

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**TIAGO CAMARGO BERTI**

**ESTUDO DE CASO: IMPLEMENTAÇÃO DE REDE WIRELESS EM  
LABORATÓRIO DE QUÍMICA**

PORTO ALEGRE  
2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**ESTUDO DE CASO: IMPLEMENTAÇÃO DE REDE WIRELESS EM  
LABORATÓRIO DE QUÍMICA**

Projeto de Diplomação apresentado ao  
Departamento de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como  
parte dos requisitos para Graduação em Engenharia  
Elétrica.

ORIENTADOR: PROF. DR. ÁLVARO AUGUSTO SALLES

Porto Alegre  
2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

TIAGO CAMARGO BERTI

**ESTUDO DE CASO: IMPLEMENTAÇÃO DE REDE WIRELESS EM  
LABORATÓRIO DE QUÍMICA**

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação” do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador:

---

Prof. Dr. Álvaro Augusto Salles, UFRGS  
Doutor pela University of London – Londres, Inglaterra

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Álvaro Augusto Salles, UFRGS  
Doutor pela University of London – Londres, Inglaterra

MSc. Sergio Luiz Schubert Severo, UFRGS  
Mestre pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Dr. Ivan Müller, UFRGS  
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Porto Alegre, Julho de 2013

## **DEDICATÓRIA**

À minha família e amigos pelo apoio em todos os momentos.

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pelo ensino de qualidade e especialmente aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica, por todo o conhecimento transmitido.

Ao Professor Álvaro Augusto de Almeida Salles, por dispor uma grande parte do seu tempo na orientação deste trabalho e na minha orientação como aluno, tendo sido de extrema importância na execução deste projeto de diplomação.

Aos companheiros de curso, pela parceria em todos os trabalhos, madrugadas de estudos e comemorações de fim de semestre.

Aos amigos de Caxias do Sul, por entenderem minhas ausências e por se esforçarem para prover os melhores momentos possíveis nos curtos espaços de tempo disponíveis.

Aos colegas de trabalho, pelo incentivo à realização deste projeto.

Ao meu irmão, Gustavo, pelo companheirismo e incentivo, principalmente no início desta longa jornada.

A meus pais, Nestor e Glades, por todo carinho, dedicação e empenho em suprir todas as necessidades para que eu pudesse viver bem, mesmo longe do conforto do lar.

## RESUMO

O advento das redes sem fio nas duas últimas décadas trouxe grande desenvolvimento em diversas aplicações da engenharia por conta de suas características, como o aumento da autonomia dos equipamentos, por exemplo. Devido a suas vantagens, o número de aplicações para este tipo de rede vem aumentando em diversos setores, desde as sofisticadas aplicações militares às mais simples utilizações em ambientes domésticos, passando por uma grande gama de utilizações na indústria e até mesmo na agricultura e pecuária. Uma das aplicações possíveis no ambiente industrial é a integração de equipamentos, entre si e entre sistemas de gerenciamento de informações de laboratório, para fins de otimização de acesso e de segurança dos dados armazenados, sendo este o objeto de estudo deste projeto. Este trabalho trata de um estudo de caso da implementação de uma rede wireless em um laboratório de química analítica de grande porte, composto por uma área de quatrocentos metros quadrados, com a finalidade de integração de equipamentos analíticos, como cromatógrafos gasosos, líquidos e de íons, balanças e medidores de pH. A partir desta rede será criado um sistema de backup de dados, de modo que se aumente a confiabilidade e segurança do armazenamento de informação e que seu acesso seja otimizado.

**Palavras-chaves:** Engenharia Elétrica, Redes Sem Fio, Integração de Equipamentos.

## ABSTRACT

The advent of the wireless networks in the last two decades has brought a huge development in many applications of engineering for their characteristics, like the equipment autonomy improvement, for example. Because of their advantages, the number of the applications for this type of network has been increasing in many sectors, from the sophisticated military applications to the simplest utilizations in domestic environments, going through a wide range of industrial utilizations and even in agriculture and livestock. One of these applications in industrial environment is the equipment integration, between themselves and between them and the laboratory information management systems, for purposes of access optimization and stored data security, being this the object of study of this project. The present work deals with a case study of a wireless network implementation in a large analytical chemistry laboratory, composed of an area of four hundred squares meters, with the aim of the analytical equipment integration, like gas, liquid and ionic chromatographs, balances and pH meters. From this network, a data backup system will be developed, in such a way that data storage confidence and security can be improved and their access will be optimized.

**Keywords:** Electrical Engineering, Wireless Network, Equipment Integration.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1.	Motivação.....	13
1.2.	Objetivo.....	14
1.3.	Organização do Trabalho.....	14
<b>2</b>	<b>COMUNICAÇÃO SEM FIO.....</b>	<b>15</b>
2.1.	Características Gerais.....	15
2.2.	Mecanismos de Propagação das Ondas Eletromagnéticas.....	16
2.2.1.	Propagação Direta.....	17
2.2.2.	Reflexão.....	17
2.2.3.	Difração.....	17
2.2.4.	Espalhamento.....	17
2.3.	Técnicas de Modulação.....	17
2.3.1.	Modulação Analógica.....	18
2.3.2.	Modulação Digital.....	19
<b>3</b>	<b>REDES DE COMPUTADORES.....</b>	<b>22</b>
3.1.	Redes Wireless de Computador.....	22
3.2.	Redes sem Fio de Acesso Local.....	23
3.3.	IEEE 802.11.....	23
3.4.	Arquitetura de Redes.....	24
<b>4</b>	<b>MODELOS DE PROPAGAÇÃO PARA INTERIORES.....</b>	<b>26</b>
4.1.	Modelo de Atenuação em Espaço Livre.....	26
4.2.	Modelo de Atenuação Recomendado pela ITU- R P.1238-1.....	28
4.3.	Modelo de Atenuação de Um Degrau.....	30
4.4.	Comparação dos Modelos Teóricos Avaliados.....	31
4.4.1.	Cenário 1 – Linha de Visada Direta.....	32
4.4.2.	Cenário 2 – Linha de Visada Obstruída, em um Mesmo Andar.....	33
4.4.3.	Cenário 3 – Linha de Visada Obstruída, em Andares Diferentes.....	34
<b>5</b>	<b>MEDIÇÕES REALIZADAS NA BANDA DE 2,4GHz.....</b>	<b>36</b>
5.1.	Hardware e Software Utilizados nas Medições.....	39

