalho é a de Fingerprinting, que será analisado no Capítulo 3. Informações sobre os dispositivos Xbee que serão utilizados como pontos de referência da técnica, bem como os algoritmos de localização pertinentes ao método são analisados neste capítulo. Além disso, também serão revisados os principais métodos de estimativa da intensidade de sinal referente à ambientes *indoor* e *outdoor*.

No desenvolvimento, Capítulo 4, será abordado a configuração dos módulos no Software XCTU, geração de pacotes e como realizar a comunicação entre o módulo Xbee e o microcontrolador Arduino.

No Capítulo 5 são realizados testes referentes à intensidade de sinal dos módulos e por fim, os resultados obtidos do sistema de posicionamento *indoor* implementado.

A análise dos resultados será feita na conclusão, Capítulo 6, bem como as propostas e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentado uma revisão bibliográfica dos sistemas de posicionamento mais comumente utilizados para ambientes *indoor* e *outdoor* e as principais técnicas de localização empregadas nesses sistemas.

2.1 SISTEMAS DE POSICIONAMENTO

2.1.1 Sistemas de posicionamento *outdoor*

Entre os principais sistemas de posicionamento *outdoor* encontra-se o GPS (Sistema Norte-Americano de Posicionamento Global) e o GLONASS (Sistema Russo de Navegação Global por Satélite). Ambos utilizam satélites para fornecer informações horárias e atmosféricas. O princípio de funcionamento desses sistemas de posicionamento está em medir o tempo que o sinal emitido por cada satélite demora para encontrar a antena receptora. Como sabe-se que velocidade de propagação do sinal no vácuo é de aproximadamente 300000km/s, se for conhecido o tempo necessário para o sinal atingir a antena receptora pode-se obter a distância entre o satélite e o receptor.

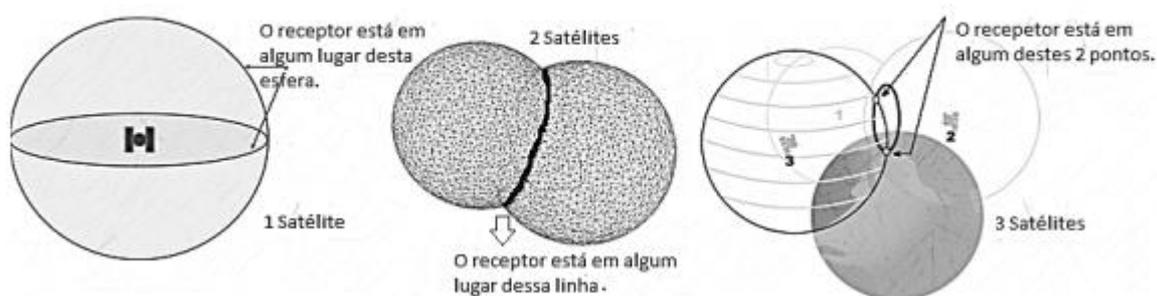
Um sistema de posicionamento *outdoor* com precisão de 1 metro deve possuir uma medida de tempo com uma precisão de 3 a 4 nano segundos. Assim, é necessário que os satélites possuam relógios extremamente precisos. O tempo de propagação do sinal é muito pequeno, da ordem de 0,06 segundos se o satélite estiver em cima do receptor.

A precisão do relógio do satélite é obtida a partir de relógios atômicos, que usam um padrão ressonante de frequência como contador. Esse relógio se baseia em uma propriedade do átomo, onde o padrão é a frequência de oscilação de sua energia. A cada 9.192.631.770 oscilações do átomo de césio-133 o relógio entende que se passou um segundo (WIKIPÉDIA, 2018). Para que os relógios dos receptores não afetem a precisão da localização, esses são constantemente atualizados com a hora atômica transmitida pelos satélites.

Conhecendo a distância entre o receptor e um satélite, apenas é possível afirmar que a localização é um ponto qualquer sobre uma esfera imaginária com raio igual a essa distância. Se conhecermos, entretanto, a distância do receptor em relação à um segundo satélite, sabe-se que a posição do receptor é qualquer ponto sobre a circunferência imaginária que resulta da intersecção das duas esferas, agora limitado

em apenas duas dimensões. Com o valor de distância em relação à um terceiro satélite obtém-se a intersecção de mais uma esfera, que resulta em apenas 2 possibilidades de localização. Um desses pontos pode ser eliminado pois se encontrará no espaço, sobrando apenas 1 ponto que indicará a posição do receptor. A Figura 1 ilustra a explicação dada anteriormente sobre o processo de trilateração de satélites.

Figura 1 - Processo de trilateração de satélites.



Fonte: (DIAS).

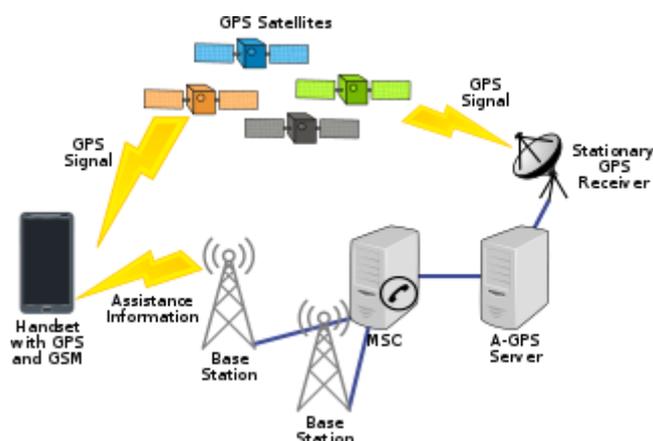
A utilização de um quarto satélite permite conhecer a altitude exata do receptor. Mais relevante ainda, com ele é possível verificar a sincronia entre os relógios. Se os relógios estiverem perfeitamente sincronizados, a intersecção dos quatro satélites resultará em apenas um ponto. Entretanto, se as medidas forem imperfeitas, isso não ocorrerá.

2.1.1.1 Diferença entre GPS e GLONASS

O GPS é uma tecnologia dos Estados Unidos que iniciou operando com 24 satélites, fabricados pela empresa Rockwell. Atualmente, possui 31 satélites à uma distância de 20200km com uma velocidade de 11265km/h. Apenas 24 dos 31 satélites são utilizados para o sistema de posicionamento, o restante só opera quando há algum problema de confirmação de dados.

O GPS precisa da informação de, pelo menos, 4 satélites para obter a posição do móvel. A função A-GPS (GPS Assistido) tem como objetivo fazer com que os dados sejam obtidos mais rápido e precisamente, utilizando recursos de rede para localizar o móvel em condições de sinal fraco dos satélites. Como edifícios e construções interferem no sinal dos satélites, o GSM (*Global System for Mobile Communications*) a partir da tecnologia 2G, 3G e 4G conseguem realizar uma triangulação, sendo um dos elementos a antena transmissora, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Funcionamento do A-GPS.

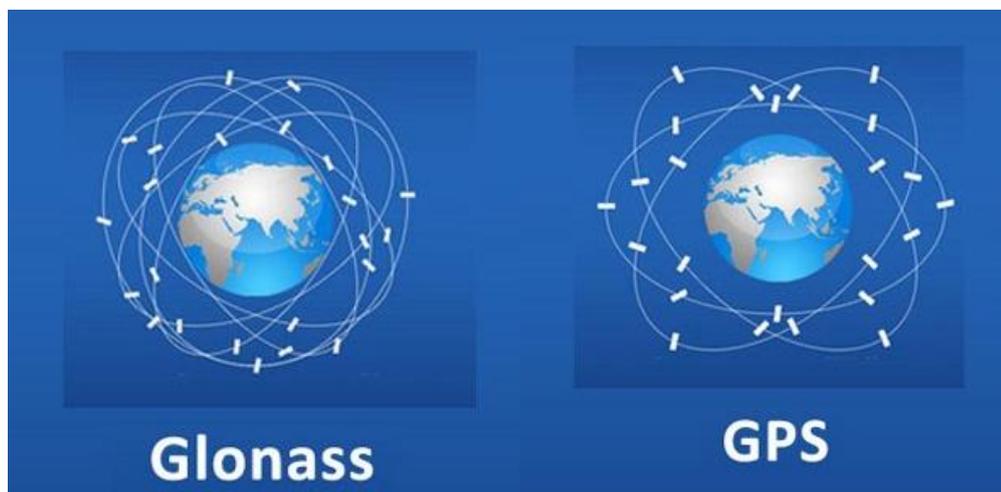


Fonte: (WIKIPEDIA, 2018).

O GLONASS é um sistema de navegação global por satélite russo, finalizado em 2011, que opera com 24 satélites à 19100km de altura da superfície da terra, distribuídos em 3 camadas com 8 satélites cada. A posição do móvel é obtida através da trilateração de, no mínimo, 3 satélites.

Uma das vantagens do GLONASS está na sua precisão, pois oferece a resolução máxima ao seu uso civil, diferentemente do GPS que limita a capacidade de precisão do seu sistema.

Figura 3 - GLONASS x GPS



Fonte: ("Lost in Tracking" or why mobile GPS is inaccurate?).

2.1.2 SISTEMAS DE POSICIONAMENTO INDOOR

Devido à ineficácia dos sistemas de posicionamento *outdoor* no interior de edificações foram desenvolvidos sistemas de posicionamentos específicos para ambientes fechados. As principais tecnologias empregadas para ambientes *indoor*

serão detalhadas a seguir, sendo divididas entre as que não utilizam rádio e as tecnologias sem fios.

2.1.3 Tecnologias que não utilizam rádio

2.1.3.1 Posicionamento Magnético

É um método de localização *indoor* que não utiliza ondas de rádio, baseado na variação de campo magnético da Terra que pode ser monitorado por um magnetômetro, presente na maioria dos dispositivos atuais. Normalmente, o campo magnético da Terra é usado apenas para obter a direção, mas os pesquisadores desenvolveram um sistema que monitora as variações no campo magnético introduzidas por paredes de concreto e outros obstáculos construídos pelo homem, o que em conjunto com a boa sensibilidade dos magnetômetros usados nos aparelhos atuais permite determinar a posição dentro de ambientes cobertos com uma precisão de até 10 centímetros, funcionando muito bem como uma espécie de GPS para ambientes cobertos. (MORIMOTO, 2012)

2.1.3.2 Sistemas Inerciais

Pode ser utilizada a medição de passos de um indivíduo através de um sensor que pode ser cruzado com mapas para a obtenção da posição do móvel. Os sistemas de navegação inerciais são normalmente dotados de, pelo menos, dois tipos de sensores: acelerômetros e giroscópios. Os acelerômetros medem a força de aceleração. Os giroscópios dão a orientação de um determinado objeto.

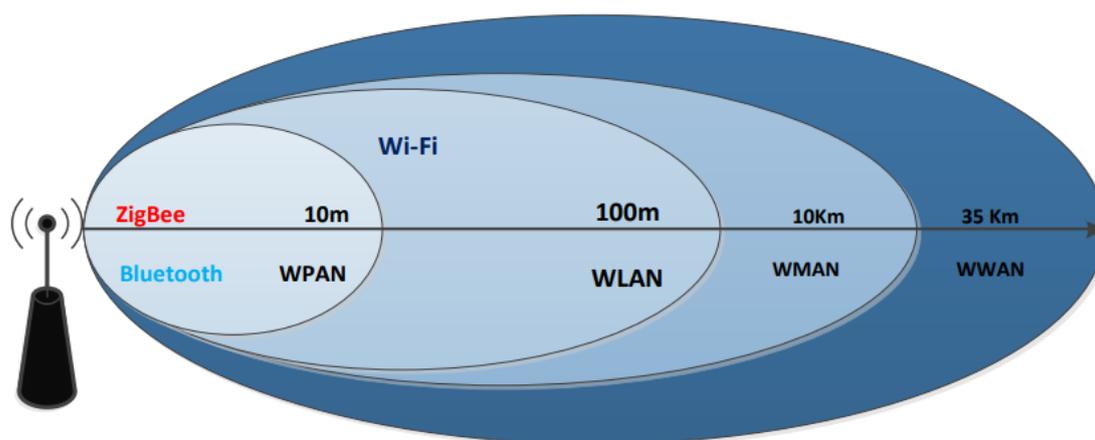
2.1.4 Tecnologia Wireless

As redes de sensores sem fio (RSSF) estão em crescente desenvolvimento e seu uso vêm aumentando em diversos setores da sociedade devido à capacidade de monitorar e controlar ambientes sem necessidade de uma ligação física.

A comunicação sem fios (ou *wireless*) é utilizada em redes como WPANs (*Wireless Personal Area Network*), WLANs (*Wireless Local Area Network*), WMANs (*Wireless Metropolitan Area Network*) e WWANs (*Wireless Wide Area Network*), onde cada classificação varia de acordo com a área de aplicação e o alcance do sinal, de acordo com a Figura 4.

Uma WWAN consistem em redes sem fio capazes de cobrir uma grande área geográfica, a partir de antenas ou satélites. A *Wireless Metropolitan Area Network* (WMAN) permite conectar diferentes localizações numa área metropolitana (por exemplo, edifícios de escritórios numa cidade), utilizando fibra ótica ou cabos de cobre e linhas dedicadas. A *Wireless Local Area Network* (WLAN) abrange apenas uma área limitada, equivalente à um cômodo ou um edifício.

Figura 4 - Divisão das redes sem fio.



Fonte: (FERNANDES, 2012).

Rede de área pessoal (PAN) é uma rede doméstica que interliga recursos ao longo de uma residência. Uma WPAN refere-se às redes sem fio com alcance de até algumas dezenas de metros. Este tipo de rede permite a conexão sem fio entre dois dispositivos próximos. Dentre as tecnologias utilizadas para as WPAN estão o Bluetooth, ZigBee e conexões infravermelhas.

Figura 5 - Comparação entre Bluetooth e ZigBee.

Características	Bluetooth®	ZigBee®
Arquiteturas de Rede	Estrela	Árvore, estrela, malha
Tempo de acesso à rede	3s	30ms
Corrente de transmissão	40mA	30mA

Fonte: (JUNIOR, 2011).

2.1.4.1 WiFi

O WiFi, baseado no padrão IEEE 802.11, opera nas faixas ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) com os seguintes intervalos: 902 MHz - 928 MHz; 2,4 GHz - 2,485 GHz

e 5,15 GHz - 5,825 GHz (dependendo do país, esses limites podem sofrer variações). O ponto de acesso transmite o sinal sem fios numa pequena distância, geralmente de até 100 metros, mas se a rede for do padrão IEEE 802.11n a distância pode chegar até 300 metros.

2.1.4.2 Bluetooth

O Bluetooth, também conhecido como IEEE 802.15.1, foi criada por Ericsson em 1994. Opera na frequência da ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) 2,4GHz e baixo alcance (dependendo da potência: 1 metro, 10 metros, 100 metros). Caracteriza-se por apresentar robustez, baixo consumo e custo acessível. Como utilizam sistema de comunicação via rádio, não é necessário linha de visão entre transmissor e receptor, apenas uma potência de recepção mínima para o funcionamento.

A comunicação dos dispositivos Bluetooth é caracterizada pelo princípio de mestre-escravo, podendo ser feitas através de dois tipos de topologias: a *piconet* e a *scatternet*. Os dispositivos podem se conectar formando redes limitadas a 8 nós, conhecidas como *piconets*, onde um é o nó mestre e o restante são os nós escravos ativos, que podem se situar dentro de um raio de cobertura de até 10m. Nesta topologia, todos os integrantes da comunicação estão sincronizados utilizando o relógio do mestre, sendo este responsável por alocar ou bloquear novas ligações. A comunicação do mestre para os escravos pode ser ponto a ponto ou ponto multi-ponto. Para reduzir o consumo de energia, os dispositivos escravos podem operar no modo *standby*. Outra topologia, chamadas *scatternet*, sendo esta a sobreposição de várias *piconets* a fim de se formar estruturas maiores. Um escravo pode pertencer a diversas *piconets*. Ao sair de uma *piconet*, o escravo deve informar ao mestre que não estará disponível por um determinado período de tempo, entretanto o restante na *piconet* continuam sua comunicação normalmente. Se o mestre deixar a *piconet*, esta fica indisponível, até seu retorno a mesma.

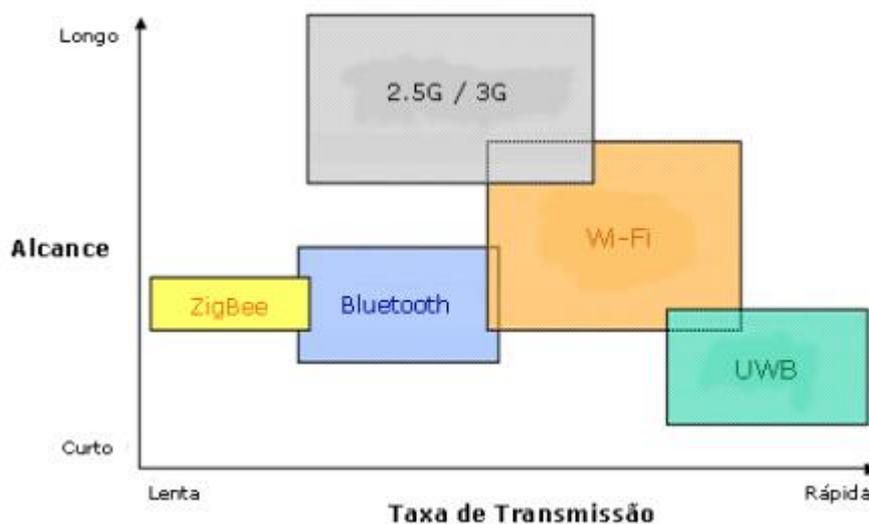
2.1.4.3 ZigBee

As bases da tecnologia que atualmente é conhecida por ZigBee foram estabelecidas no protocolo Home RFLite criado pela Philips. O nome é oriundo da analogia entre o funcionamento de uma rede em malha (*Mesh Network*) e a forma com que as abelhas

trabalham e se deslocam. As abelhas vivem numa colmeia voam em *zig zag*. Quando estas voam em busca do néctar elas se comunicam com as outras abelhas da mesma colmeia, transmitindo informações sobre a distância, direção e localização de alimentos. Juntando o *zig zag* com a tradução de abelha para inglês, surgiu o ZigBee.

O ZigBee é um protocolo de rede sem fio. De acordo com (PINHEIRO, 2004), a filosofia do ZigBee difere-se das redes sem fio já existentes, como o WiFi ou o Bluetooth, pois não utiliza elevada largura de banda para a transmissão de grandes quantidade de dados, mas sim uma comunicação confiável aliada à um consumo extremamente baixo de energia. Possui baixas taxas de transmissão para aplicações de monitoramento e controle, que possibilitam a utilização de baterias como fonte de alimentação dos dispositivos. O protocolo transmite dados por meio de ondas de rádio em uma frequência de 2,4GHz com imunidade e sem interferências transmitindo dados a taxas de transferência entre 20kbit/s e 250kbit/s.

Figura 6 - Tecnologias Wireless.



Fonte: (EQUIPE-1-2014-1-RCO3, 2014).

Diferentemente do Wi-Fi e do Bluetooth, o alcance do ZigBee é reduzido, conforme apresentado na Figura 6, entretanto a comunicação entre dois nós pode ser repetida sucessivamente pelas nós existentes na rede até atingir o dispositivo de destino final. Ou seja, todos os nós da rede podem funcionar como retransmissores de informação.

Dentre as principais aplicações do padrão ZigBee estão:

- Automação e Controle Predial (Segurança, controle de acesso e iluminação);
- Controle Industrial (Gerenciamento de ativos, controle de processos, etc);
- Periféricos para PC (Teclado, mouse, joystick);

- Controle remoto de produtos eletrônicos;
- Automação residencial e comercial;
- Saúde pessoal (monitoramento de pacientes, acompanhamento de exercício físico). (ZigBee: Aplicações, 2018)

2.2 TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO

Os sistemas de posicionamento descritos na seção anterior podem utilizar diferentes técnicas de localização para estimar a posição do dispositivo móvel. Nesta seção são abordadas as principais técnicas existentes: proximidade, trilateração, triangulação e *fingerprinting*.

2.2.1 Proximidade

A técnica mais simples de posicionamento *indoor* é através de um detector de proximidade colocado em uma posição específica do ambiente. Dessa forma, quando o usuário estiver dentro da área de alcance do detector, se for conhecida a localização dos pontos de referências, sabe-se a posição do móvel.

Este método pode ser feito através de 3 processos: contacto físico, monitorização dos pontos de acesso sem fio e observação de sistema de identificação automática. (BARROSO, 2015)

No processo de contato físico, a posição do móvel é feita com a detecção de toque físico entre o móvel e o ponto de referência, composta por sensores de pressão ou de toque. Já o método de monitorização de pontos de acesso sem fio se baseia detecção de pontos de acesso pelo dispositivo móvel. Se houver a detecção de mais de um ponto de acesso, obtém-se o ponto mais próximo do móvel através da medição da máxima intensidade de sinal (RSSI). No método de identificação automática a posição é estimada a partir das ações das pessoas.

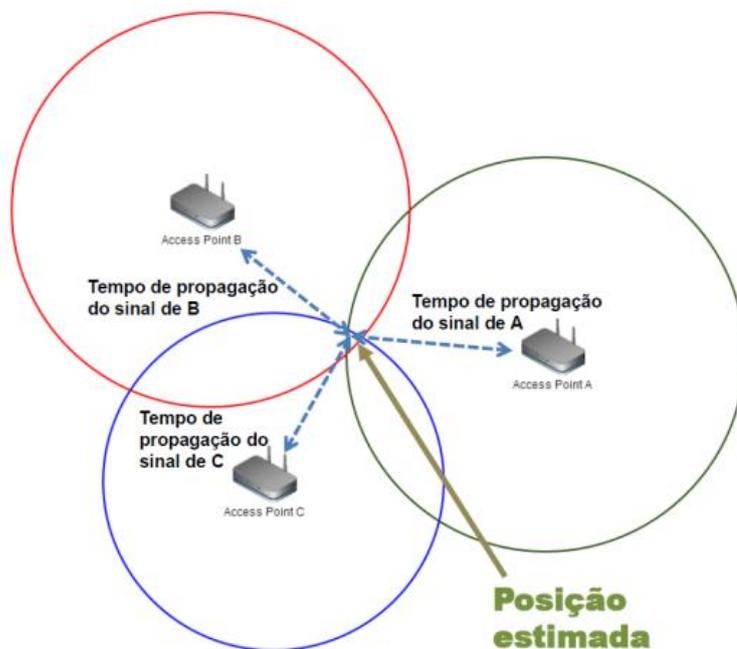
2.2.2 Trilateração

2.2.2.1 TOA (Time Of Arrival)

Para estimar a posição do móvel esta técnica utiliza o tempo de propagação do sinal emitido pelo transmissor até o receptor móvel. Para obter a posição 2D são necessários 3 pontos de referência, conforme apresentado na Figura 7. A precisão

desse método é comumente alta, dependendo da exata sincronização entre transmissor e receptor.

Figura 7 - Técnica de localização TOA.



Fonte: (SIMÕES, 2015).