<b>5.2.</b>	<b>Método de Medição .....</b>	<b>42</b>
<b>5.3.</b>	<b>Resultados Medidos .....</b>	<b>43</b>
<b>6</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS .....</b>	<b>45</b>
	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>48</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Espectro eletromagnético. ....	16
Figura 2. Mecanismos de Propagação de Ondas Eletromagnéticas.....	17
Figura 3. Esquemas de Modulação Analógica.....	19
Figura 4. Esquemas de Modulação Digital.....	21
Figura 5. Rede Baseada em Infraestrutura.....	24
Figura 6. Rede Ad-Hoc.....	25
Figura 7. Atenuação em Espaço Livre para frequências de 2,4GHz e 5,2GHz.....	28
Figura 8. Atenuação conforme ITU-R 1238-1 para frequências de 2,4GHz e 5,2GHz.....	29
Figura 9. Atenuação de sinal de 2,4GHz, para índices de decaimento iguais a 2, 4 e 6.....	31
Figura 10. Planta ilustrativa do cenário 1. ....	32
Figura 11. Cenário 1 – Linha de visada direta. ....	33
Figura 12. Planta ilustrativa do cenário 2. ....	34
Figura 13. Cenário 2 – Linha de visada obstruída, em um mesmo andar.....	34
Figura 14. Planta ilustrativa do cenário 3. ....	35
Figura 15. Cenário 3 – Linha de visada obstruída, em andares diferentes. ....	35
Figura 16. Laboratório onde será feita a implementação da rede sem fio. ....	37
Figura 17. Identificação dos PAs e TMs no laboratório. ....	38
Figura 18. Ponto de Acesso Wireless – DLINK DI-524.....	39
Figura 19. Terminal Móvel – Samsung Ultrabook Series 5.....	40
Figura 20. WirelessMon – Sumário.....	41
Figura 21. WirelessMon – Gráfico Atenuação vs Tempo.....	42
Figura 22. Comparação Medições e Modelos Teóricos – Cenário 1.....	46
Figura 23. Comparação Medições e Modelos Teóricos – Cenário 2.....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Bandas de frequências e seus usos comuns. ....	16
Tabela 2. N – Coeficiente de perdas de potência.....	29
Tabela 3. $L_f$ – Fator de perdas de penetração dos pisos.....	29
Tabela 4. Desvio padrão do desvanecimento log-normal. ....	29
Tabela 5. Valores do índice de decaimento de potência para diversos ambientes. ....	30
Tabela 6. Especificações do Ponto de Acesso .....	39
Tabela 7. Especificações do Terminal Móvel.....	40
Tabela 8. Resultados medidos.....	43

## LISTA DE ABREVIATURAS

AM	<i>Amplitude Modulation</i>
ASK	<i>Amplitude Shift Keying</i>
BFSK	<i>Binary Frequency Shift Keying</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
EHF	<i>Extremely High Frequency</i>
ELF	<i>Extremely Low Frequency</i>
FM	<i>Frequency Modulation</i>
FSK	<i>Frequency Shift Keying</i>
HF	<i>High Frequency</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Eletrical and Eletronics Engineers</i>
IR	<i>InfraRed</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LF	<i>Low Frequency</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MAN	<i>Metropolitan Area Network</i>
MF	<i>Medium Frequency</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>
PA	<i>Ponto de Acesso</i>
PM	<i>Phase Modulation</i>
PSK	<i>Phase Shift Keying</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
SHF	<i>Super High Frequency</i>
TM	<i>Terminal Móvel</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
VF	<i>Voice Frequency</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>
VLF	<i>Very Low Frequency</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1. Motivação

Desde os primórdios da humanidade a comunicação é um fator essencial para o desenvolvimento dos povos. Da conversa primitiva dos homens pré-históricos até os dias atuais, a humanidade mostrou que a necessidade de otimização desta transmissão de informações é tamanha que necessita estudo de quase todas as áreas do conhecimento para que este desenvolvimento acompanhe as necessidades do ser humano.

Com o advento da tecnologia de transmissão de informações a partir de sinais elétricos e, mais tarde, através de ondas eletromagnéticas permitiu-se um avanço, quase incomensurável, nesta área nos últimos anos. Dada a larga proliferação de dispositivos móveis de uso pessoal, como *smartphones* e *tablets*, é cada vez mais raro encontrar locais onde não exista um sinal disponível de rede *wireless*, ou quem não conheça, ao menos um pouco, desta tecnologia. Além disso, muitos outros setores vêm utilizando este tipo de rede para inúmeras aplicações, que vão desde o controle de sistemas de irrigação em grandes fazendas até o monitoramento de linhas de produção em indústrias, fazendo com que a pesquisa sobre o tema seja altamente demandada. Isso faz com que, cada vez mais, os sistemas de transmissão sem fio sejam desenvolvidos, para que suas limitações sejam minimizadas e se maximizem as vantagens em sua utilização.

Uma das possíveis aplicações de redes sem fio é a sua utilização para integração de equipamentos de laboratório. Com essa tecnologia é possível que se transmitam e armazenem dados de pesquisas, em ambientes onde a massa de informações gerada por dia é alta e existe a necessidade de armazenamento por um longo período de tempo, permitindo que se conectem equipamentos analíticos com servidores, onde se armazenam *backups* das informações e se transferem resultados para os bancos de dados dos projetos estudados dentro de um laboratório.

A vantagem na utilização de redes sem fio, em comparação às redes conectadas por cabos, está na viabilização da conexão de equipamentos potencialmente móveis, como medidores de comprimento e de pH, por exemplo, e no aumento do número de equipamentos integrados de forma rápida, uma vez que, em grandes redes, existe um problema muito comum de disponibilidade de pontos de rede em *switches*, o que demanda que novas inclusões de pontos de acesso sejam demoradas e, eventualmente, dependentes de *upgrade* de *switches*. Em contrapartida, existe a desvantagem da incerteza sobre as influências, na saúde humana, da exposição de longa duração aos sinais nas faixas de frequência utilizada neste tipo de rede.

Para que sejam implementadas redes sem fio, com um bom desempenho, é necessário que se tomem alguns cuidados para que a qualidade dos sinais transmitidos seja garantida em todos os pontos de interesse. Para isso existem indicadores de qualidade que devem ser avaliados, de modo que se assegure a conectividade de todos os equipamentos, o que pode ser influenciado pelos obstáculos que precisam ser superados e pela distância entre o transmissor e o receptor do sinal. Esta avaliação pode ser feita com a utilização de modelos teóricos, na maioria, definidos para cenários bem comportados e previsíveis, ou pela análise de medições da qualidade de um sinal no local de interesse.

## 1.2. Objetivo

Este trabalho tem como objetivo o estudo da implementação de uma rede sem fio, em um laboratório de química analítica, construído em uma grande área, com cinquenta e um equipamentos espalhados, sendo alguns deles móveis, e gerando uma quantidade muito alta de informação diária.

A rede do laboratório será implementada conforme o protocolo IEEE 802.11g, na banda de 2,4 GHz, integrando equipamentos dispostos em quatro salas principais, separadas por divisórias do tipo *drywall*.

Para isso será proposta a implementação de quatro *access points*, e a avaliação de potência de sinal recebido nos pontos de interesse, através de modelos teóricos de atenuação e da medição de sinal *in loco*. Desta forma, será possível avaliar a coerência entre os modelos teóricos e os valores medidos, podendo identificar as divergências entre a previsão teórica e a potência medida do sinal, permitindo que se validem os modelos utilizados conforme a realidade de um laboratório de química.

## 1.3. Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

O Capítulo 2 trata das características gerais das comunicações sem fio, abordando as principais formas de propagação de ondas eletromagnéticas e as técnicas utilizadas para modulação de informações.

O Capítulo 3 aborda as redes de computadores de uma forma geral, levantando a forma como a informação é transmitida, a classificação das redes conforme sua abrangência geográfica, chegando à forma de transmissão sem fio. Também é abordado o padrão de comunicação sem fio para WLANs IEEE 802.11.

O Capítulo 4 traz os modelos teóricos mais utilizados para propagação de sinais em interiores, fazendo uma análise de cada um deles, e, por fim, comparando estes modelos entre si.

No Capítulo 5 é trazido o cenário adotado no experimento realizado para medição da potência transmitida nos pontos de interesse dentro do laboratório, abordando os equipamentos utilizados e os métodos utilizados para as medições. Por fim são apresentados os resultados do estudo.

No Capítulo 6 são analisados os resultados obtidos, trazendo as discussões a cerca da comparação entre modelos teóricos e resultados obtidos experimentalmente.

## 2 COMUNICAÇÃO SEM FIO

### 2.1. Características Gerais

A comunicação sem fio teve grande expansão, tanto do ponto de vista científico, como do ponto de vista de tamanho de mercado e impacto na sociedade, nas últimas duas décadas. Geralmente, ao se mencionar redes sem fio, se faz uma associação à telefonia celular, uma vez que este segmento representa uma das áreas com maior crescimento nas últimas décadas. No entanto, a tecnologia de redes sem fio inclui uma grande gama de protocolos utilizados para variadas aplicações. Por esta razão, convém que se faça uma análise tecnológica, a fim de identificar qual tipo de serviço e o protocolo mais adequado para a implementação proposta.

A base da comunicação sem fio é o princípio de difusão e recepção de ondas eletromagnéticas, as quais são caracterizadas por sua frequência ( $f$ ) ou por seu comprimento de onda ( $\lambda$ ). A velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas é dependente do meio onde o fenômeno ocorre, porém, no vácuo, esta velocidade é igual à velocidade da luz ( $c$ ), sendo a relação entre estes parâmetros representada pela equação (1)

$$c = \lambda \times f \quad (1)$$

Onde a velocidade da luz  $c$  é  $3 \times 10^8$  m/s,  $f$  é a frequência em Herz (Hz) e  $\lambda$  é o comprimento de onda em metros.

A União Internacional de Telecomunicações (ITU) define o espectro eletromagnético, no qual se caracterizam as ondas eletromagnéticas, conforme a Figura 1 e a Tabela 1 mostra as várias bandas de frequência deste espectro, utilizadas em comunicações. Cada uma das faixas de frequência têm determinadas aplicações em comunicação, conforme mostra a Tabela 1, de acordo com suas características de propagação e modulação e também conforme padronizações realizadas ao longo do desenvolvimento das tecnologias de transmissão.