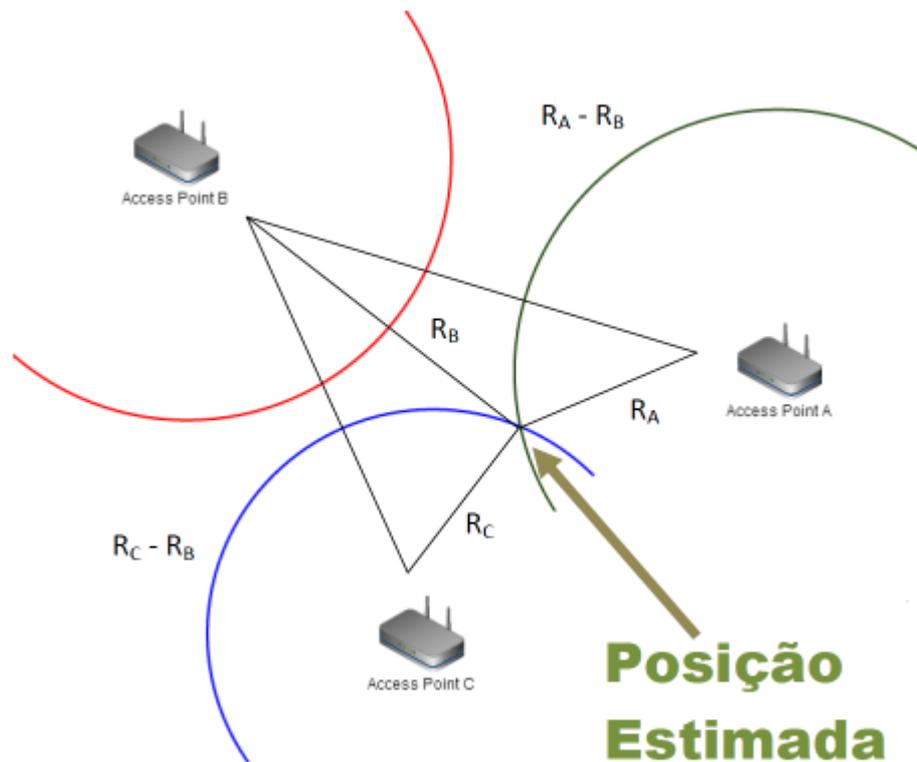
Os sistemas que utilizam a técnica de posicionamento TOA efetuam a medição do tempo de propagação do sinal do emissor até ao receptor e assim, a distância entre ambos é calculada. No entanto esse processo incorre em dois problemas: primeiro, ambos os intervenientes, o emissor e o receptor tem de estar sincronizados e segundo, deve ser enviado um *timestamp* (ponto específico da linha do tempo) junto com o sinal emitido para que a unidade de medição possa saber quanto tempo é que demorou a viagem do sinal. Em suma num sistema síncrono, o tempo de propagação do sinal pode ser diretamente convertido na distância, entre o emissor e o receptor, enquanto num sistema assíncrono, é necessário usar um protocolo de envio e recepção que converta o tempo de ida e volta do sinal num valor de distância. (SIMÕES, 2015)

2.2.2.2 TDOA (Time Difference Of Arrival)

A técnica de TDOA é muito semelhante à TOA, mas apresenta como principal vantagem não ser necessário sincronização entre emissor e receptor, apenas entre

pontos emissores. A posição do objeto desejado é obtida pela intersecção das diferenças de tempo de chegada do sinal ao móvel.

Figura 8 - Técnica TDOA.

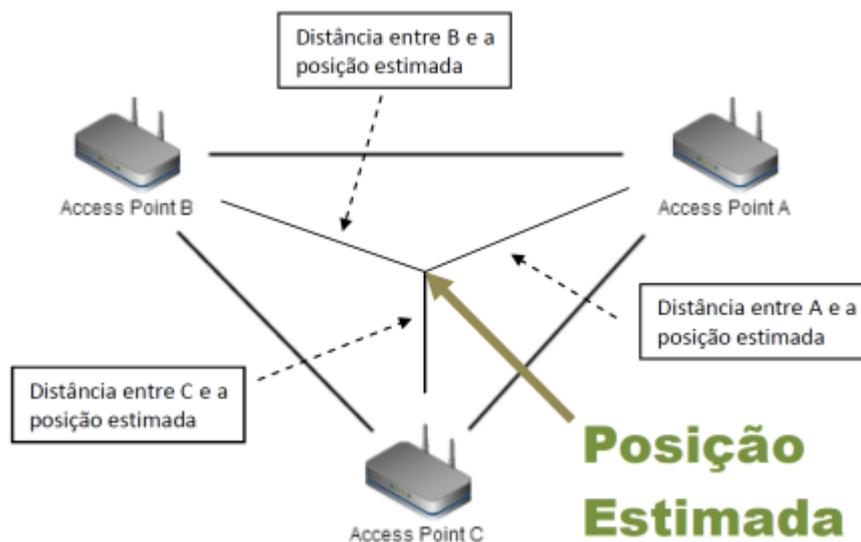


Fonte: (SIMÕES, 2015).

2.2.2.3 Direta

Com essa técnica é possível obter a posição do móvel através da intensidade de sinal, se for conhecida a localização de cada um dos transmissores. Para isso, precisa-se conhecer as perdas de propagação de sinal entre transmissor e receptor.

Figura 9 - Técnica de triangulação direta.



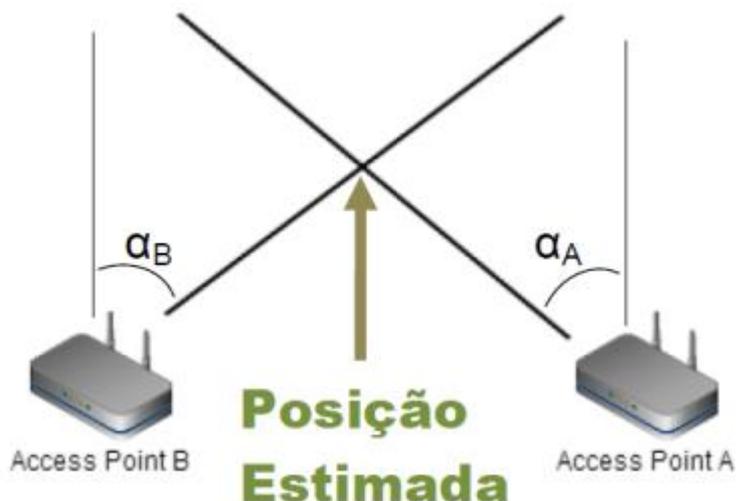
Fonte: (SIMÕES, 2015).

2.2.3 Triangulação

2.2.3.1 AOA (*Angle of Arrival*)

A técnica de triangulação utiliza os ângulos entre os pontos de referência e o móvel, conforme ilustrado na Figura 10. Uma das vantagens em relação aos métodos apresentados anteriormente é que para localização 2D são necessários apenas dois transmissores, e para 3D, três transmissores. Entretanto, a precisão do sistema aumenta quanto mais transmissores são utilizados, sendo também dependente da distância entre transmissor e receptor móvel. Além disso, não precisa de nenhum tipo de sincronia entre transmissores e receptores. A desvantagem é a dificuldade para medir o ângulo, sendo necessário o uso de equipamentos complexos.

Figura 10 - Técnica de AOA.



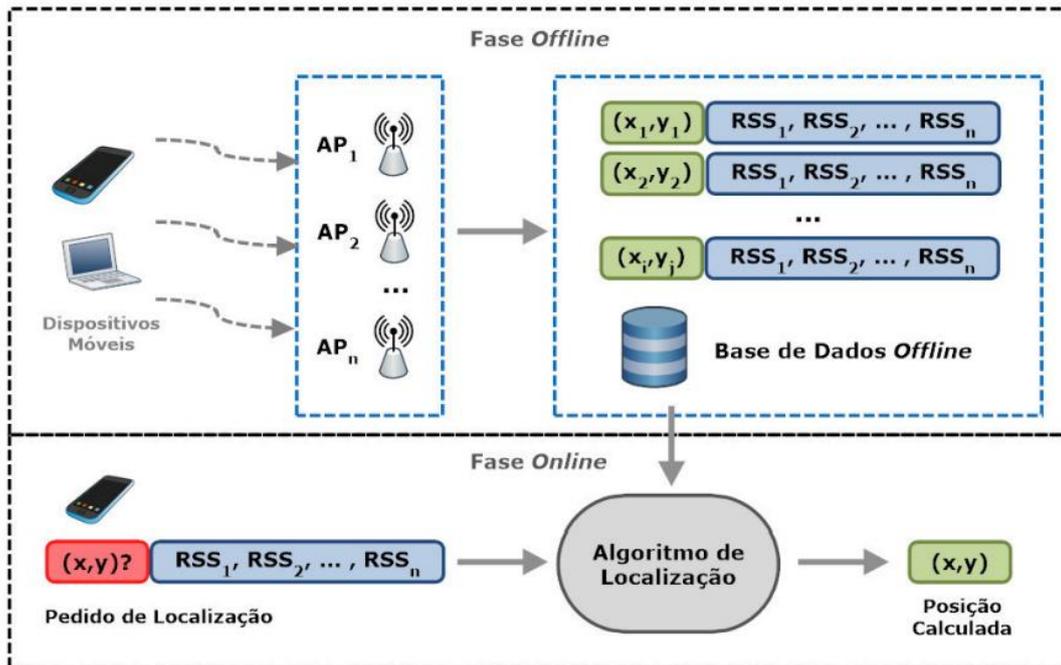
Fonte: (SIMÕES, 2015).

2.2.4 Fingerprinting

A técnica de posicionamento *fingerprinting* consiste na análise de uma característica única de um cenário, onde essa característica é recolhida e em seguida, comparada com os dados existentes na base de dados para cada cenário. Dessa forma, essa técnica é composta por duas fases: uma fase de calibração (*off-line*) e uma fase de comparação (*online*). Na fase *off-line* são recolhidas informações sobre a intensidade de sinal recebida pelo receptor móvel em relação à cada uma das bases transmissoras em diversos pontos do ambiente desejado. Os dados coletados nessa fase são armazenados em uma base de dados. Cada local deve conter uma lista dos valores de intensidade do sinal para todos os pontos de acesso visíveis. Isto deve ser feito, pois a posição do utilizador/dispositivo móvel pode influenciar os valores medidos pelo ponto de acesso.

Já na fase *online*, um receptor móvel irá coletar informações de intensidades de sinal que deverão ser comparadas com os valores obtidos no mapa de propagação, criado na fase anterior, para estimar a posição do mesmo.

Figura 11 - Técnica de Fingerprinting.



Fonte: (LOPES, 2014).

3 FINGERPRINTING

Neste trabalho, a localização do dispositivo móvel será obtida através da informação da potência do sinal recebido (RSSI) pela estação móvel de cada uma das estações base, através do método conhecido como *fingerprinting*. O sistema de posicionamento implementado será baseado no protocolo de comunicação ZigBee, visto que a comunicação é confiável aliada à um consumo extremamente baixo de energia. Além disso, a comunicação entre dois nós pode ser repetida sucessivamente pelos nós existentes na rede até atingir o dispositivo de destino final. Ou seja, todos os nós da rede podem funcionar como retransmissores de informação. O protocolo ZigBee será revisado na Seção 3.1 deste trabalho.

O grau de exatidão e precisão do método depende, principalmente, dos algoritmos de localização e da interferência de sinais eletromagnéticos. Alguns dos algoritmos que podem ser utilizados para determinar o posicionamento baseados no método *fingerprinting* são: kNN (kNearest-Neighbor), e as redes neurais artificiais (RNA) que serão detalhados na Seção 3.1.2

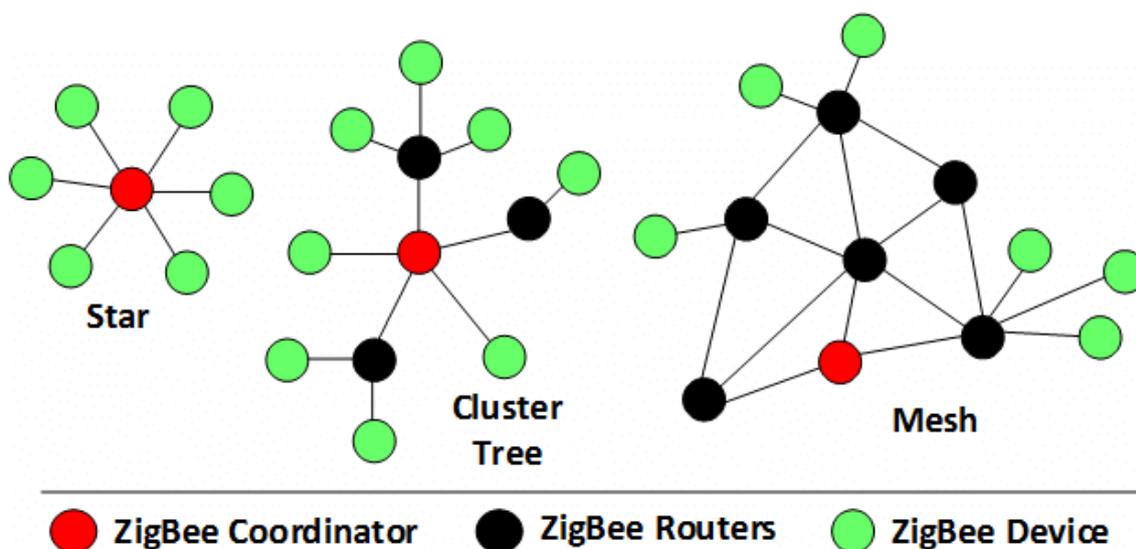
Para estimar a intensidade de sinal em ambientes *indoor*, pode-se utilizar modelos de predição de perda de sinal que considerem o efeito da reflexão e atenuação do sinal devido à objetos e paredes nas edificações. Assim, os principais modelos de predição de perdas *outdoor* e *indoor* serão apresentados na Seção 3.3

3.1 PROTOLO ZIGBEE

3.1.1 Topologia de Rede

A utilização de topologias de rede oferece mais confiabilidade e um alcance mais amplo, visto que com o protocolo ZigBee há a possibilidade de expansão da rede em até 65000 nós. Uma das principais vantagens do protocolo ZigBee é suportar redes em malha (*mesh*). Além disso, também suporta topologias em estrela (*star*) e em árvore (*cluster tree*). Na topologia em estrela um dispositivo central controla toda a rede. Em malha, todos os dispositivos podem gerenciar a rede. Em árvore, o encaminhamento é hierárquico.

Figura 12 - Topologia de Rede ZigBee.



Fonte: (ÇETİN, 2017)

Uma rede baseada no protocolo ZigBee pode possuir três tipos de dispositivos lógicos: coordenador (*Coordinator*), roteador (*Router*) e dispositivos finais (*End Devices*).

Toda rede deve possuir apenas um nó coordenador por rede, sendo este designado à criação, controle e manutenção básica da mesma. O coordenador seleciona um canal de comunicação e um identificador para a rede, denominado PAN ID. Na topologia em estrela, o coordenador deve ser o nó central da rede. Este nó permite que nós roteadores e nós finais integrem a rede, com objetivo de auxiliar o roteamento de dados e o armazenamento de pacotes para os nós que estejam em modo de espera.

Os roteadores são dispositivos que permitem estender a rede, podendo existir múltiplos destes, permitindo com que outros roteadores e dispositivos finais integrem a rede. Sua principal função é o reencaminhamento de dados. Os nós roteadores, assim como os nós coordenadores, devem estar sempre ativos, devido ao roteamento e armazenamento de pacotes destinados aos nós em modo de espera.

Os dispositivos finais não são capazes de retransmitir informações, se comunicando apenas com nós roteadores e nós coordenadores. Podem operar no modo de operação *sleep* que mantém o dispositivo em modo de espera, economizando energia.

Na camada física é definida a sensibilidade de recepção, número de canais, rejeição de um canal e a especificação da taxa de transmissão de dados. Na camada MAC é

realizado o gerenciamento da transmissão de dados entre nós vizinhos, por difusão, incluindo serviço de reenvio de transmissões e de técnicas de prevenção de colisão Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA) (FARAHANI, 2008).

Na topologia em estrela, o nó coordenador é quem controla a rede. Este nó se comunica com todos os dispositivos terminais da rede, fazendo com que toda a informação que flui pela rede percorra o nó central. Como existe apenas um caminho entre o nó coordenador e os dispositivos finais, caso uma falha ocorra no coordenador, toda a comunicação é perdida, pois não há caminhos alternativos na rede. Outro problema desta topologia é o alto número de congestionamentos no nó central devido à constante comunicação deste com os demais nós da rede.

Já na topologia em malha os nós roteadores podem transmitir dados para qualquer dispositivo da rede. Assim, a rede pode ser estendida de maneira simplificada, podendo alcançar grandes dimensões. A probabilidade de falhas na comunicação diminui pois nas redes em malha existem caminhos alternativos que podem ser utilizados para que a mensagem seja entregue ao destino desejado.

Por fim, a topologia em árvore se assemelha à topologia em malha, com a principal diferença sendo a hierarquia que existe para a transmissão de dados. O nó no topo da hierarquia é o coordenador e a partir deste nó são estabelecidas as ramificações primárias, compostas por nós roteadores. Por fim, as ramificações secundárias são compostas pelos dispositivos finais.

3.1.2 Xbee

Um dos dispositivos de *hardware* baseados no protocolo Zigbee é o *Xbee*, fabricado pela *Digi International*. Os módulos *Xbee's* são utilizados para aplicações de alto rendimento com baixa latência e tempo previsível de comunicação, fornecendo conectividade sem fio para dispositivos embarcados, como por exemplo o Arduino.

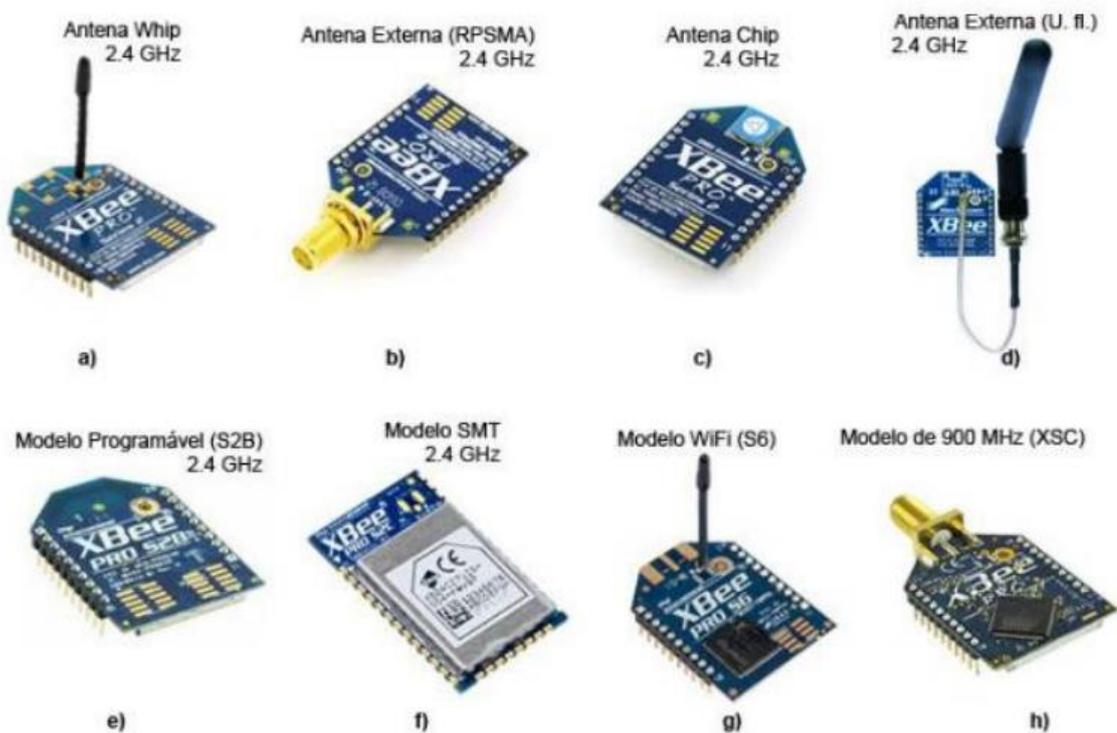
Existem variados modelos de *Xbee* que envolvem diferentes *hardwares*, *firmwares*, frequência de operação, antenas e potência de transmissão.

- Frequência de operação: Pode operar na frequência de 2,4GHz ou 915 e 868MHz.

- Alcance e antena: Dispositivos com antenas *on chip* possuem menor alcance, mas ocupam menos espaço físico. Dispositivos com antenas externas tem maior alcance. Já os módulos com antena *whip* possuem um alcance e um espaço físico intermediário.
- Potência de transmissão e consumo: Existem duas versões: *Xbee PRO* e *Xbee*. O modelo PRO possui maior potência de transmissão e consequentemente maior consumo energético.

Os módulos são fabricados em dois modelos: *Series 1* e *Series 2*. O primeiro modelo implementa apenas o protocolo IEEE 802.15.4. Já o *Series 2*, além do IEEE 802.15.4, implementa o padrão ZigBee e permite a utilização de redes em malha.

Figura 13 - Principais modelos de Xbee.



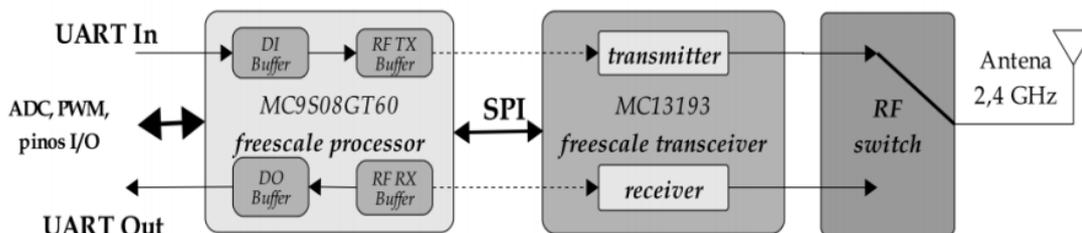
Fonte: (COUTO, 2013).

Os módulos Xbee/Xbee-PRO utilizam os dispositivos da *freescale* (transceptor e microcontrolador).

Os módulos Xbee internamente possuem três blocos, o processador, o transceptor e um *switch* RF. O processador (MC9S08GT60) funciona como interface com um *host*, é através dele que se consegue realizar configurações, recepção e envio de dados. O transceptor (MC13193) realiza a interface rádio a 2,4GHz. Por último, temos o interruptor RF que permite variar entre o modo *receive* e *transmit*. Quando é

necessário o módulo transmitir a ligação da antena é direccionada para o *transmit* do transceptor. Depois de efectuar a transmissão o transceptor coloca novamente a antena ao *receive*, ficando aguardar a recepção de pacotes ZigBee. (COUTO, 2013)

Figura 14 - Arquitetura dos módulos Xbee.



Fonte: (COUTO, 2013).

Os módulos Xbee possuem um microcontrolador interno, que executa um programa, conhecido como *firmware*. Existem quatro *firmwares* Xbee 802.15.4, Xbee ZNet 2.5, Xbee ZB, DigiMesh 2.4.

- *Xbee 802.15.4* – Permite apenas a transferência de informação de um nó para outro, não sendo possível realizar reencaminhamento de mensagens entre nós. O módulo Xbee Series 1 utiliza este *firmware*.
- *Xbee Znet 2.5* e *Xbee ZB* – O Xbee ZB é a implementação do protocolo ZigBee, já o Xbee ZNet 2.5 é um ajuste do protocolo ZigBee feito pela DIGI. Ambos podem operar em redes em malha e aceitam o encaminhamento de informações entre nós.
- *DigiMesh 2.4* – Utiliza topologia em malha e permite que todos os nós adormeçam ao mesmo tempo, provendo maior economia de energia. Entretanto, o processo de sincronismo e o desempenho da rede são alterados, bem como diminui a velocidade de reencaminhamento de informações.

As principais diferenças entre os dispositivos Xbee s2 e o Xbee s2 PRO estão apresentados na Figura 15. A potência de transmissão do Xbee s2 PRO é maior do que a potência do Xbee s2, logo o alcance *indoor* e *outdoor* do primeiro é maior.

Figura 15 - Diferença entre Xbee s2 e s2 PRO.

Specification	XBee	XBee-PRO (S2)	XBee-PRO (S2B)
Performance			
Indoor/urban range	up to 133 ft. (40 m)	Up to 300 ft. (90 m), up to 200 ft (60 m) international variant	Up to 300 ft. (90 m), up to 200 ft (60 m) international variant
Outdoor RF line-of-sight range	up to 400 ft. (120 m)	Up to 2 miles (3200 m), up to 5000 ft (1500 m) international variant	Up to 2 miles (3200 m), up to 5000 ft (1500 m) international variant
Transmit power output	2 mW (+3dBm), boost mode enabled 1.25 mW (+1dBm), boost mode disabled	50 mW (+17 dBm) 10 mW (+10 dBm) for International variant	63mW (+18 dBm) 10mW (+10 dBm) for International variant
RF data rate	250,000 b/s	250,000 b/s	250,000 b/s
Data throughput	up to 35000 b/s (see Transmission, addressing, and routing)	up to 35000 b/s (see Transmission, addressing, and routing)	up to 35000 b/s (see Transmission, addressing, and routing)
Serial interface data rate (software selectable)	1200 b/s - 1 Mb/s (non-standard baud rates also supported)	1200 b/s - 1 Mb/s (non-standard baud rates also supported)	1200 b/s - 1 Mb/s (non-standard baud rates also supported)
Receiver sensitivity	-96 dBm, boost mode enabled -95 dBm, boost mode disabled	-102 dBm	-102 dBm

Fonte: (DIGI).

3.1.3 Modos de Operação

Os módulos Xbee podem operar em dois modos distintos de transmissão e recepção de dados: modo AT (*Transparent Operation*) e modo API (*Application Programming Interface*).

No modo AT os dados são enviados e recebidos diretamente pela porta serial através de comando AT, tornando mais simples e fácil o desenvolvimento de aplicações. Entretanto, este modo não é útil para aplicações de múltiplos destinatários e não permite o envio de configurações remotas dos dispositivos.

Já no modo API toda informação que circula pela rede é interpretada e verificada. Comandos AT podem ser enviados no modo API, permitindo a existência dos dois modos em uma rede.

Vantagens do modo API:

- Permite que os dados sejam transmitidos para múltiplos destinos;
- Aviso de recepção (ACK) de cada pacote transmitido;
- Identificação do endereço de origem de cada pacote recebido.

3.2 ALGORITMOS DE LOCALIZAÇÃO

De acordo com (JUNIOR, 2011), os algoritmos de localização pelo método de *fingerprinting* podem ser determinísticos ou probabilísticos. Nos determinísticos, o RSSI é definido por um vetor escalar, frequentemente definido pela média ou mediana dos valores obtidos, como no método K-Vizinhos mais próximos (KNN). Já no método probabilístico, os valores coletados são armazenados em uma base de dados e são utilizados métodos probabilísticos para inferir a posição do móvel, como por exemplo Teoria da Aprendizagem Estatística ou Redes Neurais Artificiais.

3.2.1 K-Nearest Neighbor (KNN)

É um algoritmo baseado em métodos determinísticos, que consiste em utilizar os valores medidos na fase *online* para encontrar os K pontos de referências (bases) mais próximas do dispositivo móvel. Para encontrar os K vizinhos mais próximos, deve-se calcular a distância entre o dispositivo e cada um dos pontos de referência existentes no ambiente, baseado nos valores de intensidade de sinal. Essa distância pode ser obtida através do cálculo da distância euclidiana. Quanto mais próximo o dispositivo estiver do ponto de referência, menor será a distância euclidiana entre eles. Neste caso, o termo “distância” refere-se a diferenças entre intensidades de sinal e não propriamente a uma distância física.

A partir deste método é possível calcular a distância (D_i) entre o dispositivo móvel e cada ponto de referência do cenário, de acordo com a Equação [1]. Para isso, utiliza-se os valores de RSSI ($RSSI_{BASEi}$) armazenados em cada uma das bases de dados (N) através da fase *off-line* e o valor de intensidade de sinal do dispositivo móvel ($RSSI_{MEDIDOi}$) em relação à cada uma das bases, obtido durante a fase *online*.

$$D_i = \sqrt{\sum_{i=1}^N (RSSI_{BASEi} - RSSI_{MEDIDOi})^2} \quad [1]$$

3.2.2 Rede Neural Artificial (RNA)

As redes neurais artificiais são compostas de elementos simples, operando em paralelo. Esses elementos são inspirados no sistema nervoso biológico (MORAES e SOUZA). Uma rede neural artificial pode ser treinada, de forma que uma determinada entrada conduza à uma saída específica, conhecida como “alvo” (*Target*). O

treinamento dos neurônios, componentes internos da rede, é feito baseado no ajuste dos valores das conexões entre os elementos da rede, comparando a saída da rede com o alvo correspondente ao resultado esperado. Dessa forma, um classificador RNA pode ser utilizado para associar um conjunto de intensidades de sinal de entrada com as coordenadas de localização x e y.

3.3 MÉTODOS PARA ESTIMAR A INTENSIDADE DE SINAL

Em sistemas de comunicação sem fio prever as perdas de propagação possui uma elevada complexidade, pois essas perdas dependem fortemente do tipo de ambiente. As ondas eletromagnéticas podem sofrer reflexão, difração e espalhamento causando seu desvanecimento (*Fading*), através de mudanças de amplitude e de fase no sinal.

Neste trabalho não serão utilizados os métodos de predição de perdas, descritos nesta seção, para estimar a intensidade de sinal visto que essa será obtida diretamente através dos módulos Xbee. Entretanto, a revisão bibliográfica destes métodos é importante pois serve como base para entender os fatores que influenciam na intensidade de sinal.

Para calcular a atenuação em enlaces de sistemas de comunicações sem fio são utilizados modelos de predição de perda de propagação, que usualmente fornecem o valor médio do sinal no receptor. Esses modelos podem ser classificados em teóricos, empíricos e híbridos. Os modelos teóricos utilizam bases de dados topográficos, entretanto não consideram todos os fatores do ambiente, permitindo uma fácil alteração dos seus parâmetros. Já os modelos empíricos se baseiam em medida e relacionam atenuação e distância, considerando todos os fatores que afetam a propagação do sinal. Dessa forma, é necessário validar locais, frequências e condições dos ambientes medidos. Os modelos híbridos contemplam ambos os outros modelos (empíricos e teóricos). Esses modelos podem ser comparados com medidas reais realizadas nos ambientes de propagação, especificamente onde estes serão utilizados, de tal forma que o erro entre a estimativa do sinal previsto e a realidade sejam minimizados.

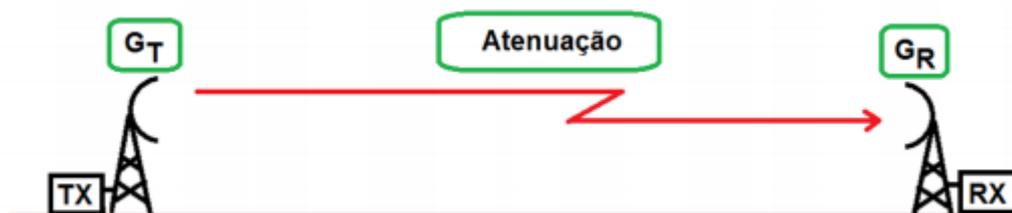
3.3.1 Outdoor

3.3.1.1 Fórmula de Friis

O modelo de Friis é utilizado para predizer o sinal recebido quando não há obstáculos entre o emissor e o receptor, ou seja, quando há linha de visada direta

(LVD). O transmissor envia uma determinada potência (P_T) à sua antena que é direcionado para a antena do receptor. Cada antena possui um ganho em decibéis (dB) que eleva o nível de sinal que chegará ao receptor, visto que o sinal é atenuado ao se propagar no espaço livre.

Figura 16 - Propagação do sinal entre uma antena transmissora e uma receptor.



Fonte: (RENNÓ)

A quantidade de potência que chega no receptor (P_R) pode ser obtida através da Fórmula de Friis, apresentada na Equação [2]. Como a potência recebida é proporcional ao ganho das antenas, pode-se compensar o baixo ganho da antena de recepção, por exemplo, com um elevado na antena de transmissão e vice-versa. Na prática, essa relação é importante tendo em vista que em várias aplicações necessita-se antenas de baixo ganho por limitações de tamanho, peso ou potência, como por exemplo em antenas presentes em satélites ou naves espaciais.

A fórmula de Friis relaciona que a potência recebida decai com o quadrado da distância (R) entre transmissor e receptor.

$$\frac{P_R}{P_T} = G_t \cdot G_r \left(\frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot R} \right)^2 \quad [2]$$

Em que:

P_r : Potência Recebida;

P_T : Potência Transmitida;

G_t : Ganho da Antena Transmissora;

G_r : Ganho da Antena Receptora;

R : Distância entre as antenas de transmissão e recepção;

λ : Comprimento de Onda.

Os ganhos das antenas são medidos em relação ao de uma antena isotrópica, que irradia igualmente em todas as direções, com área efetiva de abertura dada pela

Equação [3]. Assim, observa-se que ganho da antena (G) é função da frequência (λ) e abertura (A_e).

$$A_e = \frac{\lambda^2 \cdot G}{4 \cdot \pi} \quad [3]$$

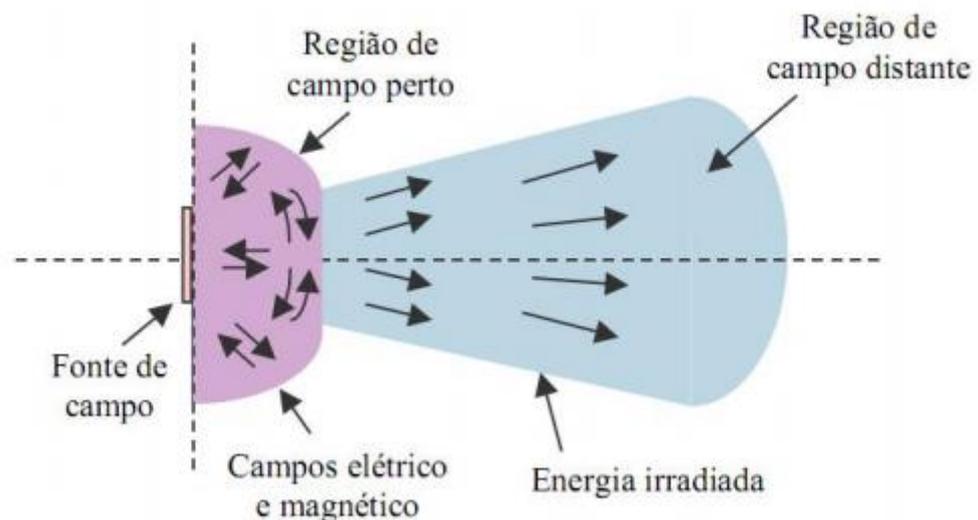
A EIRP (*Effective Isotropic Radiated Power*), dado pela Equação [4], é a máxima potência irradiada por um transmissor na direção de máximo ganho da antena em relação à antena isotrópica.

$$EIRP = P_T \cdot G_t \quad [4]$$

Condições para aplicações da Fórmula de Friis:

- Antenas devem estar em espaço com linha de visada;
- A potência (P_R e P_T) disponível nos terminais da antena só será totalmente entregue se houver casamento de impedância;
- As antenas devem estar alinhadas e orientadas de forma que cada antena irradie na direção de máxima radiação da outra;
- Só é válido para distâncias que estão no Far-Field (Campo Distante) da antena transmissora, ou seja, onde o campo elétrico e magnético são perpendiculares à direção de propagação, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17 - Caracterização da região de campo perto e de campo distante da antena.



Fonte: (MACHADO, 2011).

O campo distante ou Região de Fraunhofer é definido como a região com distância maior do que a Distância de Fraunhofer que depende da maior dimensão física da antena (D), podendo ser calculada através da Equação [5].

$$df = \frac{2 \cdot D}{\lambda} \quad [5]$$

Pode-se utilizar uma distância de referência de potência recebida que esteja da região de campo distante à uma distância d_o para calcular a potência recebida em uma distância d , de forma que $d > d_o$, conforme a Equação [6]. Entretanto, na prática, a eficiência dessa fórmula dificilmente é obtida em condições terrestres devido à reflexões em edifícios, além da reflexão na terra. Para comunicações via satélite seu uso é mais eficiente pois a absorção atmosférica é desprezível.

$$P_R(d) = P_R(d_o) \cdot \left(\frac{d_o}{d}\right)^2, d > d_o \geq d_f \quad [6]$$

3.3.2 Indoor

3.3.2.1 Modelo Log-Distance

O modelo mais simples para predição de perdas de propagação em ambientes fechados é representado pela Equação [7] apresentada a seguir.

$$P_R = P_R(d_o) - 10 \cdot n \cdot \log\left(\frac{d}{d_o}\right) \quad [7]$$

Em que:

n é o expoente de perda de caminho;

$P_R(d_o)$ é a potência recebida em um ponto de referência d_o ;

$P_R(d)$ é a potência recebida à uma distância d .

O coeficiente de perda de caminho (n) depende do meio em que o sinal se propaga, de acordo com a Figura 18.

Figura 18. Expoente de perda de caminho.

Environment	Path loss exponent
Free space	2
Urban area	2.7 – 3.5
Suburban area	3 – 5
Indoor line-of-sight	1.6 – 1.8
Obstructed in building	4-6
Obstructed in factories	2-3

Fonte: (NUR ATINA MOHAMAD RAZALI, 2017)

3.3.2.2 ITU-R P.1238-1

O modelo de propagação ITU-R considera a reflexão e difração em objetos fixos, atenuação do sinal devido à pisos e paredes e confinamento de energia em corredores, pessoas e objetos em movimentos. Pode ser utilizado para sistemas que operam em ambientes fechados na faixa de frequência entre 900MHz e 100GHz. As perdas de potência podem ser calculadas a partir da Equação [8].

$$L_{total} = 20 \cdot \log(f) + n \cdot \log(d) + L_f(K_f) - 28 \quad [8]$$

Em que:

L_{total} é a perda de propagação total;

f é a frequência de operação em MHz;

n é o coeficiente de atenuação com a distância dado pela Tabela 1;

d é a distância entre transmissor e receptor em metros;

k_f é o número de pisos (andares) atravessados;

L_f é o coeficiente de atenuação por piso atravessado dado pela Tabela 2.

Tabela 1 - Coeficiente de atenuação com a distância.

Frequência	Residencial	Escritório	Comercial
900 MHz	-	33	20
1.2 – 1.3 GHz	-	32	22
1.8 – 2.0 GHz	28	30	22
4 GHz	-	28	22
5 GHz	-	31	-

Fonte: (ITU-R, 1997 - 1999).

Tabela 2 - Coeficiente de atenuação por andar.

Frequência	Residencial	Escritório	Comercial
900 MHz	-	9 (1 andar)	-
		19 (2 andares)	
		24 (3 andares)	
1.8 – 2.0 GHz	$4 k_f$	$15 + 4(k_f - 1)$	$6 + 3(k_f - 1)$
5.2 GHz	-	16 (1 andar)	-

Fonte: (ITU-R, 1997 - 1999).

O modelo apresentado na Equação [8] representa a perda média do sinal, não cobrindo variações em larga escala do sinal, devido à sombreamentos e efeitos de

multipercurso. A Equação [9] representa a potência recebida (dB) à uma distância d considerando o efeito de sombreamento (X_σ).

$$P_R(d) = P_T - L_{total} - X_\sigma \quad [9]$$

Os valores de sombreamento empíricos descritos pelo ITU-R estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Desvio padrão da variável log-normal responsável pelo sombreamento (X_σ).

Frequência	Residencial	Escritório	Comercial
1.8 – 2.0 GHz	8	10	10
5.2 GHz	-	12	-

Fonte: (ITU-R, 1997 - 1999).

Como para protocolos de comunicação que operam na frequência de 2,4GHz não há valores descritos na Tabela 3, pode-se optar por utilizar valores que estão na banda de frequência mais próxima, referente à 1,8-2GHz.

Segundo resultados empíricos do modelo ITU-R P.1238-1, observa-se que na frequência de 2,4GHz há uma perda média de 6 a 8dB no nível de potência do sinal recebido quando há movimentação de pessoas ou objetos que prejudiquem a linha de visada direta entre transmissor e receptor.

Na descrição do modelo há algumas recomendações quanto a propagação em ambientes *indoor*, listadas a seguir:

- Se existir linha de visada entre transmissor e receptor pode-se calcular a potência recebida considerando as perdas no espaço livre alterando o coeficiente de perdas (n) para o valor 20;
- Para cômodos grandes e abertos considera-se o coeficiente de perdas de propagação igual a 20.
- O coeficiente de perdas estimado para corredores deve ser em torno de 18;
- A propagação através de obstáculos e paredes geram perdas consideráveis, assim, o coeficiente pode ser aumentado para até 40.

3.3.2.3 Modelos da European Cost 231

3.3.2.3.1 Modelo Cost 231 Multi-Wall

É um modelo semi-empírico que considera as perdas de trajeto, como a perda no espaço livre, somadas com as atenuações geradas pelas paredes e pisos

atravessados pelo sinal. A perda total pode ser calculada através da Equação [10]. A Tabela 4 apresenta os valores adicionais de perdas que podem ser somados na equação abaixo a fim de aproximar mais o resultado da situação real.

$$L_{total} = 20 \cdot \log\left(\frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot R}\right) + 10 \cdot n \cdot \log(d) + K_f^{\frac{k_f+2}{k_f+1}-b} + \sum_{j=1}^J K_{w,f} \cdot L_{w,f} \quad [10]$$

Em que:

n é o coeficiente de atenuação pela distância;

d é a distância entre o transmissor e o receptor em metros;

$K_{w,j}$ é o número de paredes com a mesma característica;

$L_{w,j}$ é a perda de propagação do sinal através da parede j [dB], apresentado na Tabela 5;

J é o número total de paredes com características diferentes atravessadas pelo sinal;

K_f é o número de pisos atravessados pelo sinal;

b é um parâmetro empírico;

L_f é a perda de propagação do sinal através dos pisos [dB].

Tabela 4 - Perdas de penetração em obstáculos.

Obstáculo	Perda adicional [dB]
Espaço Livre	0
Janela (tinta não metálica)	3
Janela (tinta metálica)	5 a 8
Parede fina (madeira)	5 a 8
Parede média (madeira)	10
Parede espessa (espessura aprox. 15 cm)	15 a 20
Parede muito espessa (espessura aprox. 30 cm)	20 a 25
Piso/Teto espesso	15 a 20
Piso/Teto muito espesso	20 a 25

Fonte: (NAJNUDEL, 2004).

Tabela 5 - Fator de perda através de paredes.

Tipo de Parede	L _w (dB)	L _w Mínimo (dB)	L _w Máximo (dB)
Concreto espesso com janelas amplas	5	4	5
Concreto e com janelas amplas	11	9	12
Concreto espesso sem janelas	13	10	18
Concreto interno duplo	17	14	20
Concreto interno fino	6	3	7
Parede de tijolo com pequenas janelas	4	3	5
Parede com aço e janelas reforçadas	10	9	11
Parede de vidro	2	1	3
Vidro Reforçado	8	7	9

Fonte: (NAJNUDEL, 2004).

3.3.2.3.2 Modelo COST 231 Keenan e Motley

É considerado um dos modelos mais complexos para a predição de sinal em ambientes indoor, pois necessita de uma grande quantidade características do ambiente de propagação, bem como do percurso entre o transmissor e cada ponto em que o receptor se encontra. A perda total pode ser obtida através da resolução da Equação [11].

$$L_{total}(dB) = L_0 + 10n \cdot \log \cdot (d) + \sum_{i=1}^I K_{f,i} \cdot L_{f,i} + \sum_{j=1}^J K_{w,f} \cdot L_{w,f} \quad [11]$$

Em que:

L₀ é a perda de propagação a um metro da antena transmissora;

n é o coeficiente de atenuação pela distância;

d é a distância entre transmissor e receptor em metros;

K_{f,i} é o número de pisos com a mesma característica;

$L_{f,i}$ é a perda de propagação do sinal através do piso i [dB];

$K_{w,j}$ é o número de paredes com a mesma características;

$L_{w,j}$ é a perda de propagação do sinal através da parede j [dB];

I é o número total de pisos com características diferentes atravessados pelo sinal;

J é o número total de paredes com características diferentes atravessados pelo sinal.

4 DESENVOLVIMENTO PRÁTICO

O objetivo deste trabalho é implementar um sistema de posicionamento *indoor* baseado na informação da potência do sinal recebido (RSSI) pela estação móvel de cada uma das estações base, através do método conhecido como *fingerprinting*. Para isso, serão utilizados módulos Xbee, que operam a partir do protocolo de comunicação ZigBee, e que possuem alto rendimento com baixa latência e tempo previsível de comunicação, fornecendo conectividade sem fio para dispositivos embarcados, como por exemplo o Arduino. Além disso, os módulos possuem um consumo extremamente baixo de energia, sendo ideal para um sistema de posicionamento onde os pontos de referência devem estar sempre energizados esperando o início de uma trama.

Utilizando o arduino, é possível interpretar e armazenar os dados relevantes de cada pacote e também coordenar as ações de cada dispositivo da rede. Para isso, o coordenador e as bases devem operar no modo API, de forma que toda informação que circula pela rede seja interpretada e verificada.

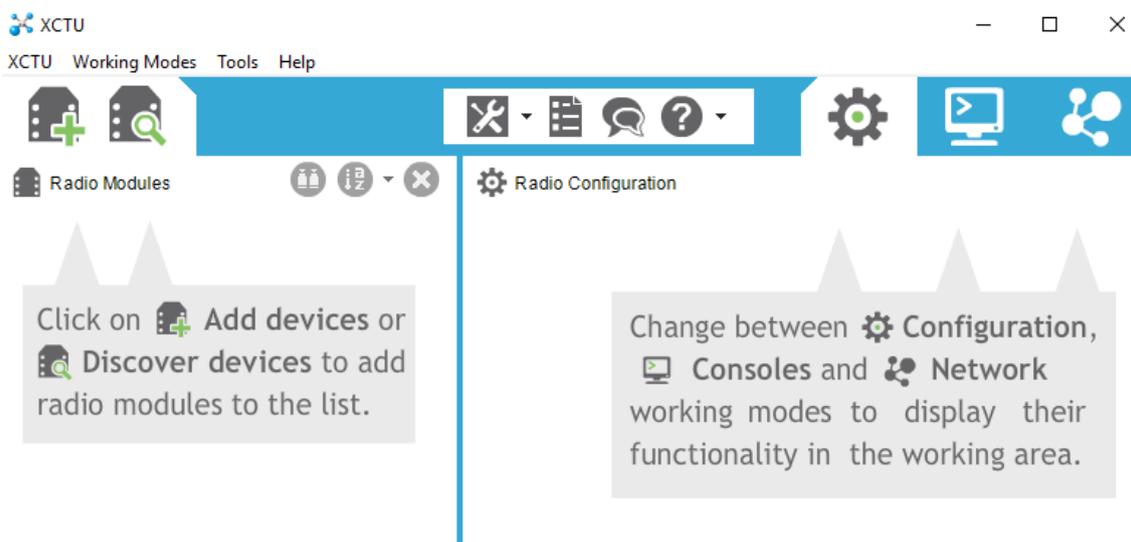
Neste capítulo, será explicado como foi feita a configuração dos módulos, como gerar frames no modo API, como realizar a comunicação dos dispositivos Xbee com o microcontrolador Arduino e por fim, a configuração e coordenação da rede de sensores criada para a implementação do sistema de posicionamento *indoor*.

4.1 XCTU

A configuração dos módulos pode ser feita através do aplicativo X-CTU (Xbee – Configuration & Test Utility) disponibilizado pela *Digi International*. Este aplicativo permite configurar os dispositivos a nível de *firmware*, ID da rede, modo de operação, entre outros.

O *software* X-CTU funciona em computadores que utilizam o sistema operacional *Windows* e pode ser obtido diretamente no site do fabricante de forma gratuita. A tela inicial do *software* está apresentada na Figura 19.

Figura 19 - Software X-CTU utilizado para configurar os módulos.



4.1.1 Configuração dos Módulos Xbee

Os módulos Xbee devem ser conectados ao computador através de um cabo USB. Para isso, pode-se utilizar um adaptador Xbee *Explorer* ou um *Shield Xbee* acoplado a um arduino. O adaptador Xbee *Explorer* é compatível com todas as versões dos módulos Xbee. A Figura 20 ilustra um módulo Xbee acoplado a um dos modelos de adaptador Xbee *Explorer*.

Figura 20 - Módulo Xbee conectado ao adaptador Xbee Explorer.



Fonte: (JIMBLON)

Outra forma de comunicação USB entre computador e Xbee pode ser feita utilizando um *Shield Xbee* para Arduino UNO. Para utilizar esta opção, deve-se retirar o microcontrolador do Arduino e selecionar a chave do *Shield Xbee* na posição USB.