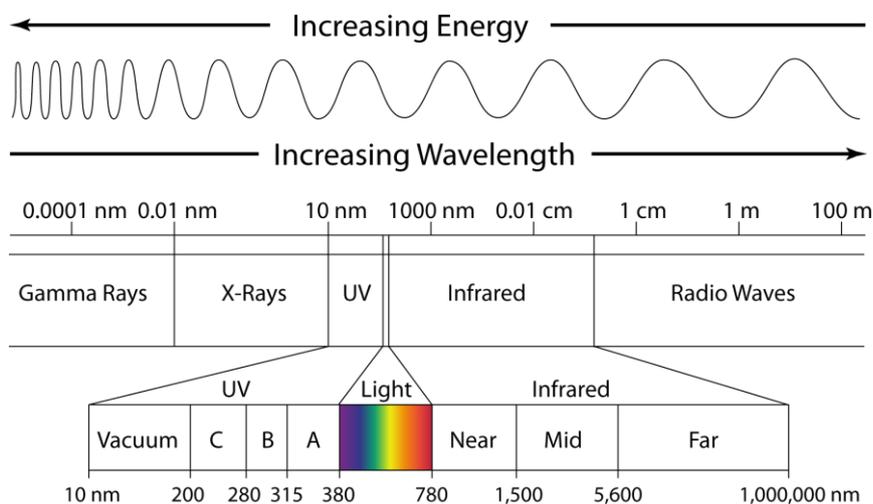
As frequências de maior interesse neste estudo estão abaixo do infravermelho, sendo estas agrupadas e tratadas como radiofrequências ou ondas de rádio. Além disso, as bandas de frequência comumente utilizadas para WLANs (*Wireless Local Area Network*) e WPANs (*Wireless Personal Area Network*), sendo as mais utilizadas, com banda de frequência entorno de 2,4 GHz, como será abordado nos próximos capítulos.

Tabela 1. Bandas de frequências e seus usos comuns.

Nome da Banda	Frequência	Comprimento de Onda	Aplicações
<i>Extremely Low Frequency (ELF)</i>	30 Hz a 300 Hz	10000 km a 1000 km	Frequências de linhas de transmissão
<i>Voice Frequency (VF)</i>	300 Hz a 3000 Hz	1000 km a 100 km	Telefonia
<i>Very Low Frequency (VLF)</i>	3 Hz a 30 kHz	100 km a 10 km	Comunicação Marítima
<i>Low Frequency (LF)</i>	30 kHz a 300 kHz	10 km a 1 km	Comunicação Marítima
<i>Medium Frequency (MF)</i>	300 kHz a 3000 kHz	1 km a 100 m	Rádio AM
<i>High Frequency (HF)</i>	3 MHz a 30 MHz	100 m a 10 m	Comunicações de aeronaves para voos de longa distância e navios
<i>Very High Frequency (VHF)</i>	30 MHz a 300 MHz	10 m a 1 m	Rádio FM
<i>Ultra High Frequency (UHF)</i>	300 MHz a 3 GHz	1 m a 10 cm	Telefonia Celular
<i>Super High Frequency (SHF)</i>	3 GHz a 30 GHz	10 cm a 1 cm	Satélites de Comunicação, <i>Links</i> de Microondas
<i>Extremely High Frequency (EHF)</i>	30 GHz a 300 GHz	1 cm a 1 mm	Enlaces <i>Wireless</i> Locais
Infravermelho (IR)	300 GHz a 400 THz	1 mm a 770 nm	<i>Consumer Electronics</i>
Luz Visível	400 a 900 THz	770 nm a 330 nm	Comunicações Ópticas

Fonte: MURTHY, 2004

Figura 1. Espectro eletromagnético.



Fonte: <http://jabberwockreptiles.com/>

## 2.2. Mecanismos de Propagação das Ondas Eletromagnéticas

As ondas de rádio são propagadas principalmente por meio de quatro mecanismos: propagação direta, reflexão, difração e espalhamento, conforme mostra a Figura 2.

### 2.2.1. Propagação Direta

Acontece quando a onda transmitida atinge um receptor diretamente, ou seja, sem passar por nenhum obstáculo.

### 2.2.2. Reflexão

É o efeito observado quando uma onda propagada atinge um obstáculo reflexivo, normalmente metal ou água, fazendo com que a onda seja refletida e causando um atraso na sua fase, dependente da impedância do objeto atingido.

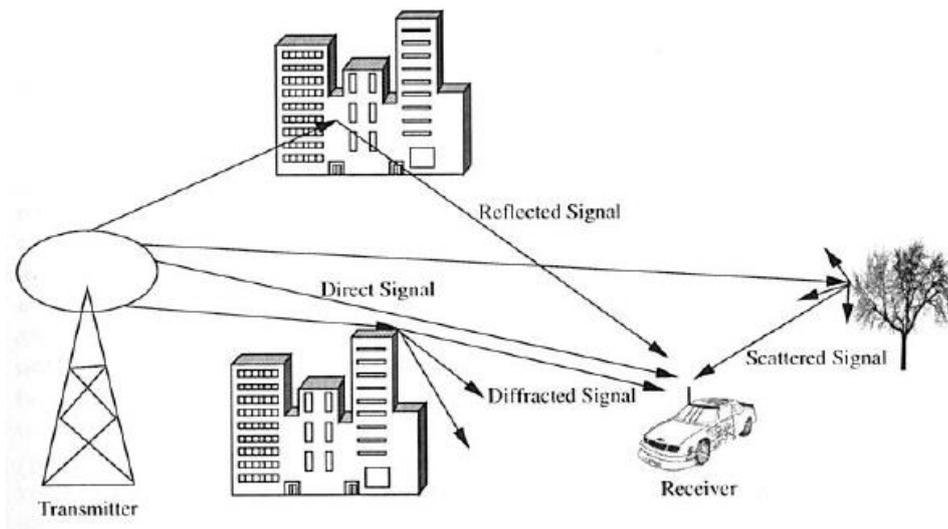
### 2.2.3. Difração

É o desvio na direção de propagação de uma onda quando ela atinge um objeto com dimensões da mesma ordem de grandeza de seu comprimento de onda. Neste caso, as ondas conseguem atingir locais atrás do obstáculo, os quais não poderiam ser alcançados por propagação direta.