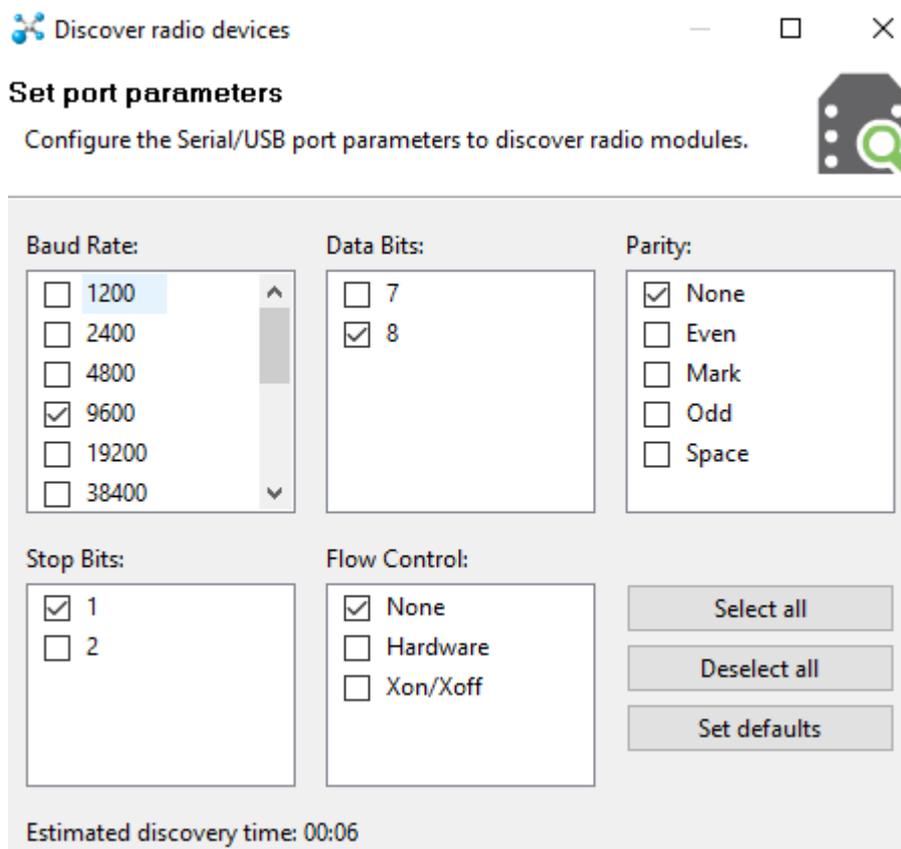
Figura 21 - Shield Xbee para Arduino Uno.



Fonte: (Itread Xbee Shield Module for Arduino UNO MEGA NANO DUE DUEMILANOVE).

Com a conexão USB do dispositivo a um computador, será criada uma porta serial COMxx, que pode ser detectada pelo X-CTU. Para configurar os módulos, deve-se primeiramente encontrar os dispositivos que estão conectados ao computador clicando em *Discover Devices* e em seguida, selecionar a porta serial na qual o módulo está conectado. Na janela *Set Port Parameters* deve-se selecionar os parâmetros de operação do dispositivo, podendo estes serem configurados posteriormente de acordo com as necessidades do projeto. Comumente, os dispositivos vindos de fábrica vem configurados com os seguintes parâmetros: uma taxa de transmissão (*Baud Rate*) de 9600, 8 *data bit*, sem bit de paridade (*Parity*), 1 *stop bit* e sem *flow control*. A Figura 22 ilustra a janela descrita anteriormente com os parâmetros usualmente utilizados.

Figura 22 - Parâmetros comumente utilizados para procurar um dispositivo pela X-CTU.



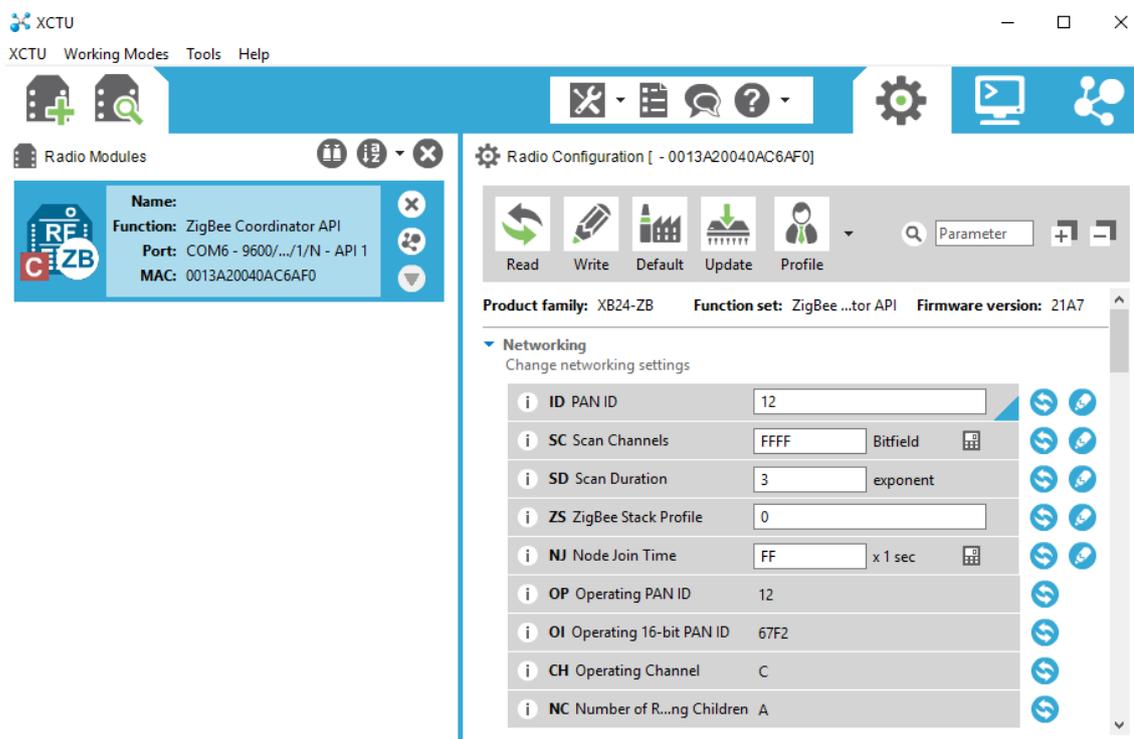
Após descobrir o dispositivo, pode-se configurar os principais parâmetros que formarão a rede. Um destes parâmetros que deve ser configurado via *software* é o PAN ID, localizado na pasta *Networking*. O número destinado ao PAN ID pode ser escolhido pelo desenvolvedor, entretanto, todos os dispositivos que integrarão a rede deverão possuir o mesmo PAN ID do coordenador.

4.1.2 Rede de Sensores Xbee

O coordenador é o dispositivo responsável por iniciar a rede, varrendo uma área para verificar quais os endereços de PAN e canais que estão disponíveis. Após sua iniciação, os roteadores e os dispositivos finais podem ingressar à rede recebendo um endereço de 16 bits.

A formação da rede depende dos comandos: SC (*Scan Channels*), ID (PAN ID), SD (*Scan Duration*) e NJ (*Node Join Time*). Estes parâmetros podem ser facilmente alterados a partir do *software* X-CTU.

Figura 23 - Tela de configuração dos parâmetros do módulo.



Para iniciar a rede, o coordenador irá selecionar um canal de operação que não esteja sendo utilizado e um identificador (PAN ID). Primeiramente é feito um SC (*Scan Channels*), de duração definida pelo parâmetro SD (*Scan Duration*). Após o escaneamento, o coordenador envia um *beacon request* e mantém-se em escuta. As informações obtidos pelo SC e pelo *beacon scan (active scan)* são utilizadas para escolher o canal e o ID da PAN.

Se durante a configuração no X-CTU for definida uma PAN ID igual a 0xFFFF, o coordenador irá escolher um ID aleatório. Se não, o coordenador iniciará a rede com o ID especificado. Após a conexão do coordenador a rede, outros nós poderão integrar a rede por um tempo conforme especificado no parâmetro NJ (*Node Junction Time*).

Para um roteador ingressar numa rede, este deve localizar o coordenador ou outro dispositivo pertencente a PAN desejada e associar-se a este. Para isso, o roteador envia *beacons* em cada um dos canais e fica à escuta. Se o ID for 0xFFFF, o roteador tentará se associar a qualquer roteador ou coordenador. Caso seja bem sucedida a associação, o roteador é inicializado com êxito e neste momento é possível consultar o endereço de rede de 16 bits através do comando MY.

A associação de um dispositivo final a uma PAN se assemelha à associação de um roteador. A principal diferença é que o dispositivo final não é capaz de permitir a associação de outros dispositivos à rede.

Após a formação da rede, todos os dispositivos são identificados na mesma a partir do seu número de fábrica, o *Serial Number High* (SH) e o *Serial Number Low* (SL).

Na pasta *Addressing* pode-se configurar o campo denominado como *node identifier* com um nome que facilite a identificação do dispositivo. Na mesma pasta, encontra-se o *Serial Number High* (SH) e o *Serial Number Low* (SL) que designam o endereço do dispositivo, sendo este um número configurado pela fábrica e impossível alterar. A obtenção do endereço pode ser feita também analisando os números apresentados na parte inferior do módulo Xbee, conforme destacado na Figura 24.

Figura 24 - Identificação do número de série do módulo Xbee.



Fonte: (Módulo Xbee S2c Zigbee).

Ainda na pasta *Addressing* o *Destination Address High* (DH) e *Destinations Address Low* (DL) indicam o endereço de destino das mensagens enviadas pelo dispositivo.

Os dispositivos vêm com configuração de fábrica no modo de operação AT. Como neste trabalho necessita-se de informação sobre os pacotes que circulam na rede, utilizará o modo de operação API.

A atualização do modo de operação do dispositivo é feita também através do *software* X-CTU. Para isso, deve-se ir na configuração *Update* do *software*. Primeiramente deve-se selecionar a família do dispositivo, que pode ser obtida analisando a parte inferior do Xbee a ser configurado, conforme o destaque realizado na Figura 25.

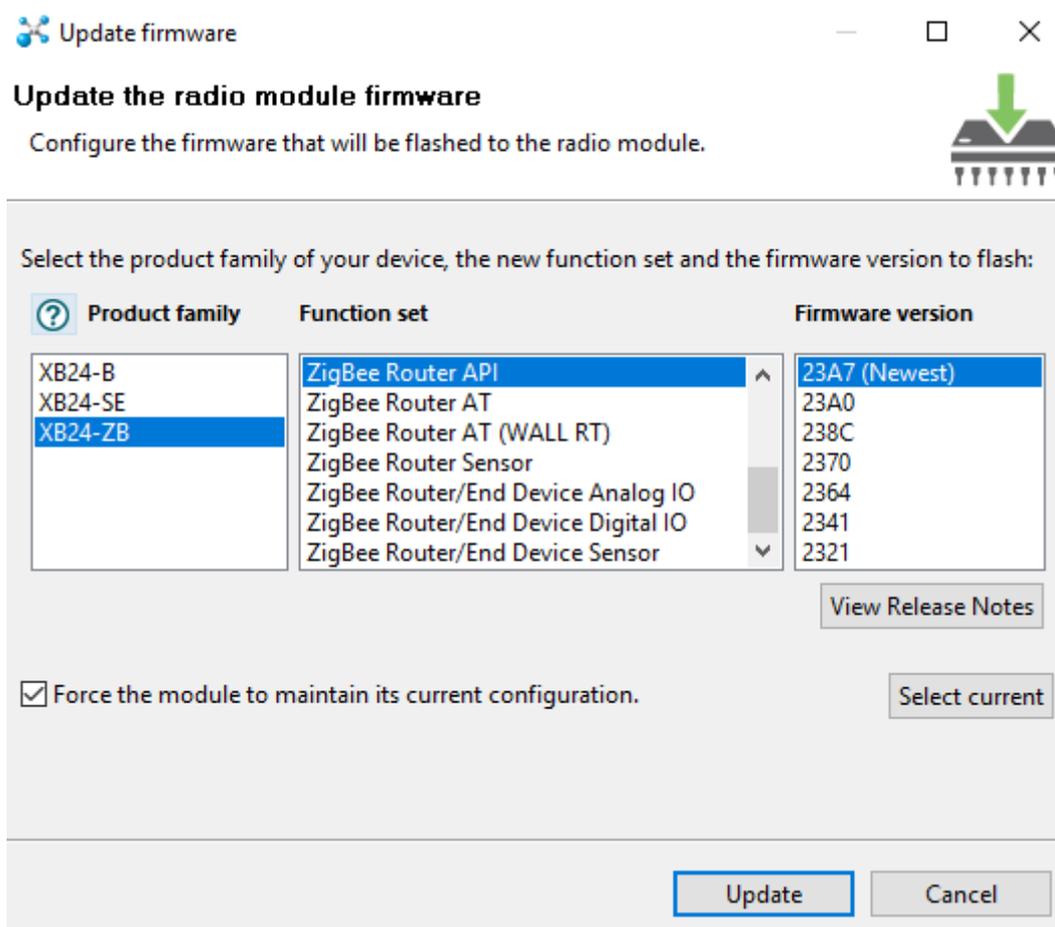
Figura 25 - Identificação da família do Xbee.



Fonte: (Módulo Xbee S2c Zigbee).

Em seguida, define-se o modo de operação (API ou AT) e a função do dispositivo na rede (coordenador, roteador ou dispositivo final). Por fim, escolhe-se a versão do *firmware* a ser implementada no dispositivo, usualmente seleciona-se a versão mais recente fornecida pelo fabricante. Assim, o dispositivo está pronto para ser atualizado para o novo modo de operação desejado clicando no botão *Update*.

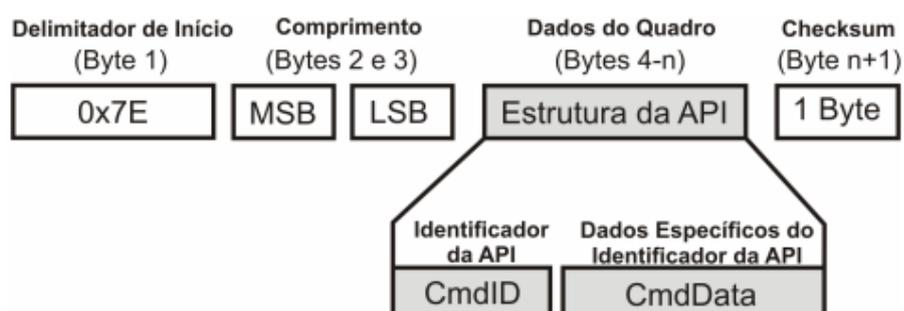
Figura 26 - Update do módulo.



4.1.3 Frame API

Um frame de dados API tem como delimitador inicial um *byte* com valor 0x7E, que indica o começo da trama. Em seguida, tem o comprimento do quadro que é dividido em *Most Significant Byte* (MSB) – Byte mais significativo e *Least Significant Byte* (LSB) – Byte menos significativo. No tamanho do frame não está incluso o último byte que é o *checksum*.

Figura 27 - Quadro de dados API.



Fonte: (RIVERO, 2011).

O campo de dados do quadro é dividido em CmdID e CmdData. No campo CmdID identifica-se o tipo de trama. Estas tramas variam com versão do *firmware* utilizado. Os *frames* API suportados pelo módulo Xbee e os identificadores de cada tipo de *frame* estão apresentados na Figura 28. No campo cmdData estão contidas todas as informações que deseja-se enviar.

Figura 28 - Tipos de frame API.

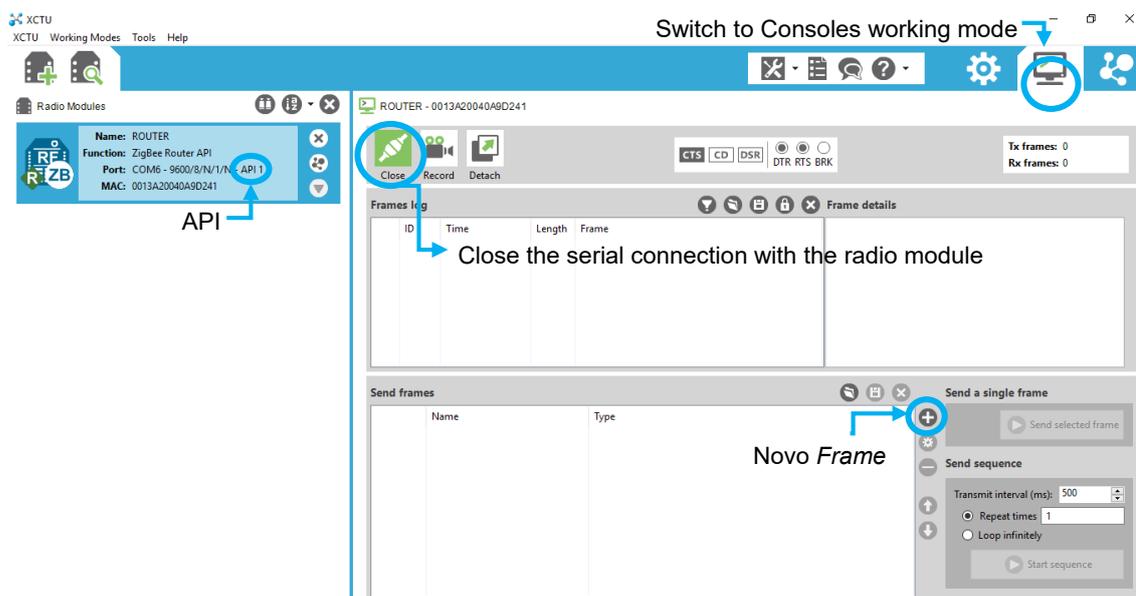
API Frame Names	API ID
AT Command	0x08
AT Command - Queue Parameter Value	0x09
ZigBee Transmit Request	0x10
Explicit Addressing ZigBee Command Frame	0x11
Remote Command Request	0x17
Create Source Route	0x21
AT Command Response	0x88
Modem Status	0x8A
ZigBee Transmit Status	0x8B
ZigBee Receive Packet (AO=0)	0x90
ZigBee Explicit Rx Indicator (AO=1)	0x91
ZigBee IO Data Sample Rx Indicator	0x92
XBee Sensor Read Indicator (AO=0)	0x94
Node Identification Indicator (AO=0)	0x95
Remote Command Response	0x97
Over-the-Air Firmware Update Status	0xA0
Route Record Indicator	0xA1
Many-to-One Route Request Indicator	0xA3

Fonte: (Xbee™ Series 2 OEM RF Modules, 2007).

Um *frame* em API pode ser facilmente gerado através do software X-CTU. Para isso, seu dispositivo Xbee deve estar conectado na porta serial do computador. Além disso, o módulo deve estar configurado para operação no modo API. Após a configuração, altera-se a tela do X-CTU do modo de configuração para o modo Console (Alt + c), conforme indicado na Figura 29.

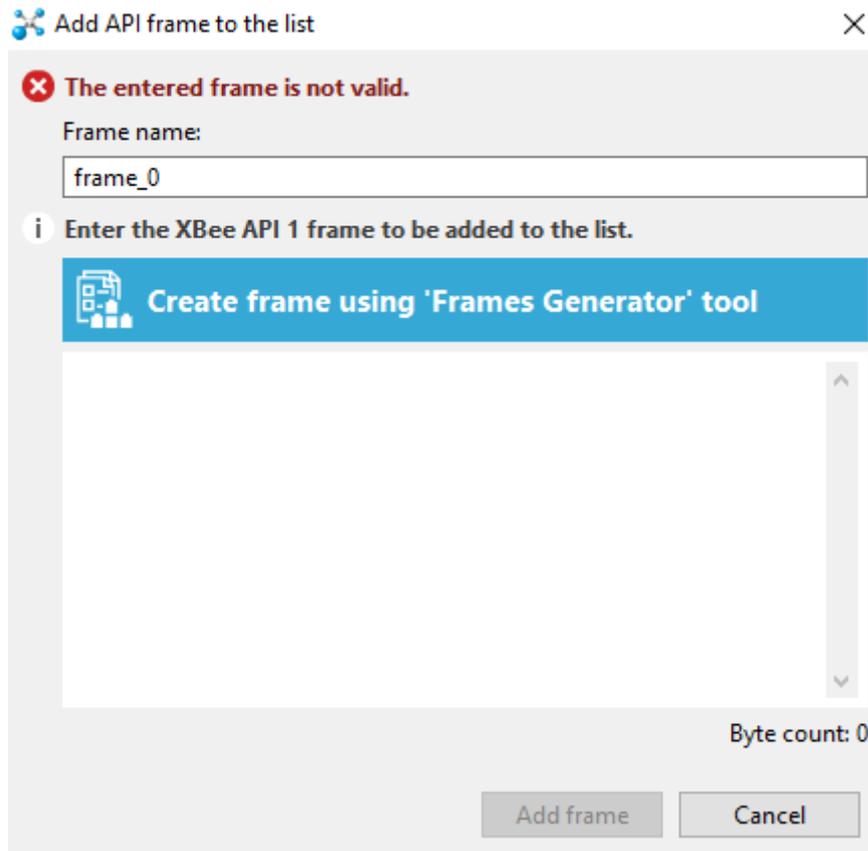
A próxima etapa é fechar a comunicação serial com o módulo. Para isso, pressiona-se o botão indicado abaixo, que alternará de “*open*” para “*close*”. Por fim, um *frame* pode ser gerado clicando no “+” destacado na figura.

Figura 29 - Operação no modo Console.



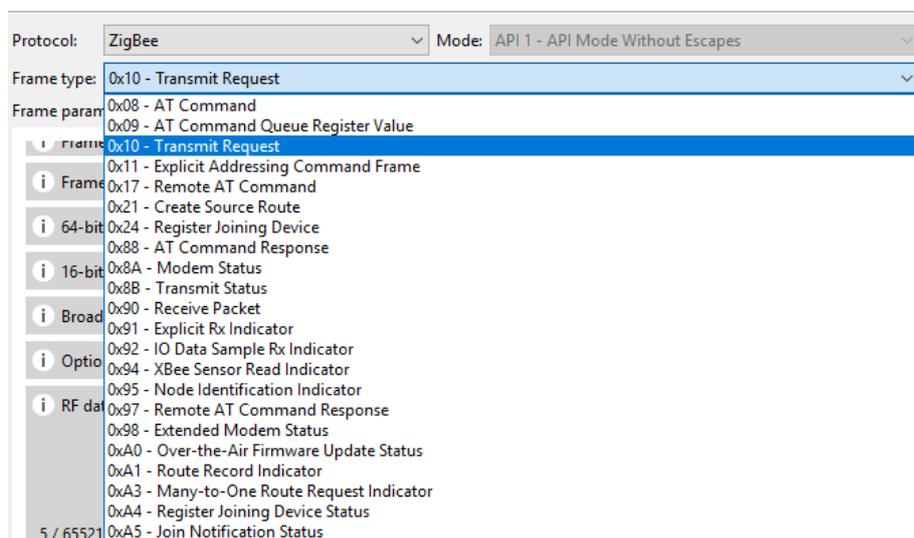
Após criar um novo frame, a janela da Figura 30 será aberta e deverá ser selecionado a opção *Create frame using 'Frames Generator' tool*.

Figura 30 - Criando um frame utilizando a ferramenta 'Frame Generator.'



Os tipos de *frames* API suportados pelo módulo Xbee e os identificadores de cada tipo de *frame* estão apresentados na Figura 31.

Figura 31 - Tipos de frames API.



Um dos tipos possíveis de frame que podem ser gerados a partir do software está apresentado na Figura 32.

Figura 32 - Frame obtido através do X-CTU.

```
Generated frame:
7E 00 13 10 01 00 00 00 00 00 00 00 00 00 FF FE 00 00 44 61 64 6F 73 06
```

O frame que delimita o início da transmissão é 0x7E. O comprimento é a soma de todos os bits da mensagem, exceto o *checksum*. O *frame type* indica o tipo de frame escolhido a partir das opções apresentadas na Figura 31. *Frame ID* representa o ID da mensagem. O campo 64-bit *destination address* representa o endereço de destino, neste caso o valor utilizado representa o endereço de 64 bits do coordenador (podendo ser substituído pelo endereço real). Pode também ser utilizado 0xFFFF, que indica um endereço de *broadcast*. Já o campo 16-bit *destination address* é o endereço de 16 bits do destinatário, quando for conhecido. Além disso, existem outros endereços reservados: 0xFFFFE quando o endereço for desconhecido; 0xFFFFC que representa um *broadcast* para todos os roteadores; 0xFFFFD é um *broadcast* para todos os dispositivos finais e 0xFFFF é um *broadcast* para todos os dispositivos da rede, incluindo os que estão no modo de operação *sleep*.

No campo *broadcast radius* está representado o número máximo de hops que uma mensagem pode dar. Se for escolhido 0, o *broadcast radius* vai ser setado para o

máximo número de hops possível. Em *options* os byte escolhidos definem as opções de transmissão suportadas, conforme apresentado na figura 33.

Figura 33 - Opções de transmissão suportadas.

Bitfield of supported transmission options.

ZigBee:

- 0x00 - None
- 0x01 - Disable ACK
- 0x20 - Enable APS encryption
- 0x40 - Extended timeout

Enabling the 'APS encryption' decreases the maximum number of RF payload bytes by 4 (below the value reported by NP).

Setting the 'Extended timeout' will cause the stack to set the extended transmission timeout for the destination address.