### 2.2.4. Espalhamento

É o efeito observado quando uma onda atinge obstáculos com dimensões pequenas, quando comparadas ao seu comprimento de onda, fazendo com que ocorra um espalhamento da onda em variadas direções.

Figura 2. Mecanismos de Propagação de Ondas Eletromagnéticas



Fonte: MURTHY, 2004

## 2.3. Técnicas de Modulação

A modulação de um sinal é processo de conversão da informação que se deseja transmitir, seja ela digital ou analógica, em ondas eletromagnéticas para a transmissão em uma

frequência diferente da frequência natural do sinal, o que é útil nas transmissões sem fio e em meios confinados, por exemplo. As técnicas de modulação consistem em formas de alterar certos parâmetros de uma onda eletromagnética com frequência igual à frequência do canal de transmissão, chamada portadora, de modo que a informação possa ser, de certa forma, codificada. Os esquemas de modulação podem ser classificados, de acordo com a natureza do dado transmitido, em Modulação Analógica e Modulação Digital.

### 2.3.1. Modulação Analógica

Conforme o nome sugere, a modulação analógica é utilizada para transmitir dados de natureza analógica. Neste caso, a informação é sobreposta a um sinal portador, sendo esta sobreposição causadora da alteração da amplitude ou da frequência desta portadora.

Uma das técnicas utilizadas para transmissão de dados analógicos é a Modulação em Amplitude, conhecida como modulação AM, na qual o sinal transmitido  $s(t)$  é equivalente à superposição do sinal de informação, ou sinal modulado,  $x(t)$ , na portadora  $c(t)$ , de modo que frequência permaneça inalterada. Geralmente a portadora é uma onda senoidal, de modo que uma onda AM costuma ser representada conforme a equação (2).

$$s(t) = (1 + n_a \cdot x(t)) \cdot \cos(2\pi f_c t) \quad (2)$$

Onde  $n_a$  é chamado de índice de modulação e equivale à razão entre a amplitude do sinal modulado e da portadora e  $f_c$  é a frequência da portadora.

Outra maneira de se transmitir dados analógicos é pela modulação em ângulo, a qual pode ser expressa genericamente pela equação (3) e realizada de duas formas: modulação de fase (PM) e modulação de frequência (FM).

$$s(t) = A_c \cdot [\cos(2\pi f_c t + \Phi(t))] \quad (3)$$

Onde  $A_c$  é a amplitude do sinal,  $f_c$  é a frequência da portadora e  $\Phi(t)$  é a função que representa a informação transmitida.

Na modulação PM a função  $\Phi(t)$  é diretamente proporcional ao sinal transmitido, como expressa a equação (4), fazendo com que a fase do sinal transmitido seja alterada proporcionalmente à informação modulada  $x(t)$ , uma vez que o índice de modulação de fase  $n_p$  é constante.

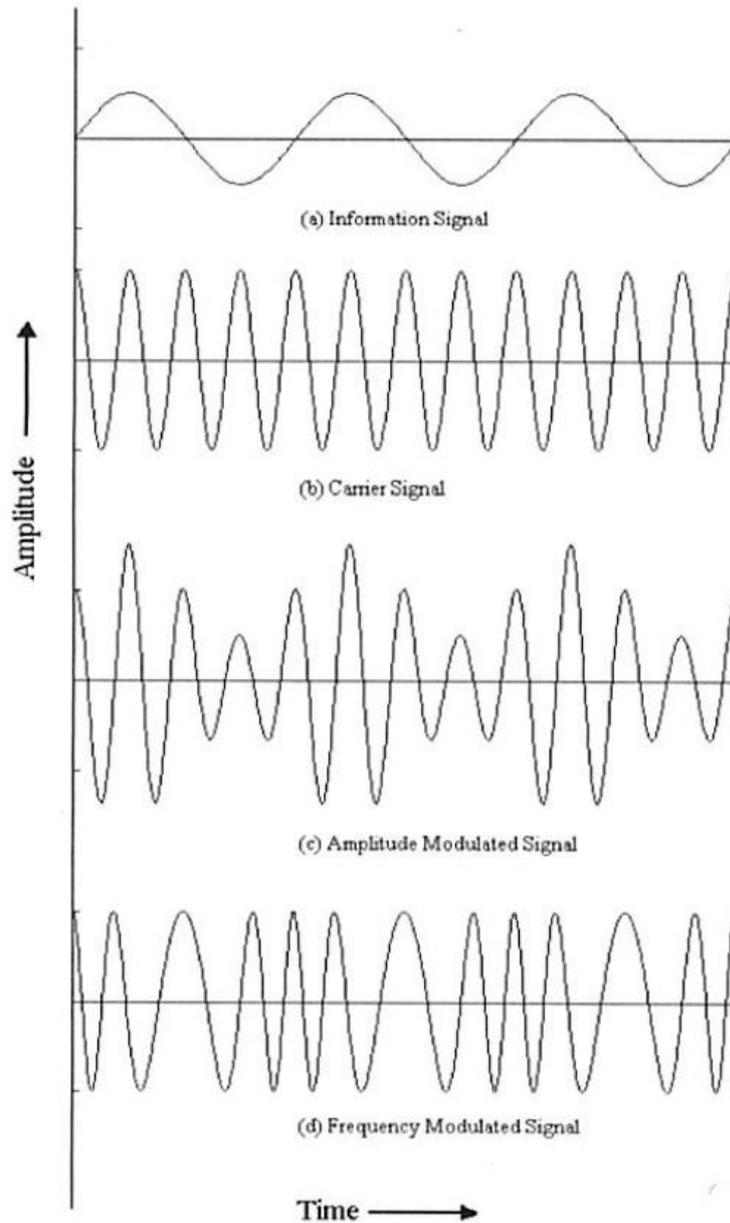
$$\Phi(t) = n_p \cdot x(t) \quad (4)$$

Já na modulação FM é a variação da função  $\Phi(t)$  que é proporcional ao sinal de informação  $x(t)$ , conforme expresso na equação (5), de modo que a frequência instantânea da portadora seja alterada conforme a amplitude do sinal  $x(t)$ , o que resulta na compressão e expansão da portadora.

$$\Phi'(t) = n_f \cdot x(t) \quad (5)$$

A Figura 3 representa a transmissão de um sinal analógico, a partir dos esquemas de modulação citados.