DigiMesh:

- Bit 0: Disable ACK
- Bit 1: Don't attempt RD
- Bit 2: Enable Unicast NACK messages
- Bit 3: Enable Unicast Trace Route messages
- Bits 6-7:
 - 01: Point-Multipoint
 - 10: Repeater mode (directed broadcast)
 - 11: DigiMesh (not available on 10k product)

Em RF Data está o campo de dados da mensagem, podendo ser de até 14 bytes. No exemplo a seguir escreveu-se com caracteres ASCII a palavra “Dados” que corresponde a “64 61 64 6F 73” em hexadecimal. Por fim, a soma de todos os bytes enviados resulta no *checksum* da mensagem, contando a partir do comprimento.

Figura 34 - Parâmetros do frame.

i Start delimiter	7E
i Length	00 13
i Frame type	10
i Frame ID	01
i 64-bit d... address	00 00 00 00 00 00 00 00
i 16-bit d... address	FF FE
i Broadcast radius	00
i Options	00
i RF data	<div style="border: 1px solid gray; padding: 5px;"> ASCII HEX Dados </div>
5 / 65521 bytes	
i Checksum	06

4.1.4 Comunicação entre Módulos Xbee

Para testar a comunicação entre os módulos Xbee, primeiramente, utilizou-se os módulos no modo de operação AT. Os dispositivos foram configurados de acordo com a Tabela 6 utilizando o software X-CTU. Definiu-se a mesma PAN ID para ambos os dispositivos, para que estes pertencessem a mesma rede. Para o Xbee 1, definido como o coordenador da rede, configurou-se o DH como 0x0000 e o DL como 0xFFFF, indicando que será feito um *broadcast* na rede. Já o Xbee 2 foi configurado como roteador. O endereçamento de destino deste módulo foi configurado como o número de série (SH e SL) do Xbee 1. Dessa forma, todas as mensagens enviadas do roteador tem como endereçamento de destino o módulo coordenador.

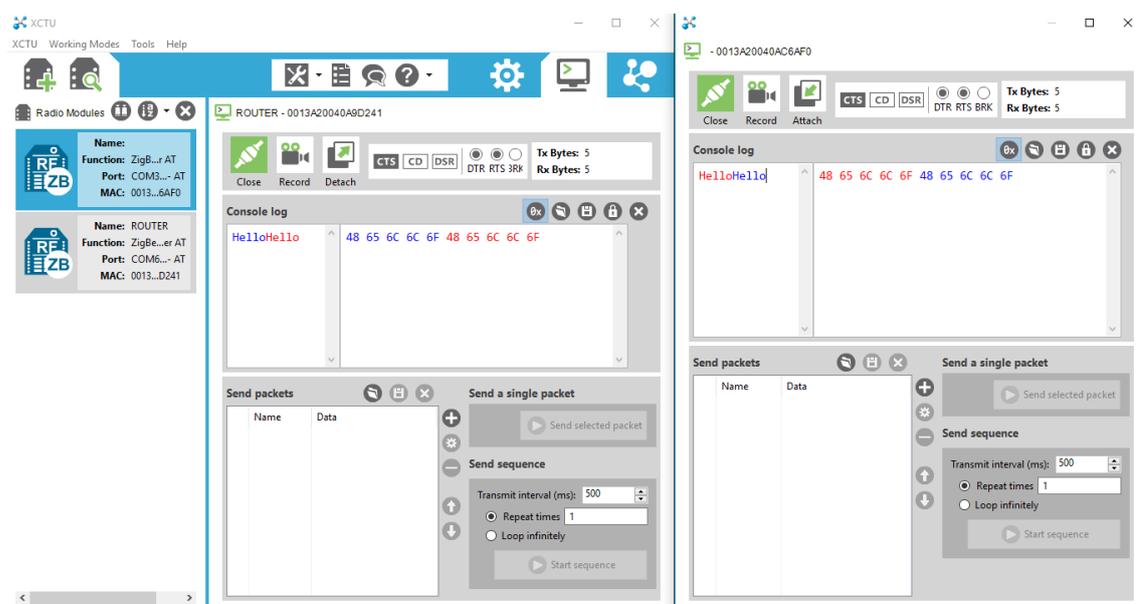
Tabela 6 - Configuração dos módulos Xbee.

Configurações	Tipo	PAN ID	DH	DL
Xbee 1	Coordenador AT	12	0	FFFF
Xbee 2	Roteador AT	12	13A200	40AC6AF0

Ainda no X-CTU, após configurar os módulos, alterou-se para o modo Console do aplicativo. A comunicação serial de cada um dos módulos foi fechada. No Console Log é possível enviar mensagens, onde o que estiver escrito na cor azul representa as mensagens enviadas e o que estiver vermelho representa as mensagens que foram recebidas pelo módulo.

No roteador foi escrito a palavra “Hello”, que aparece em azul na tela da esquerda da Figura 35. Observa-se que na tela da direita, correspondente ao coordenador, os mesmos caracteres foram recebidos, sendo indicados pela cor vermelha. Em seguida, enviou-se a mesma mensagem pelo coordenador, que realiza um *broadcast* pela rede. Nota-se que a mensagem foi recebida pelo roteador, aparecendo em vermelho na tela da direita.

Figura 35 - Testando a comunicação AT entre dois módulos Xbee.

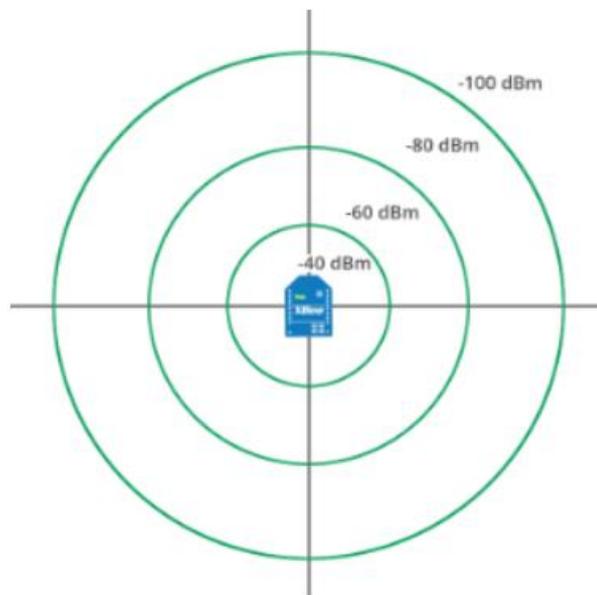


4.2 RECEIVED SIGNAL STRENGTH INDICATOR (RSSI)

O RSSI mede a quantidade de sinal presente em um sinal de rádio. Se a distância entre transmissor e receptor é pequena, a intensidade de sinal transmitido na antena receptora aumenta. Da mesma forma, se o transmissor é afastado do receptor, a intensidade de sinal na antena receptora diminui.

A intensidade de sinal é medida em dBm. Quanto mais negativo o valor (em dBm), mais fraco o sinal. Assim, -40dBm é melhor do que -60dBm. A intensidade de sinal diminui conforme a distância entre o transmissor e o receptor aumenta, de acordo com a representação dada pela imagem abaixo.

Figura 36 - Variação da intensidade de sinal do Xbee conforme a variação de distância.



Fonte: (DIGI, 2017).

Há duas formas de obter a intensidade de sinal entre dois dispositivos Xbee's: através do comando ATDB ou configurando o pino 6 do Xbee como uma saída PWM (Pulse-width modulation). O comando DB retorna o valor de intensidade de sinal (medido em -dBm) do último pacote recebido. Se a funcionalidade do RSSI PWM está ativada (P0 command), quando o módulo recebe um dado, o RSSI PWM representa o valor de intensidade do pacote recebido.

A sensibilidade dos dispositivos utilizados é:

Xbee s2 PRO: -102dBm

Xbee s2: -92dBm

4.2.1 Frame ATDB

Um dos Xbee foi configurado como coordenador em modo API e o outro como roteador em modo AT. Ambos foram conectados serialmente ao computador, utilizando o Xbee USB Explorer Adapter. Através software XCTU envia-se um pacote do tipo Remote AT Command Request do coordenador para o roteador. O campo 64-bit dest. Address do pacote enviado deve ser preenchido com o MAC Address do roteador e o campo AT Command deve conter o comando DB para que se obtenha a intensidade de sinal.

- **Remote AT Command Request (API 1)**

7E 00 0F 17 01 00 13 A2 00 40 A9 D2 41 FF FE 02 64 62 71

Start delimiter: 7E

Length: 00 0F (15)

Frame type: 17 (Remote AT Command Request)

Frame ID: 01 (1)

64-bit dest. address: 00 13 A2 00 40 A9 D2 41

16-bit dest. address: FF FE

Command options: 02

AT Command: 64 62 (db)

Checksum: 71

Após o envio, o coordenador recebe um pacote do tipo *Remote Command Response* que contém o valor de intensidade de sinal. A resposta obtida (0x41) está em hexadecimal, que convertendo para decimal corresponde à -65dBm.

- **Remote Command Response (API 1)**

7E 00 10 97 01 00 13 A2 00 40 A9 D2 41 8E AC 64 62 00 41 75

Start delimiter: 7E

Length: 00 10 (16)

Frame type: 97 (Remote Command Response)

Frame ID: 01 (1)

64-bit source address: 00 13 A2 00 40 A9 D2 41

16-bit source address: 8E AC

AT Command: 64 62 (db)

Status: 00 (Status OK)

Response: 41

Checksum: 75

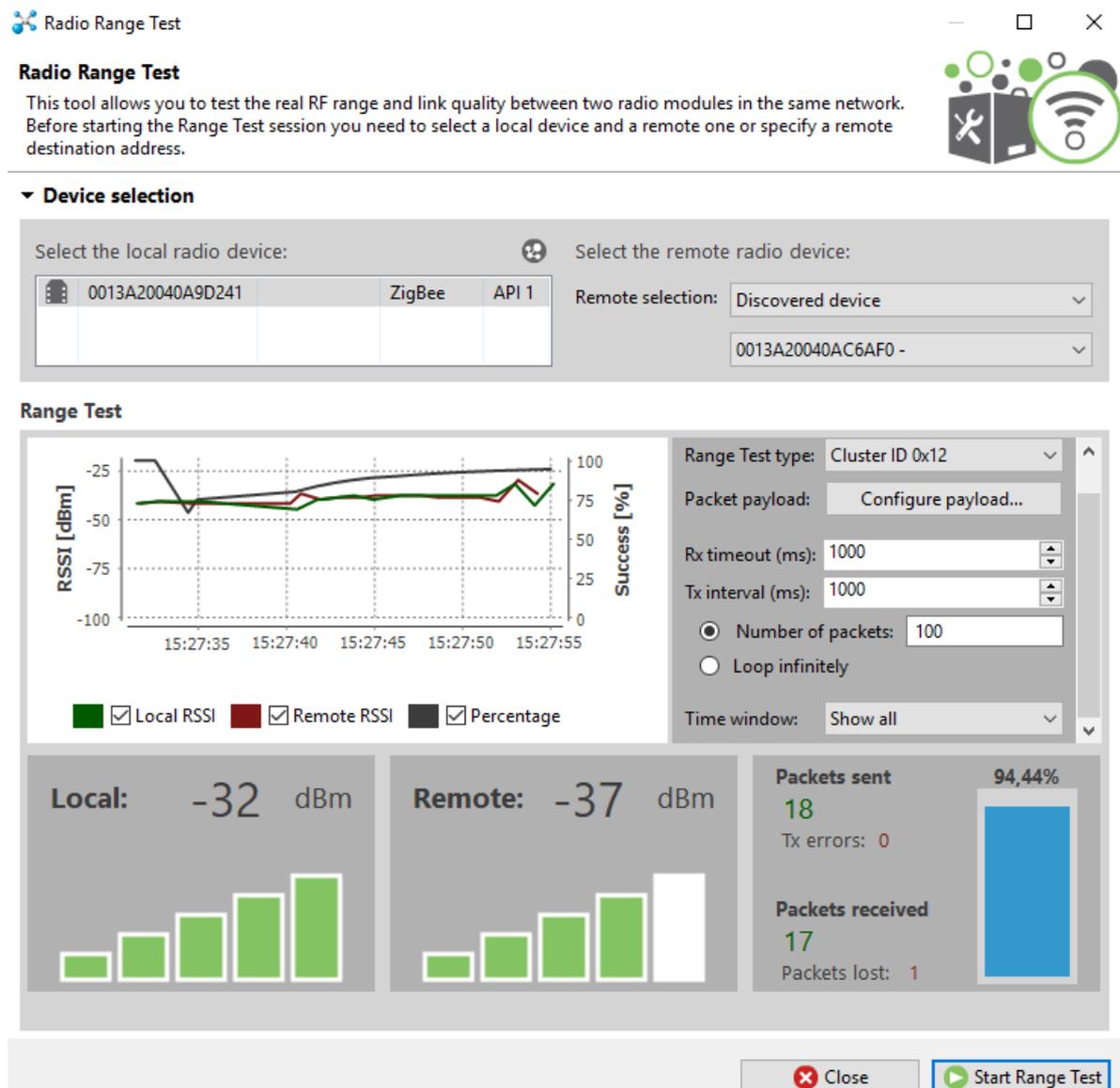
4.2.2 Range Test

Através do software XCTU é possível utilizar a ferramenta Range Test para medir a intensidade de sinal e a qualidade do sinal entre os módulos de rede. Para isso, é necessário ter um módulo conectado ao PC e outro módulo remoto conectado na mesma rede. No XCTU, no menu de ferramentas encontra-se o Range Test.

O teste mostra o valor de intensidade de sinal do dispositivo local e do dispositivo remoto durante o período de testes. Além disso, também é possível analisar a porcentagem de sucesso de entrega dos pacotes enviados.

Para realizar os testes o módulo Xbee local (conectado ao computador) deve estar configurado ou no modo API ou no modo AT. Entretanto, o valor de intensidade de sinal do dispositivo remoto só pode ser obtido quando o módulo Xbee local estiver operando no modo API.

Figura 37 - Range Test com o software XCTU.

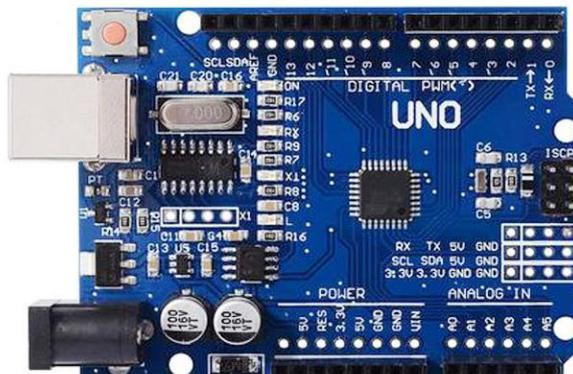


4.3 ARDUINO

Para realizar a comunicação com o Xbee foi utilizada a plataforma de desenvolvimento do Arduino UNO, apresentado na Figura 38, baseado na linguagem

C/C++. O microcontrolador empregado nesse dispositivo é o ATmega 328 que possui 8 bits e uma frequência de *clock* de 16MHz.

Figura 38 - Arduino UNO.



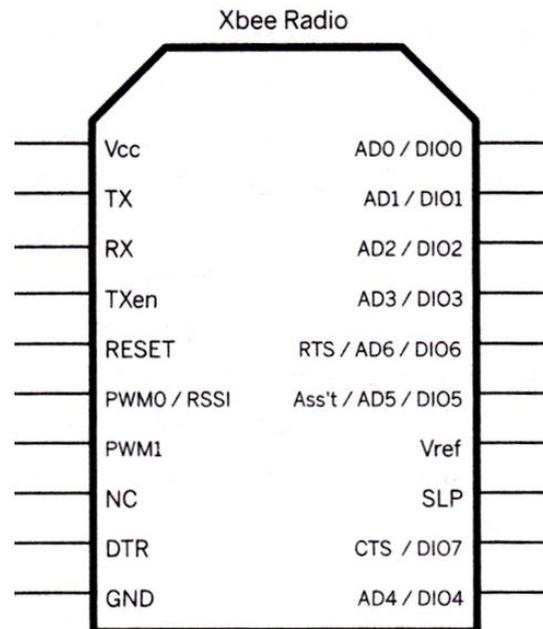
Fonte: (MAKERLAB).

A comunicação serial permite que o Arduino se comunique com um computador ou com outros dispositivos. No Arduino UNO essa comunicação ocorre através dos pinos digitais 0 (RX) e 1 (TX), assim como uma conexão USB. Já o Arduino Mega possui três portas seriais adicionais: Serial1 nos pinos 19 (RX) a 18 (TX), Serial2 nos pinos 17 (RX) e 16 (TX), Serial3 nos pinos 15 (RX) e 14 (TX).

Para realizar a transmissão e recepção de informações entre os módulos Xbee, os pinos Rx (recepção) e Tx (Transmissão) do Xbee devem ser conectados aos pinos 0 (Rx) e 1 (Tx) do Arduino, respectivamente.

Os pinos do Xbee estão descritos na Figura 39. Deve-se atentar que a alimentação do Xbee é feita com 3,3V. Os adaptadores Xbee Explorer usualmente vem com um regulador de tensão, podendo assim, ser alimentados por uma tensão de 5V.

Figura 39 - Pinos Xbee.



Fonte: (ABEL).

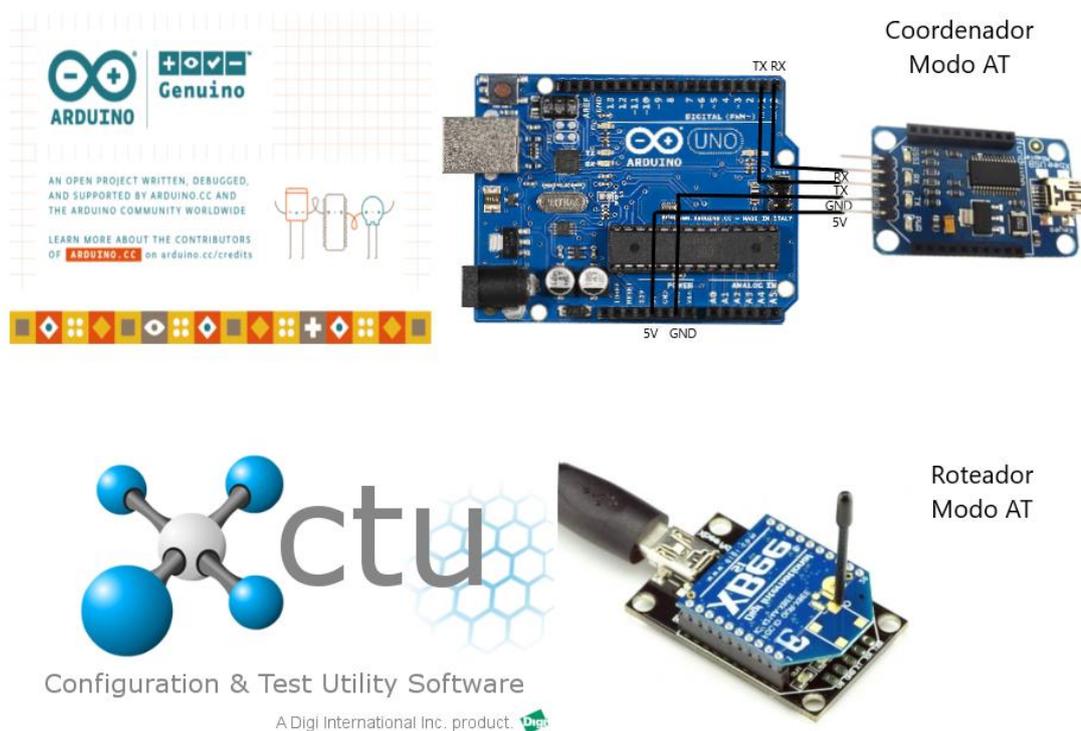
4.3.1 Comunicação AT usando Arduino

Para testar a comunicação entre os módulos utilizando o arduino UNO foi utilizado um código em C fornecido pelo site Filipeflop. O coordenador foi conectado ao Arduino de acordo com a Figura 40.

O módulo coordenador em modo de operação AT está conectado à saída serial do arduino, onde o pino Tx da Xbee *Explorer* é conectado ao pino Tx do Arduino, e o pino Rx da Xbee *Explorer* é conectado ao pino Rx do Arduino. A saída de 5V e o GND da Xbee *Explorer* são conectados aos pinos de mesmo nome do Arduino UNO.

Já o módulo roteador, também operando em modo AT, é conectado diretamente por um cabo USB da Xbee *Explorer* ao computador. Este módulo enviará comandos pelo terminal Console do aplicativo X-CTU. As configurações apresentadas no teste anterior são as mesmas utilizadas para o exemplo a seguir.

Figura 40 - Esquema de Ligação.



É necessário remover os cabos Rx e Tx do Xbee enquanto o código é carregado para o Arduino, e após concluído conectá-los novamente. Caso seja recebido o bit 0 pela porta serial, o *led* embutido no arduino é desligado, e uma mensagem de “Led Apagado” é enviado para a serial. Caso o bit recebido for 1, o *led* acende e a mensagem de “Led Aceso” é enviado para a saída serial. O código para o arduino utilizado neste teste é de autoria do site FilipeFlop.

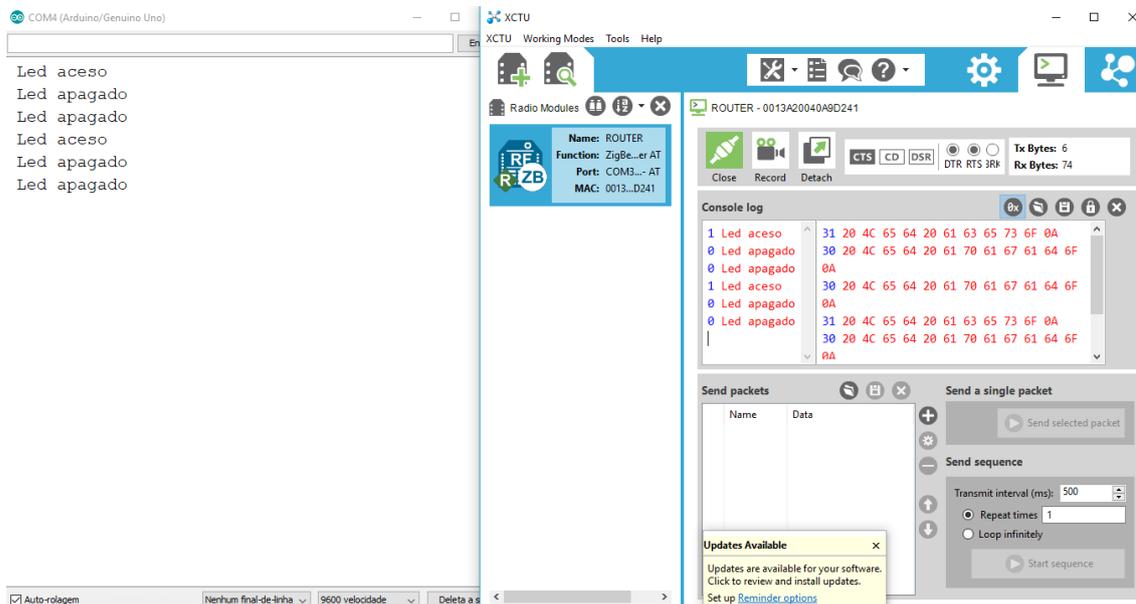
Figura 41 - Código para o Arduino de uma comunicação AT.

```
1 //Programa : Comunicacao Xbee utilizando Arduino Xbee Shield
2 //Autor : FILIPEFLOP
3
4 //Armazena os valores recebidos da serial
5 int valores = 0;
6 //Armazena o estado do led
7 String estado;
8
9 void setup()
10 {
11     //Define o pino 13 - LED embutido no Arduino - como saida
12     pinMode(13, OUTPUT);
13     Serial.begin(9600);
14 }
15
16 void loop()
17 {
18     //Aguarda dados na serial
19     if (Serial.available() > 0)
20     {
21         valores = Serial.read();
22         //Caso seja recebido 0, apaga o led
23         if(valores == '0')
24         {
25             digitalWrite(13, LOW);
26             estado = "apagado";
27         }
28         //Caso seja recebido 1, acende o led
29         else if(valores == '1')
30         {
31             digitalWrite(13, HIGH);
32             estado = "aceso";
33         }
34         //Envia mensagem de confirmacao
35         Serial.print(" Led ");
36         Serial.print(estado);
37         Serial.write(10);
38     }
39 }
```

Fonte do Código: (FILIPEFLOP).

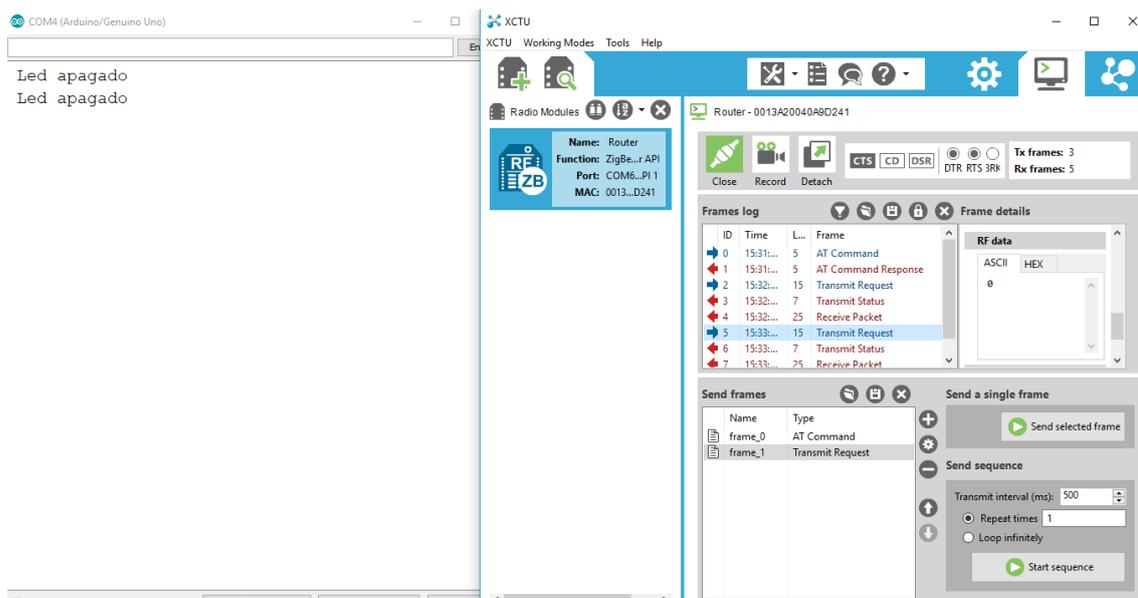
Abrindo a serial do Arduino e a tela do Console do X-CTU é possível analisar a comunicação dos módulos. Observa-se que ao enviar o bit 1 a partir do roteador pelo X-CTU, o coordenador, conectado ao Arduino, recebe este bit e acende o Led, respondendo para o roteador que o Led está aceso. A resposta do roteador aparece tanto na tela serial do arduino, quanto na tela do X-CTU. Alternou-se o bit enviado pelo roteador para 0, em seguida, o coordenador atualizou o estado do Led informando ao roteador que este foi desligado.

Figura 42 - Comunicação entre roteador conectado na X-CTU e coordenador conectado ao Arduino.



Em seguida, alterou-se o modo de operação do roteador para API, mantendo o coordenador em modo AT. Criou-se um *frame* do tipo *Transmit Request* contendo a informação 0 no campo de dados. Observou-se que o arduino reconheceu a informação, e apagou o Led, de acordo com a Figura 43.

Figura 43 - Coordenador conectado ao Arduino em modo AT e roteador em modo API conectado a X-CTU.



A mensagem enviada do coordenador para o roteador foi recebida na X-CTU no formato API. Dentro do campo RF Data obteve-se a resposta enviada pelo coordenador, de acordo com a Figura 44.

Figura 44 - Resposta do coordenador recebida pelo roteador.

ID	Time	Length	Frame
0	15:31:35.161	5	AT Command
1	15:31:35.233	5	AT Command Response
2	15:32:01.304	15	Transmit Request
3	15:32:01.386	7	Transmit Status
4	15:32:01.438	25	Receive Packet
5	15:33:02.964	15	Transmit Request
6	15:33:03.056	7	Transmit Status
7	15:33:03.107	25	Receive Packet

ASCII	HEX
Led apagado	
Checksum	
47	

4.3.2 Comunicação API usando Arduino

O Xbee configurado como coordenador operando em modo API foi conectado ao arduino. O roteador, configurado para operar em modo AT foi conectado serialmente através do XCTU.

A conexão entre Arduino e Xbee foi feita através do adaptador Xbee Explorer conectando os pinos 5V e GND do adaptador diretamente na alimentação do Arduino. Deve-se atentar caso não seja utilizado o adaptador, a alimentação do Xbee deve ser feita através do pino de 3,3V do Arduino. Além disso, os pinos Rx e Tx do adaptador foram conectados nos pinos Rx e Tx (0 e 1) do Arduino, respectivamente. Nessa configuração, para fazer o *upload* de um programa para o microcontrolador, as portas Rx e Tx do Xbee não podem estar conectadas no Arduino, pois isso impede a comunicação do microcontrolador com o computador. Assim, só após o upload do programa pode-se conectar os jumpers descritos e haverá comunicação entre o Xbee e o computador.

Dentro do *void setup()* deve-se realizar a inicialização da porta Serial através do comando `Serial.begin()`, onde dentro dos parênteses deve ser informado a taxa de transmissão do Xbee utilizado. Os dispositivos já vêm configurados com uma taxa de transmissão de 9600, entretanto, essa taxa pode ser alterada através do software XCTU conforme necessidades de projeto.

No *void loop()* foi criado um frame definido pela função `setRemoteState()` que é enviado a cada 5000ms. O frame criado tem um identificador do tipo Transmit Request (0x10). No campo de identificação do receptor foi adicionado o MAC Address do roteador (13 A2 00 40 A9 D2 41). O conteúdo do pacote foi o texto "Oi router." que em

hexadecimal correspondem à 4F 69 20 72 6F 75 74 65 72 2E. O frame termina com o *checksum* que corresponde a soma de todos os bits enviados a partir do comprimento do pacote.

```
1 void setup() {
2     Serial.begin(9600);
3
4 }
5
6 void loop() {
7     FrameAPI();
8     delay(5000)
9 }
10
11 void FrameAPI(){
12     Serial.write(0x7E); //Start byte
13     Serial.write((byte)0x0); //high part of length(always zero)
14     Serial.write(0x18); //low part of length (the number of bytes that follow,
15     not including checksum
16     Serial.write(0x10); //Frame type: Transmit Request
17     Serial.write(0x01);
18     Serial.write((byte)0x0); //ID of recipient
19     Serial.write(0x13);
20     Serial.write(0xA2);
21     Serial.write((byte)0x0);
22     Serial.write(0x40);
23     Serial.write(0xA9);
24     Serial.write(0xD2);
25     Serial.write(0x41);
26     Serial.write(0xFF); //16 bit of recipient or 0xFFFE if unknow
27     Serial.write(0xFE);
28     Serial.write((byte)0x0);
29     Serial.write((byte)0x0);
30     Serial.write(0x4F); //O
31     Serial.write(0x69); //i
32     Serial.write(0x20); //
33     Serial.write(0x72); //r
34     Serial.write(0x6F); //o
35     Serial.write(0x75); //u
36     Serial.write(0x74); //t
37     Serial.write(0x65); //e
38     Serial.write(0x72); //r
39     Serial.write(0x2E); //.
40     long sum = 0x10 + 0x01 + 0x13 + 0xA2 + 0x40 + 0xA9 + 0xD2 + 0x41 +
```

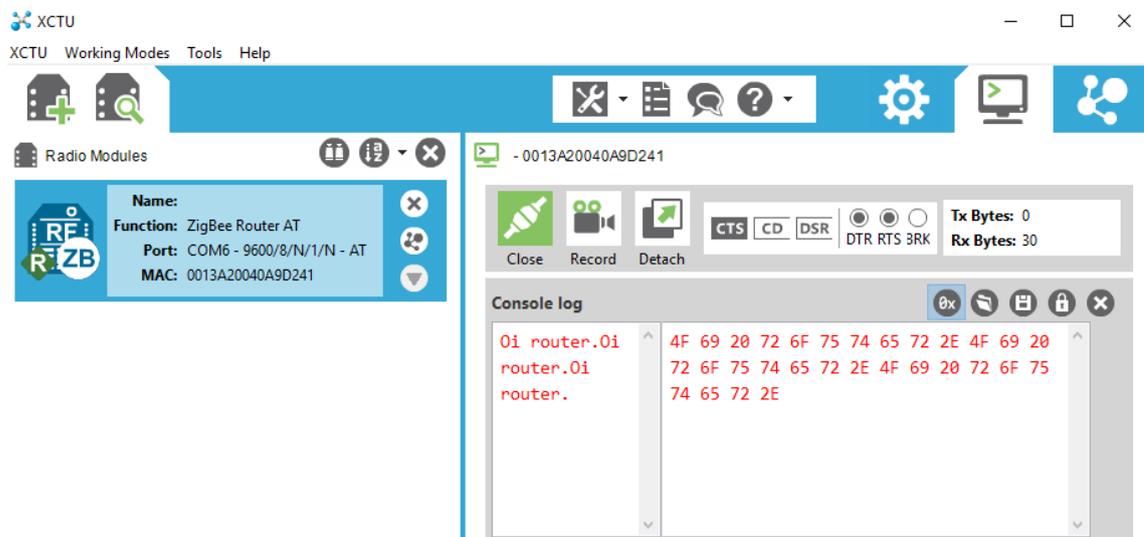
```

41         0xFF + 0xFE + 0x4F + 0x69 + 0x20 + 0x72 + 0x6F + 0x75 + 0x74 +
42         0x65 + 0x72 + 0x2E;
43         Serial.write(0xFF-(sum&0xFF)); //checksum
44     }

```

O roteador, conectado à XCTU, deve estar na tela do *Console Log* com a conexão fechada. Assim, ele receberá os dados do Frame enviado pelo coordenador a cada 5000ms conforme a Figura 45.

Figura 45 - Resposta obtida pelo roteador conectado ao XCTU.

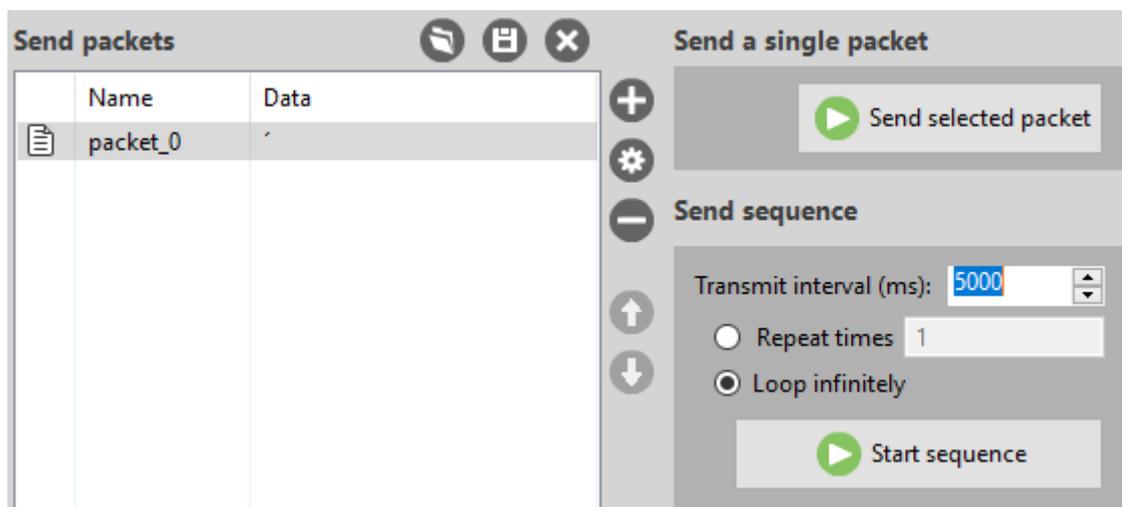


4.3.3 RSSI com Arduino

Para obter a intensidade de sinal utilizada na transmissão de um pacote usando o Arduino, pode-se enviar um frame ATDB, explicado no tópico 4.2.1. Dessa forma, na linha 66 do código abaixo, foi criada uma função *enviaATDB* contendo um frame do tipo 0x17 (*Remote AT Command Request*) com um *AT Command* "db". O endereço de destino utilizado corresponde ao *Mac Address* do dispositivo móvel (00 13 A2 00 40 A9 D2 41) conectado à XCTU.

O Xbee conectado ao Arduino foi configurado para operar como um roteador em modo API e o Xbee conectado à XCTU foi configurado como um roteador em modo AT com seu *Destination Address High* (DH) e *Destinations Address Low* (DL) contendo o *Mac Address* do roteador conectado ao Arduino. No modo Console da XCTU, criou-se um frame AT contendo o hexadecimal 0xB4 a ser enviado em *Loop Infinitely* a cada 5000ms, conforme apresentado na Figura 46.

Figura 46 - Enviando um frame em Loop Infinitely no XCTU.



O código que roda no Arduino para obtenção da intensidade de sinal, através do comando DB, está apresentado a seguir. Nesse código, cada vez que o byte 0xB4 é lido pela Serial, ativa-se a *flag* que inicia o pedido da intensidade de sinal referente ao dispositivo móvel conectado à XCTU. Assim, primeiramente envia-se o frame contendo o AT Command DB e em seguida, aguarda-se o recebimento do *byte* 0x7E, que indica o início do *frame Remote Command Response*, linha 27.

Como espera-se receber um frame com 19 *bytes*, foi criado um laço *for*, linha 31, que armazena todas as leituras feitas pela Serial no vetor “*rssi[x]*”, exceto leituras com valor 0xFFFFFFFF que correspondem à leituras inválidas. O *byte* que contém o valor de intensidade medido se encontra na posição 18 do *frame*, então esse valor é salvo numa variável chamada “*memoria[i]*”. Dentro dessa variável serão armazenados 10 valores de intensidade de sinal correspondentes às 10 interações do laço *for* da linha 25.

Como forma de análise das intensidades de sinal, optou-se por utilizar a moda, escolhendo o valor que mais se repete durante as 10 amostras obtidas. Para isso, criou-se um vetor *comparador[255]* de tamanho correspondente ao maior valor de RSSI que pode ser obtido (0xFF), que em decimal corresponde à 255. Assim, na linha 44, a posição do vetor *comparador* correspondente ao valor de intensidade de sinal, obtido na amostra atual e em decimal, é incrementada 1 unidade. A posição do vetor *comparador* que tiver o maior valor (mais vezes incrementado) corresponde ao valor de RSSI mais frequente durante o período de análise.

```

1 //Código para o Router!
2
3 int envio = 0;
4 int incomingByte = 0;
5 int flag=0;
6 int rssi[26];
7 int memoria[10];
8 int leitura = 0;
9
10 void setup() {
11     Serial.begin(9600);
12 }
13
14 void loop() {
15
16     if (flag==0) {
17         incomingByte = Serial.read();
18         if (incomingByte == 0xB4 ) {
19             Serial.println("Recebeu 0xB4");
20             flag=1;
21         }
22     }
23     if(flag==1){
24         int comparador[255] = {0};
25         for (int j=0; j<11; j++){
26             enviaATDB();
27             while(Serial.read() != 0x7E);
28             rssi[0] = 0x7E;
29             Serial.println();
30             Serial.println("Rssi[0]:0x7E");
31             for (int x=0; x<19; x++){
32                 leitura = Serial.read();
33                 while(leitura == 0xFFFFFFFF){
34                     leitura = Serial.read();
35                 }
36
37                 rssi[x+1] = leitura;
38                 Serial.print("Rssi[");
39                 Serial.print(x+1);
40                 Serial.print("]:");
41                 Serial.println(rssi[x+1], HEX);
42             }
43             memoria[j] = rssi[18];
44             comparador[rssi[18]]++;

```

```

45     Serial.print("Memoria[");
46     Serial.print(j);
47     Serial.print("]:");
48     Serial.println(memoria[j], HEX);
49     if(j == 10){
50         flag=0;
51         int maior = -1;
52         int moda = 0;
53         for (int c =0; c<255; c++){
54             if(comparador[c] > maior){
55                 maior = comparador[c];
56                 moda = c;
57             }
58         }
59         Serial.print("RSSI (-dBm) = ");
60         Serial.println(moda);
61     }
62 }
63 }
64 }
65
66 void enviaATDB(){
67     Serial.write(0x7E);
68     Serial.write((byte)0x0);
69     Serial.write(0x0F);
70     Serial.write(0x17);
71     Serial.write(0x01);
72     Serial.write((byte)0x0);
73     Serial.write(0x13);
74     Serial.write(0xA2);
75     Serial.write((byte)0x0);
76     Serial.write(0x40);
77     Serial.write(0xA9);
78     Serial.write(0xD2);
79     Serial.write(0x41);
80     Serial.write(0xFF);
81     Serial.write(0xFE);
82     Serial.write(0x02);
83     Serial.write(0x64);
84     Serial.write(0x62);
85     long sum = 0x17 + 0x01 + 0x13 + 0xA2 + 0x40 + 0xA9 + 0xD2 + 0x41 + 0xFF
      + 0xFE + 0x02 + 0x64 + 0x62;
86     Serial.write(0xFF-(sum&0xFF));
87 }

```

A cada iteração do laço *for* da linha 25 um pacote idêntico ao apresentado na Figura 47 é obtido, contendo a intensidade de sinal na posição 18 do vetor `Rssi[]`. A captura de tela feita corresponde à última iteração do laço, preenchendo o último espaço do vetor memória com um RSSI de 0x21. Por fim, a moda do vetor memória é apresentada, em decimal, como -33dBm.

Figura 47 – *Frame Remote Command Response* contendo RSSI através do Arduino.

```
Rssi[0]:0x7E
Rssi[1]:0
Rssi[2]:10
Rssi[3]:97
Rssi[4]:1
Rssi[5]:0
Rssi[6]:13
Rssi[7]:A2
Rssi[8]:0
Rssi[9]:40
Rssi[10]:A9
Rssi[11]:D2
Rssi[12]:41
Rssi[13]:7
Rssi[14]:C1
Rssi[15]:64
Rssi[16]:62
Rssi[17]:0
Rssi[18]:21
Rssi[19]:7
Memoria[10]:21
RSSI (-dBm) = 33
```

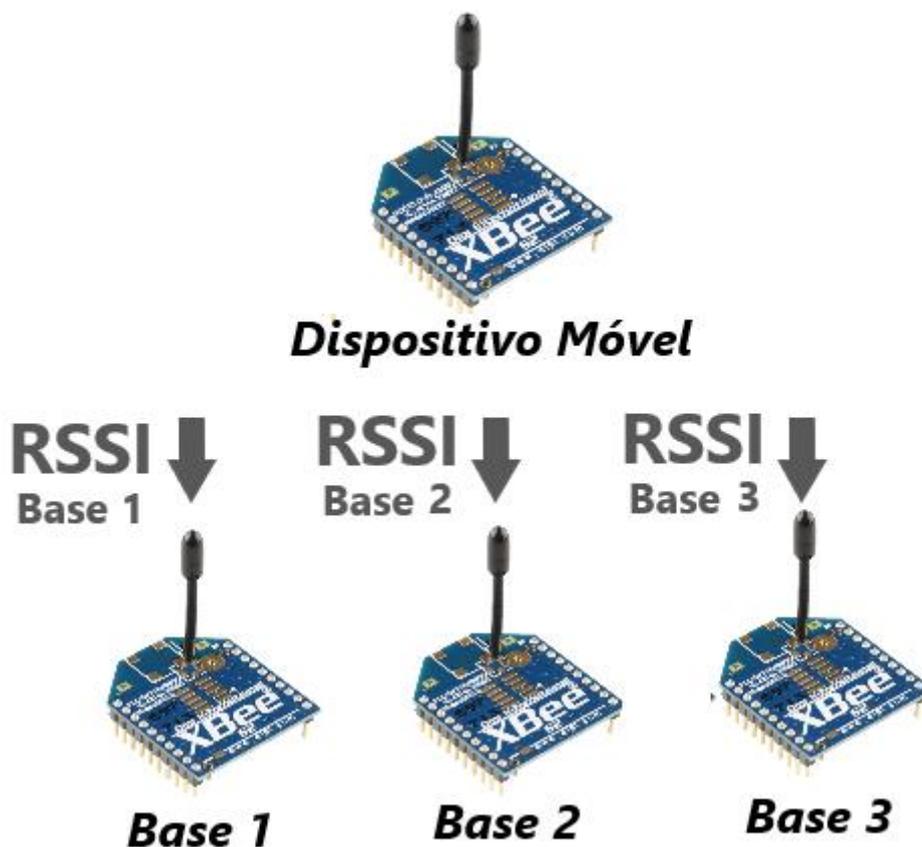
4.4 CONFIGURAÇÃO DA REDE DE SENSORES

Para criar um sistema de posicionamento *indoor* baseado no método *fingerprinting* foi criada uma rede de sensores que opera com através do protocolo ZigBee. A rede é composta por quatro Xbee's: a Base 1 é um Xbee *Series 2*

configurado como coordenador API; a Base 2 e 3 são compostas por um Xbee Series 2 PRO cada, e ambos operam como um roteador em modo API; um dispositivo móvel que utiliza um Xbee Series 2 operando como *End Device* em modo AT. Cada dispositivos da rede está conectado à um Arduino, que permite a coordenação da rede. Os Arduinos são alimentados por baterias de 9V, com exceção do coordenador que fica conectado à um computador possibilitando a análise das informações coletadas durante o processo, através da conexão Serial da IDE do Arduino.

Na rede formada, o coordenador é responsável por gerenciar a trama e armazenar as informações coletadas durante o processo de requisição de intensidade de sinal pelas bases. Cada base tem como função obter a intensidade de sinal que o móvel necessita para o envio de um pacote até a mesma. O móvel é responsável por iniciar a trama e responder aos pedidos das bases, conforme apresentado na Figura 48.

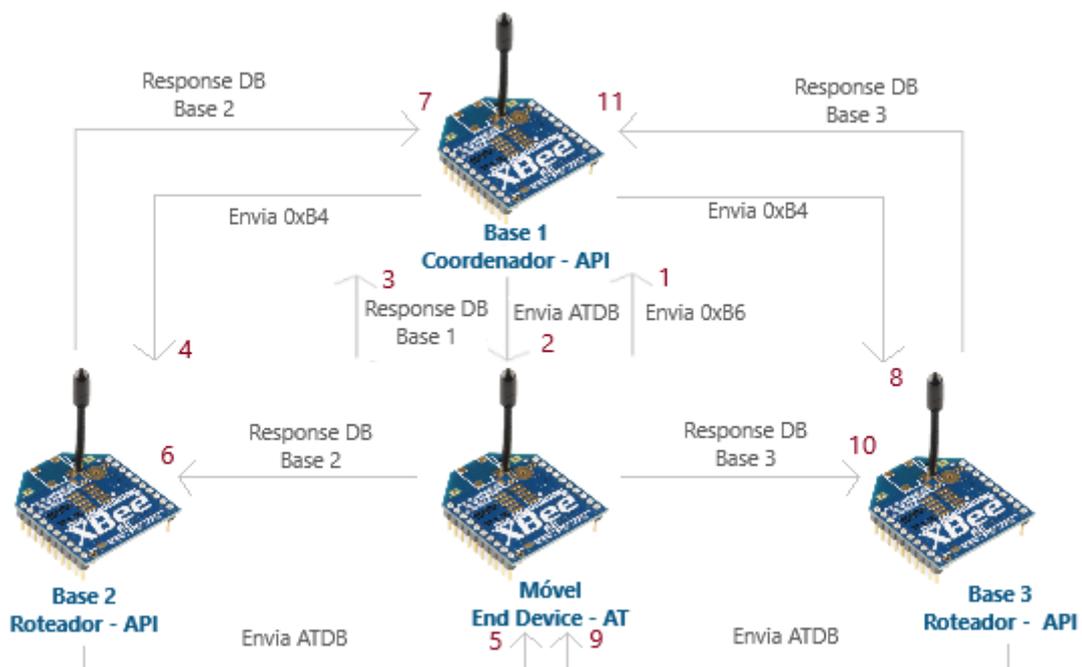
Figura 48 - Composição da rede de sensores.



A aquisição da intensidade de sinal entre os dispositivos se inicia toda vez que o dispositivo móvel envia um *frame* contendo o byte 0xB6 para o coordenador. Após

receber a solicitação, o coordenador mede a intensidade de sinal necessária para o móvel enviar um pacote para a Base 1 através do comando “DB”, explicado no item 4.2.1 Em seguida, o coordenador envia um frame contendo o byte 0xB4 para a Base 2, indicando que esta deve iniciar o pedido de RSSI para o móvel. O mesmo processo de pedido de intensidade de sinal feito pela Base 1, é repetido na Base 2. Por fim, obtém-se por fim o RSSI do móvel em relação à Base 2, que é enviado para o coordenador e salvo. Em seguida, o coordenador envia um frame com o byte 0xB4 para a Base 3, que repete o processo de pedido de intensidade de sinal do móvel e por fim, retorna o valor obtido para o coordenador. O processo descrito está esquematizado na Figura 49, a numeração em cor bordô indica a sequência em que ocorrem as interações.