Figura 3. Esquemas de Modulação Analógica



Fonte: MURTY, 2004

### 2.3.2. Modulação Digital

As técnicas de modulação digital são utilizadas de forma análoga às analógicas, no entanto sua demanda é a de transmissão de sequências binárias, o que implica em alterações do sinal portador em intervalos discretos de tempo, o que dá ao sinal transmitido a característica de “chaveamento”. As principais técnicas de modulação digital são o ASK (*Amplitude Shift Keying*), FSK (*Frequency Shift Keying*) e o PSK (*Phase Shift Keying*).

Na modulação ASK, ou chaveamento por deslocamento de amplitude, em tradução livre, quando uma sequência binária é transmitida, o nível binário 1 é representado pela presença do sinal portador durante um intervalo definido de tempo, enquanto o nível binário 0 é indicado pela abstenção deste sinal durante o mesmo intervalo de tempo. Desta forma o sinal transmitido pode ser representado pela equação (6).

$$s(x) = \begin{cases} A_c \cdot \cos(2\pi f_c t), & \text{para o número binário 1} \\ 0, & \text{para o número binário 0} \end{cases} \quad (6)$$

Para a modulação FSK, ou chaveamento por deslocamento de frequência, em tradução livre, também chamada de BFSK (*Binary Frequency Shift Keying*) utiliza-se um  $k$  constante pequeno, comparado à frequência do sinal, para que se dê um *offset* na frequência da portadora, conforme o nível binário transmitido, de modo que o sinal transmitido pode ser expresso conforme mostra a equação (7).

$$s(x) = \begin{cases} A_c \cdot \cos(2\pi(f_c + k)t), & \text{para o número binário 1} \\ A_c \cdot \cos(2\pi(f_c - k)t), & \text{para o número binário 0} \end{cases} \quad (7)$$

Uma forma expandida da FSK é a FSK à quatro níveis, onde são utilizados quatro níveis digitais, como mostra a equação (8).

$$s(x) = \begin{cases} A_c \cdot \cos(2\pi(f_c + 3k)t), & \text{para o número binário 10} \\ A_c \cdot \cos(2\pi(f_c + k)t), & \text{para o número binário 11} \\ A_c \cdot \cos(2\pi(f_c - k)t), & \text{para o número binário 01} \\ A_c \cdot \cos(2\pi(f_c - 3k)t), & \text{para o número binário 00} \end{cases} \quad (8)$$

Na modulação PSK, ou chaveamento por deslocamento de fase, em tradução livre, também chamada BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) utiliza-se uma portadora com determinada fase para representar o nível binário 0, e esta portadora atrasada de  $\pi$  radianos para representar o nível binário 1, conforme expressa a equação (9).

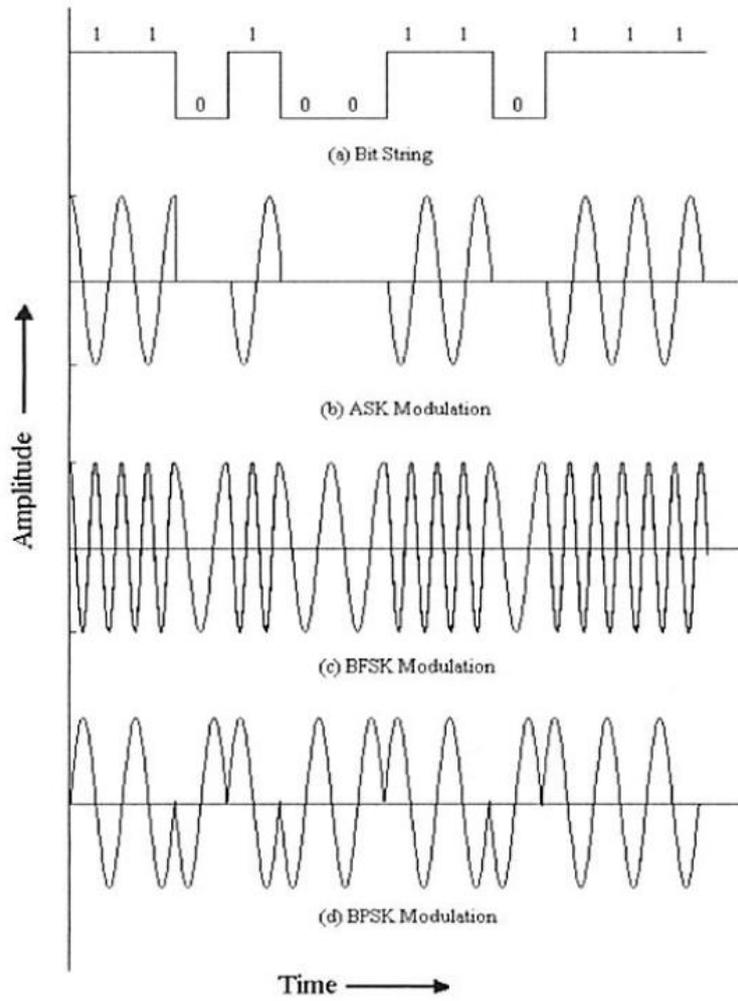
$$s(x) = \begin{cases} A_c \cdot \cos(2\pi f_c t + \pi), & \text{para o número binário 1} \\ A_c \cdot \cos(2\pi f_c t), & \text{para o número binário 0} \end{cases} \quad (9)$$

A PSK possui uma forma expandida, de forma análoga à FSK, chamada QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), que pode ser expressa conforme a equação (10)

$$s(x) = \begin{cases} A_c \cdot \cos\left(2\pi f_c t + \frac{\pi}{4}\right), & \text{para o número binário 10} \\ A_c \cdot \cos\left(2\pi f_c t + \frac{3\pi}{4}\right), & \text{para o número binário 11} \\ A_c \cdot \cos\left(2\pi f_c t + \frac{5\pi}{4}\right), & \text{para o número binário 01} \\ A_c \cdot \cos\left(2\pi f_c t + \frac{7\pi}{4}\right), & \text{para o número binário 00} \end{cases} \quad (10)$$

A Figura 4 representa a transmissão de uma sequência binária, a partir dos esquemas de modulação digital citados.