Figura 49 - Arquitetura da rede de sensores ZigBee.

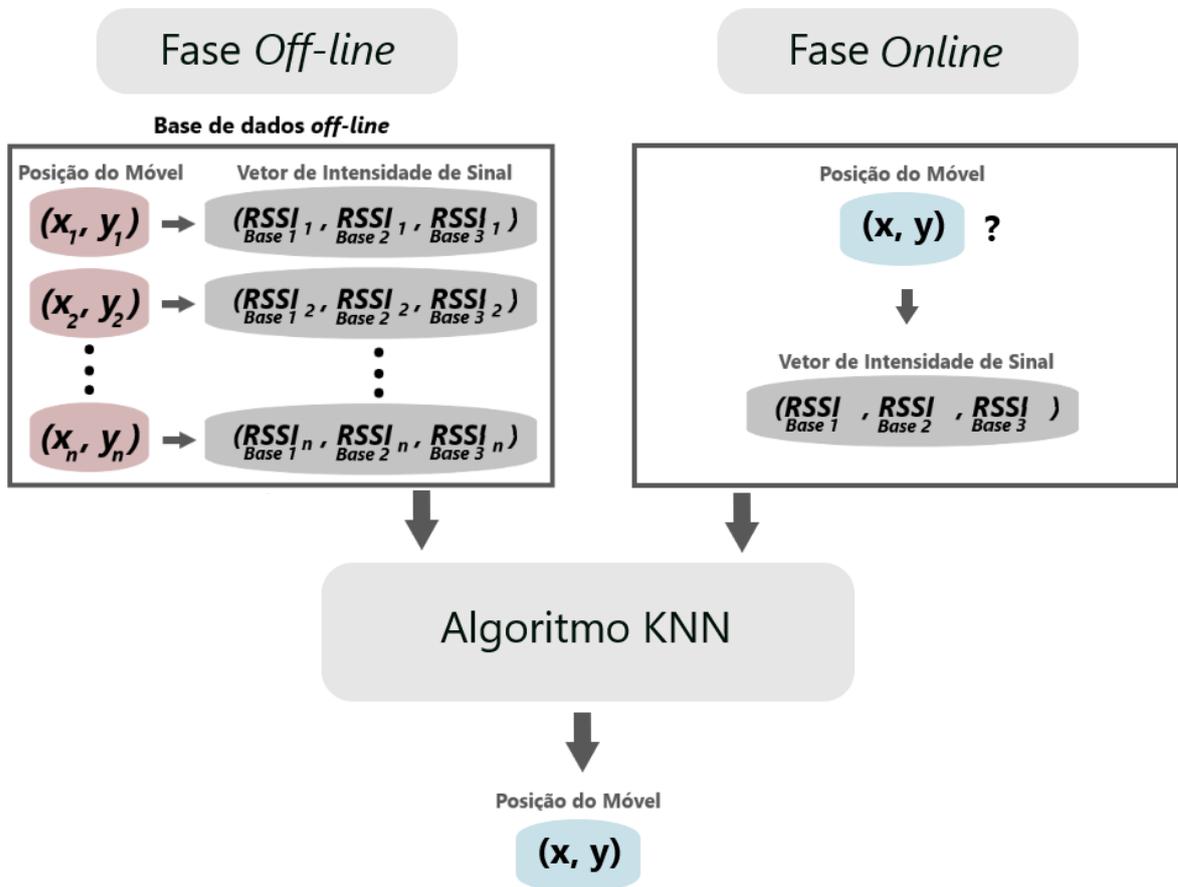


A potência de sinal medido entre o móvel e as bases, através da rede de sensores, é armazenado em um banco de dados, caracterizado pela fase *off-line* do método de localização *fingerprinting*. Cada posição do ambiente medido possui um vetor de intensidade associado. O tamanho do vetor de intensidade de sinal é igual a quantidade de pontos de referência que compõem o ambiente.

Na fase *online*, obtém-se um vetor de intensidade de sinal que caracteriza a posição do móvel. As informações obtidas são processadas através do algoritmo

KNN. A Figura 50 descreve o método *fingerprinting* utilizado na execução deste trabalho.

Figura 50 – Descrição do método de *fingerprinting*.



Os vetores de intensidade de sinal da fase *off-line* são comparados com o vetor de intensidade da fase *online* a partir da equação da distância Euclidiana, conforme apresentado na Figura 51. A posição do mapa com menor distância Euclidiana é classificada como mais próxima da atual posição do móvel.

Figura 51- Aplicação do algoritmo KNN.

$$(x_1, y_1) \rightarrow d_1 = \sqrt{(RSSI1_{Base1(off)} - RSSI_{Base1(on)})^2 + (RSSI1_{Base2(off)} - RSSI_{Base2(on)})^2 + (RSSI1_{Base3(off)} - RSSI_{Base3(on)})^2}$$

$$(x_2, y_2) \rightarrow d_2 = \sqrt{(RSSI2_{Base1(off)} - RSSI_{Base1(on)})^2 + (RSSI2_{Base2(off)} - RSSI_{Base2(on)})^2 + (RSSI2_{Base3(off)} - RSSI_{Base3(on)})^2}$$

⋮

$$(x_n, y_n) \rightarrow d_n = \sqrt{(RSSIn_{Base1(off)} - RSSI_{Base1(on)})^2 + (RSSIn_{Base2(off)} - RSSI_{Base2(on)})^2 + (RSSIn_{Base3(off)} - RSSI_{Base3(on)})^2}$$



Posição do Móvel

$$(x, y) = \text{mín} (d_1 , d_2 , d_n)$$

5 TESTES E RESULTADOS

Com a rede de sensores, criada no Capítulo 4, foram realizados testes relacionados ao comportamento da intensidade de sinal dos módulos, apresentados na seção 5.1 deste capítulo.

Os resultados do sistema de posicionamento *indoor*, implementado com uma rede de sensores baseadas no protocolo de comunicação ZigBee, está apresentado na seção 5.2. A rede de sensores e o método de *fingerprinting* foram testados em dois cenários diferentes: o cenário 1 é menor e foram utilizados 2 pontos de referência para as medidas; e o cenário 2 onde utilizou-se 3 pontos de referências.

5.1 ANÁLISE DOS MÓDULOS XBEE

5.1.1 Comparação entre Xbee s2 e Xbee s2 PRO

Analisou-se a alteração dos valores de intensidade de sinal medidos, em relação à uma base Xbee s2 e outra base Xbee s2 PRO, utilizando primeiramente o dispositivo móvel com um modelo Xbee s2, e em seguida alterando para um Xbee s2 PRO.

Através da Tabela 7 é possível observar que dispositivos modelo Xbee Series 2 variam mais a intensidade de sinal para pequenas distâncias. Já com Xbee Series s2 PRO, foi observado que para a distância analisada, a intensidade de sinal variou pouco, o que prejudica o sistema de posicionamento *indoor* visto que esse é baseado na variação do RSSI. Os dispositivos Series s2 PRO possui um alcance maior logo, recomenda-se seu uso para ambientes onde a distância entre as medidas sejam maiores.

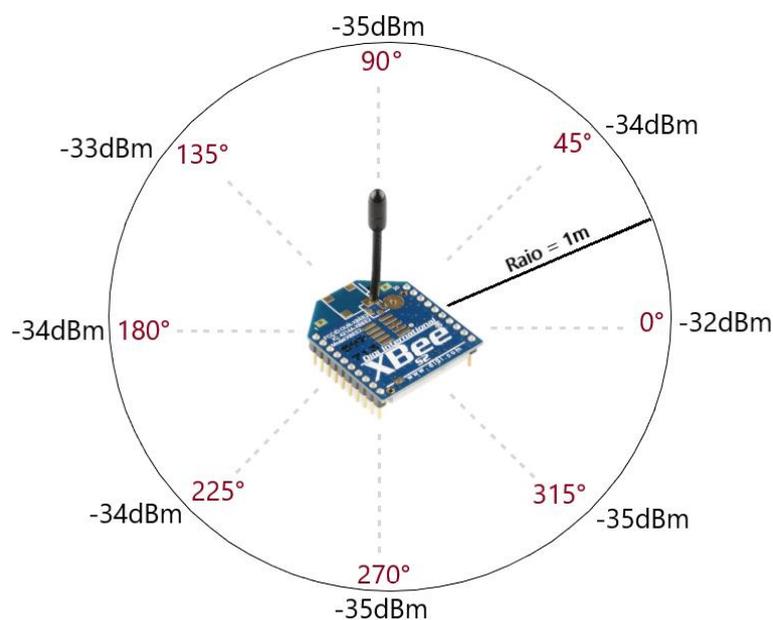
Tabela 7 - Comparação entre Xbee s2 e Xbee s2 PRO

Distância (m)	Móvel Xbee s2 PRO		Móvel Xbee s2	
	Base s2 (-dBm)	Base s2 PRO (-dBm)	Base s2 (-dBm)	Base s2 PRO (-dBm)
0,5	42	42	32	26
1	43	43	34	27
1,5	44	44	40	28
2	45	45	39	29
2,5	50	50	40	28
3	51	51	44	29
3,5	40	40	42	29
4	42	42	52	40

5.1.2 Antena Isotrópica

Para analisar a variação da intensidade de sinal ao redor de um Xbee s2 criou-se uma circunferência de raio equivalente a 1 metro e mediu-se a intensidade de sinal entre a base e um dispositivo móvel. A posição do móvel foi variada ao redor da circunferência a cada 45°. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 52. Observa-se que mesmo mantendo a distância entre a base e o móvel constante as medidas variam: entre -32dBm e -35dBm.

Figura 52 - Teste da antena do dispositivo.



5.2 SISTEMA DE POSICIONAMENTO INDOOR

5.2.1 Cenário de Testes 1

5.2.1.1 Fase Off-line

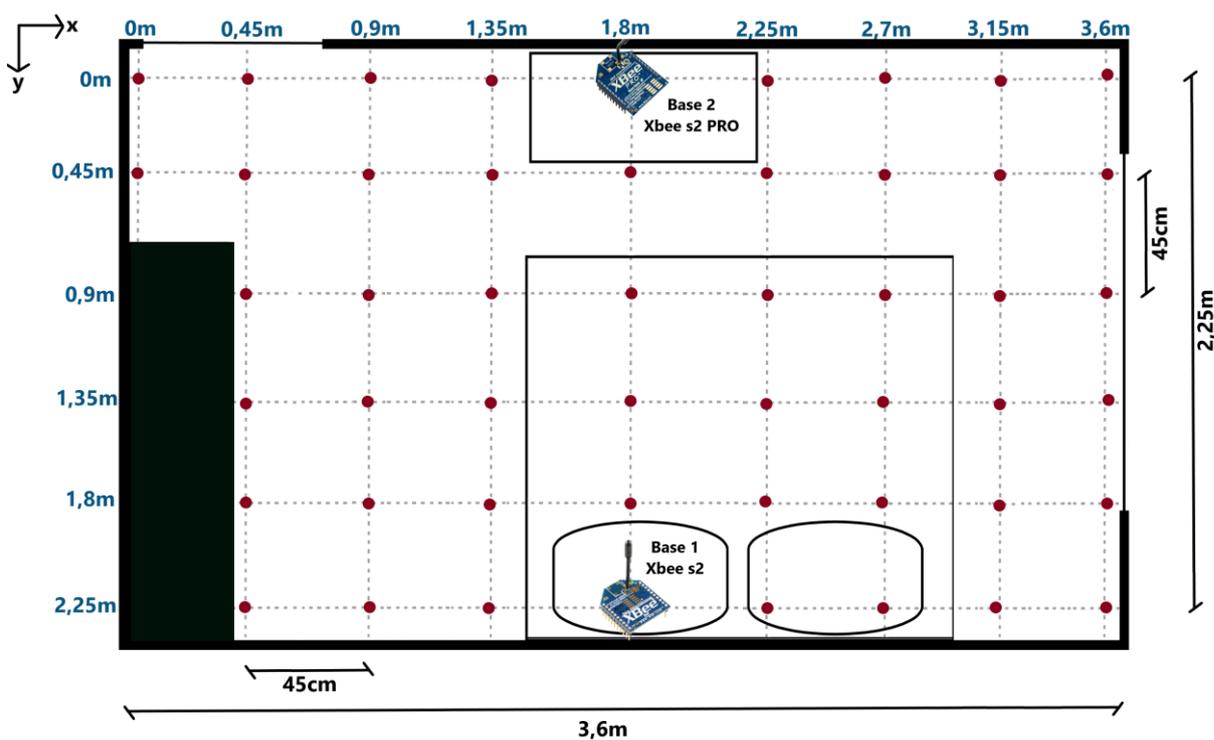
O cenário de testes 1 escolhido para a análise foi um quarto de 3,6x2,25 alterando a posição do móvel a cada 45cm. A posição escolhida para as bases, bem como o modelo dos dispositivos, está apresentado na Tabela 8. As duas bases, um coordenador e um roteador, operam em modo API e o móvel foi configurado como um dispositivo final (*End Device*) em modo AT.

Tabela 8 - Posição das bases.

		x	y
Coordenador (Xbee s2)	Base 1	2,25m	3m
Roteador (Xbee s2 PRO)	Base 2	2,25m	0m

A característica do ambiente medido está ilustrada na Figura 53. Para as medidas, foi utilizada a mesma altura para as bases e o móvel durante todo o processo de mapeamento do ambiente. Os pontos bordô da Figura 53 indicam as posições do móvel em que foi requisitado o pedido de RSSI.

Figura 53 - Posição das bases e pontos medidos no cenário de testes 1.



As medidas descritas anteriormente geraram dois mapas de intensidade de sinal, um em relação à base 1, Tabela 9, e outro em relação à base 2, Tabela 10. Para facilitar a análise, gerou-se um diagrama cromatográfico de intensidades, onde a cor vermelha indica o maior valor de intensidade de sinal (menos negativo) e o verde representa valores menores e conseqüentemente mais distantes da base.

Tabela 9 - Base de dados cromatográfica da intensidade de sinal do móvel em relação à Base 1.

BASE 1 (-dBm)									
x/y (m)	0	0,45	0,9	1,35	1,8	2,25	2,7	3,15	3,6
0	53	47	50	46	46	39	40	50	45
0,45	52	56	47	40	45	40	42	40	49
0,9		34	42	41	43	34	37	44	40
1,35		37	36	34	36	35	34	33	52
1,8		38	37	30	30	32	35	36	33
2,25		34	34	31	28	30	32	32	33

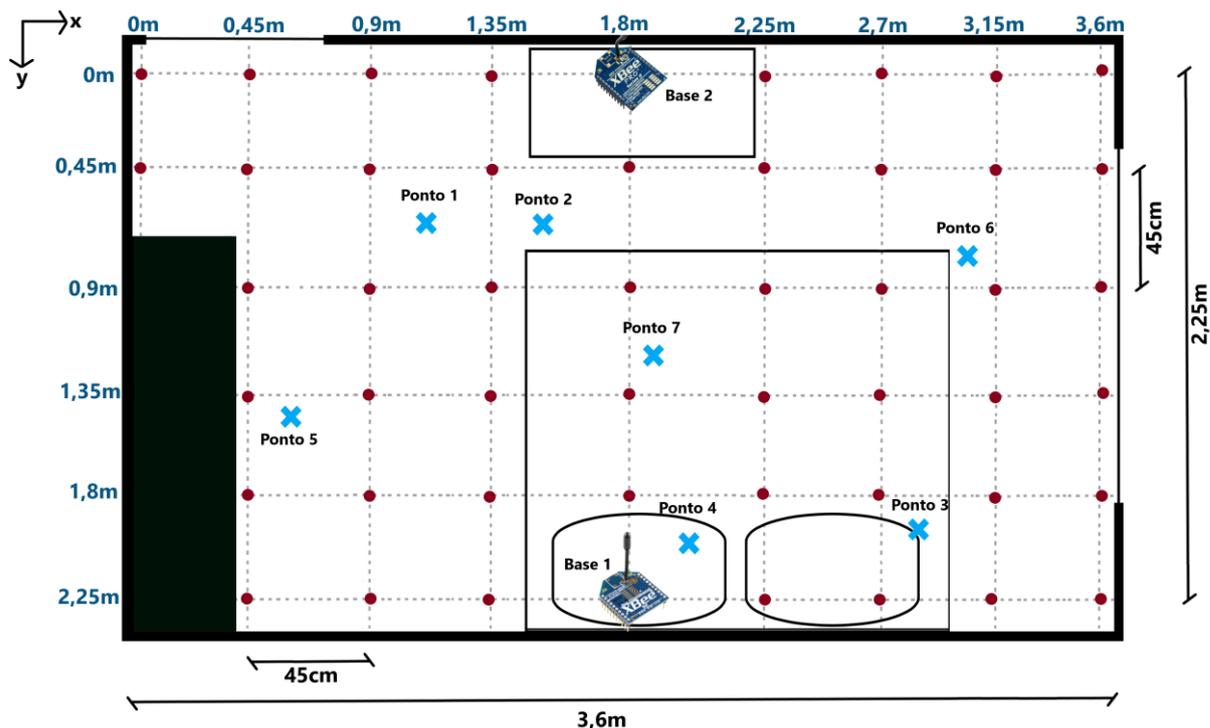
Tabela 10 - Base de dados cromatográfica da intensidade de sinal do móvel em relação à Base 2.

BASE 2 (-dBm)									
x/y (m)	0	0,45	0,9	1,35	1,8	2,25	2,7	3,15	3,6
0	28	29	29	29	26	26	27	28	28
0,45	31	30	28	30	28	27	30	29	30
0,9		30	31	28	29	28	30	30	33
1,35		40	40	29	29	28	30	38	41
1,8		32	30	30	33	29	30	34	33
2,25		44	35	36	30	31	30	32	31

5.2.1.2 Fase Online

Após a obtenção do banco de dados, durante a fase *off-line*, é possível testar o sistema de posicionamento *indoor*. Mediu-se o valor da intensidade de sinal de transmissão de um pacote pelo móvel em posições do ambiente, diferentes dos estipulados durante a fase *off-line*, conforme os pontos demarcados com um “x” azul na Figura 54.

Figura 54 - Pontos medidos durante a Fase Online no cenário de testes 1.



As intensidades de sinal obtidas durante a fase online estão apresentadas na Tabela 11. Na posição (1,9, 2) do mapa, ponto 7, por exemplo, mediu-se a intensidade de sinal -36dBm em relação à base 1 e -29dBm em relação à base 2, resultado no vetor de intensidades de sinal equivalente a (-36,-29).

Tabela 11 - RSSI medidos durante a fase online.

Pontos de medidas da Fase Online							
Ponto	1	2	3	4	5	6	7
x (m)	1,2	1,4	3	1,9	0,6	3,1	1,9
y (m)	0,6	0,6	2	2	1,4	0,8	1,2
Base 1 (-dBm)	40	40	37	31	37	44	36
Base 2 (-dBm)	31	29	35	32	39	31	29

O valor obtido durante a fase *online* foi comparado com as *fingerprintings* armazenadas através do algoritmo KNN. Assim, na posição (0,0) do mapa da fase *off-line*, a *fingerprinting* de intensidade de sinal armazenada é (-53,-28). Calculando a distância euclidiana entre as medidas da fase *online* e os resultados armazenados no banco de dados, obtém-se uma distância igual a 17,029, de acordo com a equação a seguir. O mesmo cálculo foi feito percorrendo todas as *fingerprintings* da fase *off-line*.

$$d_{(0,0)} = \sqrt{(-53 - (-36))^2 + (-28 - (-29))^2} = 17,029 \quad [12]$$

Na Tabela 12 está a representação cromatográfica das possíveis localizações do móvel. Os resultados mais próximos de zero indicam que há maior proximidade com a *fingerprinting* armazenada no banco de dados, logo o móvel deve estar nas proximidades. A *fingerprinting* mais próxima da posição do móvel está colorida (rosa claro) nos eixos das tabelas. O menor valor obtido após os cálculos está indicado na cor branca.

Observa-se que na posição (1,8 , 1,35) a distância euclidiana resultou em zero, logo os valores armazenados na base de dados *off-line* coincidiram exatamente com os valores medidos fase *online*. O móvel estava localizado na posição (1,9 , 1,2), logo a *fingerprinting* mais próxima dessa posição é (1,8 , 1,35). Assim, considera-se que o sistema de posicionamento localizou a *fingerprinting* mais próxima da real posição do móvel corretamente.

Tabela 12 - Representação cromatográfica da posição do móvel referente ao ponto 7.

Móvel na posição: x = 1,9m e y = 1,2m									
x/y (m)	0	0,45	0,9	1,35	1,8	2,25	2,7	3,15	3,6
0	17,0	11,0	14,0	10,0	10,4	4,2	4,5	14,0	9,1
0,45	16,1	20,0	11,0	4,1	9,1	4,5	6,1	4,0	13,0
0,9		2,2	6,3	5,1	7,0	2,2	1,4	8,1	5,7
1,35		11,0	11,0	2,0	0,0	1,4	2,2	9,5	20,0
1,8		3,6	1,4	6,1	7,2	4,0	1,4	5,0	5,0
2,25		15,1	6,3	8,6	8,1	6,3	4,1	5,0	3,6

A representação cromatográfica para as demais realizadas durante a fase online estão apresentadas no Anexo 1. Dentre os sete pontos medidos durante a fase *online*, em cinco deles o método utilizado localizou corretamente a *fingerprinting* mais próxima da posição do móvel.

Como a intensidade de sinal em relação à base 2, em diversos pontos do mapa, possui o mesmo valor, durante cálculo da distância euclidiana para ponto 4 observa-se que há redundância nos valores, resultando numa posição errônea, conforme a Tabela 13. Vários pontos do mapa indicaram proximidade com móvel, inclusive a posição real do móvel. Entretanto a posição com a menor distância euclidiana não condiz com a posição real do móvel. O erro entre a posição com menor distância euclidiana e a posição real do móvel é de 1,25m.

Tabela 13 - Representação cromatográfica da posição do móvel referente ao ponto 4.

Móvel na posição: x = 1,9m e y = 2m									
x/y (m)	0	0,45	0,9	1,35	1,8	2,25	2,7	3,15	3,6
0	22,4	16,3	19,2	15,3	16,2	10,0	10,3	19,4	14,6
0,45	21,0	25,1	16,5	9,2	14,6	10,3	11,2	9,5	18,1
0,9		3,6	11,0	10,8	12,4	5,0	6,3	13,2	9,1
1,35		10,0	9,4	4,2	5,8	5,7	3,6	6,3	22,8
1,8		7,0	6,3	2,2	1,4	3,2	4,5	5,4	2,2
2,25		12,4	4,2	4,0	3,6	1,4	2,2	1,0	2,2

5.2.2 Cenário de testes 2

5.2.2.1 Fase Off-line

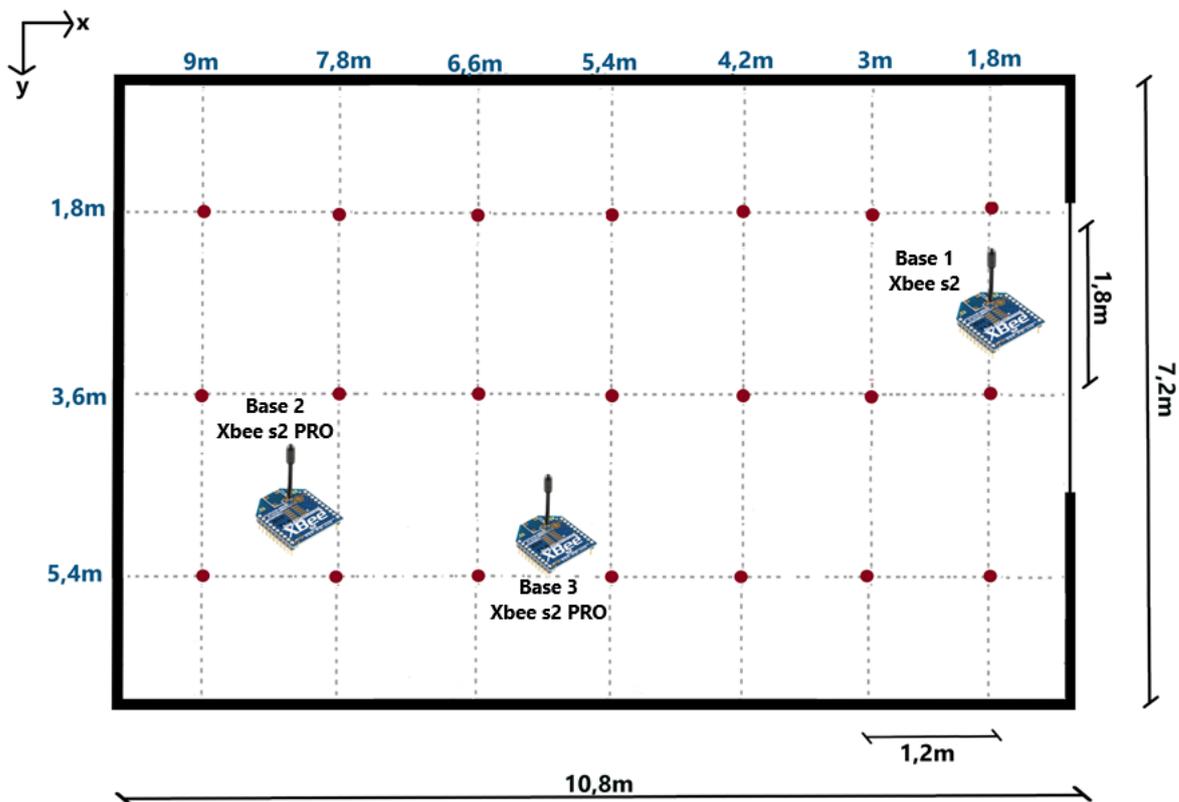
O cenário de testes 2 escolhido é uma sala de aula de 7,2x10,8m. A posição escolhida para as bases, bem como o modelo dos dispositivos, está apresentado na Tabela 14. As três bases, um coordenador e dois roteador, operam em modo API e o móvel foi configurado como um dispositivo final (*End Device*) em modo AT.

Tabela 14 - Posição das bases.

		x	y
Coordenador (Xbee s2)	Base 1	1,8m	3m
Roteador (Xbee s2 PRO)	Base 2	8,1m	4,8m
Roteador (Xbee s2 PRO)	Base 3	6,3m	5,1m

A descrição do ambiente medido está ilustrada na Figura 55. Para as medidas, usou-se a mesma altura para as bases e o móvel durante todo o processo de mapeamento do ambiente. Os pontos bordô da Figura 55 indicam as posições do móvel em que foi requisitado o pedido de RSSI.

Figura 55- Pontos medidos durante a Fase Online no cenário de testes 1.



As medidas descritas anteriormente, geraram três mapas de intensidade de sinal, um em relação à cada base, apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Representação cromatográfica da base de dados.

BASE 1 (-dBm)				BASE 2 (-dBm)				BASE 3 (-dBm)			
0	1,8	3,6	5,4	0	1,8	3,6	5,4	0	1,8	3,6	5,4
1,8	43	29	31	1,8	39	42	49	1,8	46	30	31
3	37	30	44	3	38	46	44	3	37	30	29
4,2	38	31	58	4,2	34	32	58	4,2	39	31	28
5,4	33	28	55	5,4	40	31	55	5,4	33	29	27
6,6	45	34	47	6,6	29	29	46	6,6	34	34	29
7,8	51	42	54	7,8	29	28	40	7,8	34	43	30
9	52	38	52	9	30	28	37	9	32	39	34

5.2.2.2 Fase Online

O valor da intensidade de sinal de transmissão de um pacote pelo móvel foi medido em posições do ambiente diferentes dos estipulados durante a fase off-line, conforme os pontos demarcados com um “x” azul na Figura 56 e descritos na Tabela 16.

Figura 56 - Pontos medidos durante a Fase Online no cenário de testes 2.

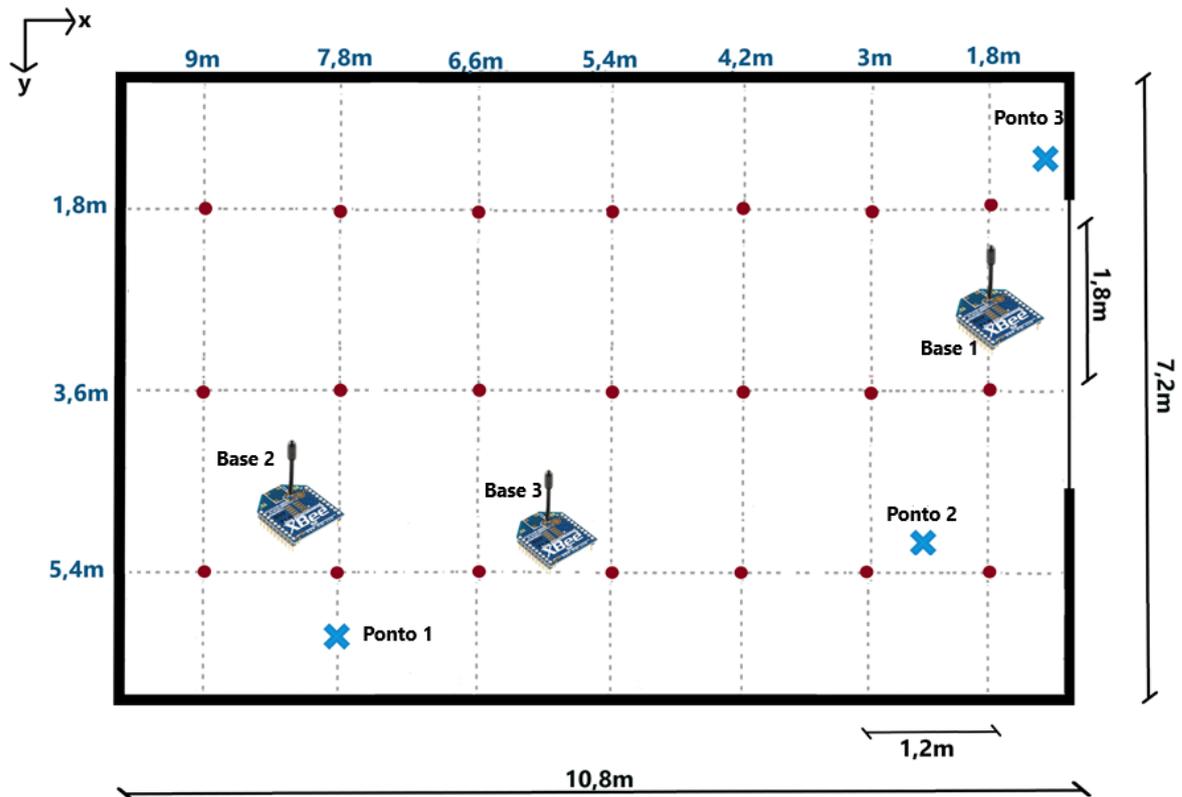


Tabela 16 - Pontos medidos durante a fase online.

Pontos de medidas da Fase Online			
Ponto	1	2	3
x (m)	7,6	2,4	0
y (m)	6	5,1	1,5
Base 1 (-dBm)	51	44	42
Base 2 (-dBm)	50	47	38
Base 3 (-dBm)	34	37	47

O mesmo cálculo realizado no cenário 1 para estimar os K vizinhos mais próximos foi repetido no cenário 2, com o acréscimo de mais uma base. Na Tabela 17 estão representados os mapas cromatográficos após o cálculo da distância euclidiana. Os resultados mais próximos de zero indicam que há maior proximidade com a *fingerprinting* armazenada no banco de dados, logo o móvel deveria estar nas proximidades. Os números indicados pela cor branca representam a menor distância euclidiana medida dentro de cada mapa. Logo, considera-se que para o ponto 2 e 3, o sistema de posicionamento localizou a *fingerprinting* mais próxima da real posição do móvel corretamente.

Tabela 17 – Pontos em que a *fingerprinting* correspondente a posição do móvel foi encontrada corretamente.

Móvel Posição x = 5,1m e y = 2,4m							
x/y	1,8	3	4,2	5,4	6,6	7,8	9
1,8	12,1	11,4	14,5	13,6	18,3	19,5	19,4
3,6	17,3	15,7	20,7	24	20,8	20	20
5,4	14,5	8,5	19,9	16,9	8,6	14,1	39,2
Móvel Posição x = 0m e y = 1,5m							
x/y	1,8	3	4,2	5,4	6,6	7,8	9
1,8	1,7	11,2	9,8	16,8	16,1	18,2	19,7
3,6	21,8	22,3	20,3	23,9	17,7	10,8	13,4
5,4	22,3	19,1	31,9	29,3	20,3	20,9	48,1

Já no ponto 1, novamente vários pontos do mapa indicaram proximidade com móvel, inclusive a posição real do móvel, conforme apresentado na Tabela 18. Entretanto a posição com a menor distância euclidiana difere da posição real do móvel, apresentando um erro de 1 metro.

Tabela 18 - Ponto em que a *fingerprinting* correspondente à posição do móvel não foi encontrada corretamente.

Móvel Posição x = 7,6m y = 6m							
x/y	1,8	3	4,2	5,4	6,6	7,8	9
1,8	18,1	18,7	21,2	20,6	21,8	21	20,1
3,6	23,7	21,7	27,1	30,2	27	25,4	26
5,4	20,2	10,5	12,2	9,5	7,5	11,2	36,4

6 CONCLUSÃO

O objetivo fundamental deste trabalho foi a implementação de um sistema de posicionamento para ambientes fechados utilizando uma rede de sensores sem fios com baixo consumo, através do protocolo de comunicação Zigbee. A técnica de estimativa da localização adotada consiste na análise das *fingerprintings* de intensidade de sinal recebidas pelo móvel em relação a pontos de referências fixados em posições específicas do cenário analisado. Para inferir a posição do móvel foi implementado o algoritmo KNN, que compara as *fingerprintings* armazenadas com o valor de intensidade de sinal medido durante a fase *online*.

O sistema de posicionamento implementado foi testado em dois cenários diferentes: um quarto, de menor área, onde as medidas da fase *off-line* foram espaçadas de 45cm e em relação a dois pontos de referência; e uma sala de aula, com área maior, e medidas mais espaçadas, contendo três pontos de referências.

O primeiro cenário, composto por apenas 2 bases, teve uma taxa de acerto da *fingerprinting* mais próxima da posição do móvel equivalente a 71,43%. Já no cenário número 2, onde foram utilizados 3 bases, a taxa de acerto foi de 66,66%. Entretanto, no cenário 2, o erro entre a *fingerprinting* mais próxima do móvel e a *fingerprinting* indicada pelo método KNN resultou em 1 metro de distância, equivalente apenas ao espaçamento entre as medidas da fase *off-line*. Já no cenário 1, o erro de distância resultante é de 1,25 metros, que corresponde a quatro vezes o espaçamento entre as medidas da fase *off-line*.

Através das análises, observa-se que quanto maior o número de pontos de referências no cenário, menor a redundância entre as medidas de intensidade de sinal, e conseqüentemente, maior precisão pode ser alcançada. Além disso, quanto menor a distância entre as medidas da fase *off-line*, aumenta-se probabilidade de encontrar uma *fingerprinting* que seja o mais próxima possível da real posição do móvel.

A principal dificuldade encontrada está em compreender o comportamento do RSSI, devido a complexidade da construção das edificações, visto que obstáculos e reflexões internas interferem na intensidade recebida do sinal.

De modo geral, os objetivos iniciais do trabalho foram alcançados, porém ainda há muitos fatores que podem ser investigados. Assim, para trabalhos futuros, recomenda-se que todos os módulos utilizados sejam da mesma Serie, pois foi analisado que, em

dispositivos de modelos distintos, a variação da intensidade de sinal em função da distância é diferente, dificultando a análise.

Uma das análises feitas foi observando a variação da intensidade de sinal entre dispositivos Xbee s2 e Xbee s2 PRO. Foi constatado que o modelo Xbee Series 2 é mais indicado para ambientes menores, pois sua intensidade de sinal apresenta variações mais significativas a cada metro. Já com Xbee Series s2 PRO, foi observado que para a distância analisada, a intensidade de sinal variou pouco, o que prejudica o sistema de posicionamento indoor que é baseado na variação do RSSI. Assim, como esse dispositivo apresenta um alcance maior, recomenda-se seu uso para ambientes onde a distância entre as medidas sejam maiores.

A disposição das bases no ambiente pode ser um fator significativo para o sistema, logo pode-se analisar quais as melhores configurações e qual a distância ideal entre elas. Além disso, a análise de diversos cenários pode auxiliar na determinação das especificidades de cada tipo de ambiente e contribuir para que sejam criadas redes de sensores particulares para cada um deles, de forma a tornar o sistema de posicionamento mais eficiente.

Além disso, o grau de exatidão e precisão do método depende, principalmente, dos algoritmos de localização e da interferência de sinais eletromagnéticos. Assim, o desenvolvimento de novos algoritmos de localização pode tornar o sistema de localização mais eficientes, ou a utilização de outros algoritmos como por exemplo uso de uma rede neural artificial e o uso de memória de forma a prever a posição atual do móvel baseada na posição obtida na medida anterior.

7 BIBLIOGRAFIA

- [1] "LOST in Tracking" or why mobile GPS is inaccurate? **Nexgendesign**. Disponível em: <<http://www.nexgendesign.com/lost-in-tracking-mobile-gps>>. Acesso em: 27 out. 2018.
- [2] ABEL, J. Xbee-Arduino. **Jérôme Abel**. Disponível em: <http://jeromeabel.net/files/ressources/xbee-arduino/images/thumb_620x620/?C=N;O=D>. Acesso em: 17 nov. 2018.
- [3] AMORIM, A. I. M. D. **Sistema de navegação inercial aplicável a múltiplas plataformas**. Universidade do Minho. [S.l.], p. 92. 2012.
- [4] BARROSO, V. P. B. **Posicionamento colaborativo em redes Wi-Fi - Where@UM2**. Universidade do Minho. [S.l.], p. 119. 2015.
- [5] ÇETİN, G. **A Wireless Network Application for Vehicle Tracking in Campus Areas**. Mugla Journal of Science and Technology. [S.l.], p. 5. 2017.
- [6] COUTO, L. M. R. **Sistema de localização indoor com base no protocolo ZIGBEE**. ISEP - Instituto Superior de Engenharia do Porto. [S.l.], p. 135. 2013.
- [7] DIAS, N. W. **Introdução ao GPS**. UNITAU. Taubaté, p. Vídeo.
- [8] DIGI. Signal strength and the RSSI pin, 2017. Disponível em: <https://www.digi.com/resources/documentation/Digidocs/90001456-13/concepts/c_rssi_pin_and_signal_strength.htm>. Acesso em: 17 nov. 2018.
- [9] DIGI. **Zigbee RF Modules**. [S.l.]. (195).
- [10] EQUIPE-1-2014-1-RCO3. Pesquisa ZigBee. **Wiki**, 2014. Disponível em: <<https://wiki.sj.ifsc.edu.br/wiki/index.php/Equipe-1-2014-1-RCO3>>. Acesso em: 27 out. 2018.
- [11] FARAANI, S. **ZigBee Wireless Network and Transceivers**. [S.l.]. 2008.
- [12] FERNANDES, A. S. L. **Comunicação Ad Hoc em Equipas de Robôs Móveis Utilizando a Tecnologia ZigBee**. Universidade de Coimbra. [S.l.], p. 87. 2012.
- [13] FERNANDES, J. P. D. F. **Localização em Redes Wi-Fi**. Escola de Engenharia, Universidade do Minho. [S.l.]. 2012.
- [14] FILIPEFLOP. Comunicação Passo-a-Passo entre XBEE e Arduino. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/blog/tutorial-wireless-arduino-xbee-shield/>>. Acesso em: 16 nov. 2018.
- [15] GUIMARÃES, C. C. **Identificação por Radiofrequência**. [S.l.]. 2003.

- [16] ITEAD Xbee Shield Module for Arduino UNO MEGA NANO DUE DUEMILANOVE. **Itead**. Disponível em: <<https://www.itead.cc/itead-xbee-shield.html>>. Acesso em: 16 nov. 2018.
- [17] ITU-R. **PROPAGATION DATA AND PREDICTION METHODS FOR THE PLANNING OF INDOOR RADIOCOMMUNICATION SYSTEMS AND RADIO LOCAL AREA NETWORKS IN THE FREQUENCY RANGE 900 MHz TO 100 GHz**. ITU-R. [S.l.], p. 10. 1997 - 1999.
- [18] JIMBLON. Exploring XBees and XCTU. **Sparkfun**. Disponível em: <<https://learn.sparkfun.com/tutorials/exploring-xbees-and-xctu/selecting-an-explorer>>. Acesso em: 16 nov. 2018.
- [19] JUNIOR, V. A. S. **Sistema de localização para ambientes fechados baseado na potência do sinal recebido em rede ZigBee**. Instituto Federal do Espírito Santo. Vitória - ES. 2011.
- [20] JUNIOR, V. A. S. **Sistema de Localização para Ambientes Fechados Baseado na Potência do Sinal Recebido em Rede ZigBee**. INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO. Vitória - ES, p. 103. 2011.
- [21] LOPES, B. M. T. **Algoritmos de localização com informação histórica e realimentação dos utilizadores**. Universidade do Minho. [S.l.], p. 139. 2014.
- [22] MACHADO, R. **Telefonia Celular**. UFSM - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, p. 19. 2011.
- [23] MAKERLAB. Arduino UNO R3 ATmega328P CH340G. **MakerLab Electronics**. Disponível em: <<https://www.makerlab-electronics.com/product/arduino-uno-r3-atmega328p-ch340g/>>. Acesso em: 17 nov. 2018.
- [24] MASTER, E. O que são sistemas de navegação por satélite? **Acordo Coletivo**, 2018. Disponível em: <<https://acordocoletivo.org/2018/08/26/o-que-sao-sistemas-de-navegacao-por-satelite/>>. Acesso em: 2018 out. 27.
- [25] MÓDULO Xbee S2c Zigbee. **Mercado Livre**. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-882262998-modulo-xbee-s2c-zigbee-_JM>. Acesso em: 16 nov. 2018.
- [26] MORAES, S. A. S.; SOUZA, P. T. C. **Simulando o cérebro: Redes Neurais**. Universidade Católica de Brasília, 2000. [S.l.].
- [27] MORIMOTO, C. E. Sistema de navegação indoor usando o campo magnético da terra. **Hardware**, 2012. Disponível em: <<https://www.hardware.com.br/noticias/2012-07/indooratlas.html>>. Acesso em: 27 out. 2018.

- [28] NAJNUDEL, M. **Indoor Propagation Studies For Wlan Planning**. Puc. Rio de Janeiro. 2004.
- [29] NUR ATINA MOHAMAD RAZALI, M. H. H. N. F. Z. M. R. I. A.-H. Z. **The Distribution of Path Loss Exponent in 3 D Indoor Environment**. IEEE Internet of Things Journal. [S.l.]. 2017.
- [30] PIRES, M. A. D. F. **Princípios de Telecomunicações - Aula 7**. [S.l.], p. 44.
RÁDIO Enlace I: Antenas. **Teleco**. Disponível em:
<http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialrenlace1/pagina_2.asp>. Acesso em: 24 Outubro 2018.
- [31] RENNÓ, E. D. **Decibel e a Fórmula de Friis**. Brasópolis - Minas Gerais - Brazil, p. 3.
- [32] RIVERO, I. A. S. **Rede de Sensores sem Fio para Monitoramento de Equipamentos Eletrônicos**. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 102. 2011.
- [33] SIMÕES, D. M. **Navegação indoor baseada na rede WiFi como suporte a serviços baseados na localização: Estudo de caso no campus da UL**. Universidade de Lisboa. [S.l.], p. 75. 2015.
- [34] WIKIPÉDIA. Fórmula de Friis. **Wikipédia, a enciclopédia livre**, 2013. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/F%C3%B3rmula_de_Friis>. Acesso em: 24 Outubro 2018.
- [35] WIKIPEDIA. Assisted GPS. **The Free Encyclopedia**, 2018. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Assisted_GPS>. Acesso em: 2018 out. 27.
- [36] WIKIPÉDIA. Relógio Atômico. **A enciclopédia livre**, 2018. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Rel%C3%B3gio_at%C3%B4mico>. Acesso em: 27 out. 2018.
- [37] XBEE™ Series 2 OEM RF Modules. **Digi International**, 2007. Acesso em: 16 nov. 2018.
- [38] ZIGBEE: Aplicações. **Teleco**, 2018. Disponível em: <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialzigbee/pagina_2.asp>. Acesso em: 27 out. 2018.

8 ANEXO A – REPRESENTAÇÃO CROMATOGRÁFICA DA POSIÇÃO DO MÓVEL NO CENÁRIO 1 DE TESTES.

Tabela 19 - Representação cromatográfica da posição do móvel referente ao ponto 3.

Móvel na posição: x = 3 m e y = 2m									
x/y (m)	0	0,45	0,9	1,35	1,8	2,25	2,7	3,15	3,6
0	17,5	11,7	14,3	10,8	12,7	9,2	8,5	14,8	10,6
0,45	15,5	19,6	12,2	5,8	10,6	8,5	7,1	6,7	13,0
0,9		5,8	6,4	8,1	8,5	7,6	5,0	8,6	3,6
1,35		5,0	5,1	6,7	6,1	7,3	5,8	5,0	16,2
1,8		3,2	5,0	8,6	7,3	7,8	5,4	1,4	4,5
2,25		9,5	3,0	6,1	10,3	8,1	7,1	5,8	5,7

Tabela 20 - Representação cromatográfica da posição do móvel referente ao ponto 2.

Móvel na posição: x = 0,6m e y = 1,4									
x/y (m)	0	0,45	0,9	1,35	1,8	2,25	2,7	3,15	3,6
0	19,4	14,1	16,4	13,5	15,8	13,2	12,4	17,0	13,6
0,45	17,0	21,0	14,9	9,5	13,6	12,4	10,3	10,4	15,0
0,9		9,5	9,4	11,7	11,7	11,4	9,0	11,4	6,7
1,35		1,0	1,4	10,4	10,0	11,2	9,5	4,1	15,1
1,8		7,1	9,0	11,4	9,2	11,2	9,2	5,1	7,2
2,25		5,8	5,0	6,7	12,7	10,6	10,3	8,6	8,9

Tabela 21 - Representação cromatográfica da posição do móvel referente ao ponto 1.

Móvel na posição: x = 1,2m e y = 0,6m									
x/y (m)	0	0,45	0,9	1,35	1,8	2,25	2,7	3,15	3,6
0	13,3	7,3	10,2	6,3	7,8	5,1	4,0	10,4	5,8
0,45	12,0	16,0	7,6	1,0	5,8	4,0	2,2	2,0	9,1
0,9		6,1	2,0	3,2	3,6	6,7	3,2	4,1	2,0
1,35		9,5	9,8	6,3	4,5	5,8	6,1	9,9	15,6
1,8		2,2	3,2	10,0	10,2	8,2	5,1	5,0	7,3
2,25		14,3	7,2	10,3	12,0	10,0	8,1	8,1	7,0

Tabela 22 - Representação cromatográfica da posição do móvel referente ao ponto 5.

Móvel na posição: x = 1,4m e y = 0,6m									
x/y (m)	0	0,45	0,9	1,35	1,8	2,25	2,7	3,15	3,6
0	13,0	7,0	10,0	6,0	6,7	3,2	2,0	10,0	5,1
0,45	12,2	16,0	7,1	1,0	5,1	2,0	2,2	0,0	9,1
0,9		6,1	2,8	1,4	3,0	6,1	3,2	4,1	4,0
1,35		11,4	11,7	6,0	4,0	5,1	6,1	11,4	17,0
1,8		3,6	3,2	10,0	10,8	8,0	5,1	6,4	8,1
2,25		16,2	8,5	11,4	12,0	10,2	8,1	8,5	7,3

Tabela 23 - Representação cromatográfica da posição do móvel referente ao ponto 6.

Móvel na posição: x = 3,1m e y = 0,8m									
x/y (m)	0	0,45	0,9	1,35	1,8	2,25	2,7	3,15	3,6
0	9,5	3,6	6,3	2,8	5,4	7,1	5,7	6,7	3,2
0,45	8,0	12,0	4,2	4,1	3,2	5,7	2,2	4,5	5,1
0,9		10,0	2,0	4,2	2,2	10,4	7,1	1,0	4,5
1,35		11,4	12,0	10,2	8,2	9,5	10,0	13,0	12,8
1,8		6,1	7,1	14,0	14,1	12,2	9,1	8,5	11,2
2,25		16,4	10,8	13,9	16,0	14,0	12,0	12,0	11,0