Figura 4. Esquemas de Modulação Digital



Fonte: MURTY, 2004

### 3 REDES DE COMPUTADORES

Uma rede de computadores é um sistema onde determinado número de equipamentos, ou nós, estão conectados entre si, possibilitando a transmissão de informação. Conforme a tecnologia de transmissão utilizada, as redes podem ser classificadas entre duas grandes categorias: Redes *Broadcast* e Redes Ponto-a-Ponto.

Em uma rede *broadcast* utiliza-se apenas um canal de comunicação. Desta forma, uma mensagem é transmitida para todos os nós componentes da rede, porém a mensagem contém o endereço do nó para o qual ela foi destinada. Assim, a mensagem é recebida apenas pelo nó de destino, sendo ignorada pelos demais componentes da rede. Este tipo de rede é mais utilizado para interligar equipamentos em uma área geográfica restrita.

Por outro lado, redes ponto-a-ponto não compartilham o canal de comunicação, ou seja, dois pontos são conectados através de um *link* dedicado. Um dado transmitido por uma fonte pode ser recebido apenas pelo próximo nó receptor, de modo que a informação, geralmente, precisa passar por diversos nós receptores até que atinja o seu destino final. As redes ponto-a-ponto são usualmente aplicadas para interligar dispositivos em um espaço geográfico maior, e, de acordo com esta extensão física, as redes são classificadas, em sua maioria, como LANs (*Local Area Networks* - Redes de Áreas Locais), MANs (*Metropolitan Area Networks* – Redes de Área Metropolitana) ou WANs (*Wide Area Networks* – Redes de Áreas Extensas).

#### 3.1.Redes Wireless de Computador

Em redes wireless de computadores são utilizadas ondas de radiofrequência para estabelecer os canais de transmissão, tanto nas redes *broadcast* como nas ponto-a-ponto, ou seja, não existe necessidade de uma conexão física por meio de cabos, dando mobilidade aos equipamentos integrantes da rede. Um dos principais nichos de aplicação de redes wireless está nas redes de computadores de menor abrangência geográfica, as quais podem ser representadas pelas WPANs (Redes Wireless de Área Pessoal) e pelas WLANs (Redes Wireless de Áreas Locais).

As WPANs tem sua utilização mais restrita à pequenas distâncias, geralmente menores que 10 metros, e foram especialmente criadas para conexão de dispositivos móveis como *smartphones*, *notebooks* e outros dispositivos eletrônicos. O principal protocolo de comunicação das WPANs é o *Bluetooth* e a norma mais utilizada para definir as especificações de controle de mídias e camadas físicas é a IEEE 802.15.1.

As WLANs são largamente utilizadas em aplicações onde existe requerimento de mobilidade ou em espaços onde a alocação e manutenção de cabos é muito cara ou, até mesmo, inviável. Neste tipo de rede um ponto de acesso fixo coordena a transmissão de informações entre os demais nós componentes da rede. A principal normatização utilizada para WLANs é a norma IEEE 802.11.

### 3.2.Redes sem Fio de Acesso Local

As redes de computador sem fio podem oferecer um vasto número de funcionalidades que vão desde o acesso à internet em movimento até a integração de equipamentos móveis, por natureza.

Em uma WLAN, o endereçamento de um equipamento não corresponde, necessariamente, a sua localização geográfica, dado a sua potencial mobilidade. Também por este motivo é preciso lidar com topologias dinâmicas de redes, onde a conectividade pode ser eventualmente restrita, com o agravante de que os sinais transmitidos sem fio não tem uma fronteira de alcance definida e têm alta propensão a erros.

Dados estes fatores, surge a demanda da elaboração de uma rede confiável, construída sobre um canal inerentemente não confiável. Na prática, a credibilidade dos dados transmitidos em uma rede sem fio é estabelecida através da utilização de protocolos confiáveis na camada MAC, os quais acabam escondendo a baixa confiabilidade presente na camada física. [MURTHY,2004]

### 3.3.IEEE 802.11

Quando uma WLAN é utilizada, é comum que se vise simplicidade para estabelecer conexões e baixo consumo na operação, uma vez que os dispositivos conectados serão, em sua maioria, móveis e alimentados por baterias. Ainda é importante que a transmissão de informações seja tolerante às interferências causadas por outras redes sem fio na vizinhança e que as informações sejam transmitidas de forma segura. Por estas razões, os dispositivos preparados para este tipo de rede seguem uma normatização, sendo a norma mais popularmente utilizada a IEEE 802.11.

O IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) definiu um conjunto de normas para as redes de dados sem fios, conhecida como família IEEE 802.11. Um breve resumo de todas as normas da família IEEE 802.11:

- **IEEE 802.11a:** A norma 802.11a foi criada para operar na faixa dos 5.2GHz, apresentando transmissão de dados até 54Mbit/s. Foi ratificada em 1999 e comercializada em 2002. Usa o esquema de codificação OFDM.
- **IEEE 802.11b:** A norma 802.11b foi desenvolvida inicialmente para expandir a capacidade da norma original 802.11 de 1997, utilizando a banda de frequência de 2,4GHz, sendo, assim, compatível com a sua antecessora 802.11, consegue transmitir até 11Mbit/s.
- **IEEE 802.11c:** A norma 802.11c, surgiu para criar especificações da camada MAC (Media Access Control) diretamente para a ISO/IEC (*International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission*) (norma IEEE 802.1D).
- **IEEE 802.11d:** Adicional à camada MAC, a norma 802.11d foi criada para promover a utilização global da norma 802.11, fazendo cumprir a regulamentação necessária em cada país.
- **IEEE 802.11e:** A 802.11e surgiu para melhorar a qualidade de serviço ao nível da camada MAC, permitindo melhores serviços de voz, vídeo e áudio em WLANs.
- **IEEE 802.11f:** A 802.11f, foi desenvolvida para resolver alguns problemas na implementação do hardware que constitui os Pontos de Acessos e respectivos

sistemas de distribuição. Seu objetivo é resolver alguns conflitos de compatibilidade entre fabricantes.

- **IEEE 802.11g:** A norma 802.11 visa essencialmente a criação de uma extensão da norma IEEE 802.11b, mantendo compatibilidade com a mesma e com os equipamentos já em funcionamento. Utiliza esquema de codificação OFDM na banda dos 2.4GHz e 5.2GHz, com transmissão máxima de 54Mbit/s por link e por canal.
- **IEEE 802.11h:** A norma 802.11h foi criada para melhorar a utilização das camadas físicas e de controle de acesso ao meio da norma 802.11a nos 5.2GHz, permitindo melhor supervisão e controle da rede a nível de canais ocupados e potências de emissão.
- **IEEE 802.11i:** A norma IEEE 802.11i visa melhorar a segurança das redes de dados sem fios com diferentes métodos de criptografia e processos de autenticação.

### 3.4.Arquitetura de Redes

Uma rede sem fio pode ser caracterizada, por sua arquitetura, como Rede Baseada em Infraestrutura, como ilustrado na Figura 5, e LAN Ad Hoc, conforme exemplifica a Figura 6.

Em uma rede baseada em infraestrutura existem nós especiais chamados Pontos de Acesso (PAs), os quais são conectados à redes com fio existentes. Os PAs são especiais no sentido de que eles estão conectados tanto à rede sem fio como à rede comum, podendo servir como ponte entres as duas.

Figura 5. Rede Baseada em Infraestrutura



Fonte: <http://linkpb.net/>

As LANs Ad Hoc, por outro lado, não necessitam uma topologia fixa, podendo ser estabelecidas em qualquer lugar. Nesta arquitetura os nós comunicam-se diretamente entre si ou passam mensagens através de outros nós que estejam diretamente acessíveis.

**Figura 6. Rede Ad-Hoc**



**Fonte:** <http://linkpb.net/>

## 4 MODELOS DE PROPAGAÇÃO PARA INTERIORES

Quando se pretende implantar um sistema de redes de dados em fio, é importante que se faça um estudo da propagação dos sinais, no ambiente onde a rede irá funcionar, estimando a cobertura dos PAs.

Para estimar a atenuação do sinal é possível utilizar vários modelos de propagação, destinados a ambientes específicos, uma vez que não é comum a utilização de um modelo genérico para todos os tipos de ambientes. A maior parte dos modelos teóricos de propagação fornece um valor médio da atenuação do sinal, tornando necessário o conhecimento de sua estatística, para que a rede possa ser dimensionada de modo a garantir a qualidade e a confiabilidade da cobertura.

Conforme visto na seção 2.2, as ondas eletromagnéticas se propagam de diversas formas, de modo que, mesmo em situação onde não exista linha de visada entre o PA e o TM (Terminal Móvel), seja possível estabelecer conexão à rede sem fio.

Os modelos de propagação ainda podem ser divididos em duas categorias, conforme a sua base de estudo:

**Modelos Empíricos:** são baseados em medidas, relacionando basicamente atenuação de sinal e distância.

**Modelos Teóricos:** levam em consideração os dados topográficos do ambiente de propagação das ondas, resultando em relações mais complexas do que as observadas nos modelos empíricos.

Os modelos empíricos trazem resultados que se ajustam melhor à realidade, pois contabilizam maior gama dos fatores que afetam a atenuação dos sinais transmitidos, no entanto, por se tratarem de situações específicas, previamente estudadas, acabam por tornar-se um tanto mais limitados.

Já os modelos teóricos são mais genéricos, por serem baseados em princípios físicos, possibilitando um uso mais abrangente. No entanto, os resultados obtidos através destes modelos tendem a ser mais distantes da realidade, dada a dificuldade em contabilizar todos os parâmetros que influem na propagação do sinal.

Os modelos utilizados atualmente acabam sendo modelos híbridos, que levam em consideração situações específicas e conhecidas, mas também são influenciados pelos dados topográficos do meio, buscando, assim, o melhor dos dois tipos de modelos, trazendo resultados próximos à realidade, com razoável flexibilidade.

Como não existem modelos largamente utilizados que abranjam todos os tipos de ambiente, é comum que os modelos utilizados sejam divididos em modelos de propagação em ambientes interiores e exteriores. Dado que as redes sem fio são implementadas, na grande maioria das situações, em ambientes interiores, é neste tipo de ambiente que está o foco deste trabalho.

Em uma propagação realizada em ambientes interiores é comum que não exista linha de visada entre o PA e o TM, de modo que a propagação dos sinais se dá, fundamentalmente, por reflexão e espalhamento nas paredes e por difração nas zonas laterais das divisórias.

### 4.1. Modelo de Atenuação em Espaço Livre

O modelo de atenuação em espaço livre consiste no modelo mais simplificado de atenuação, no qual se considera que existe linha de visada entre o PA e o TM e que esta é a única forma de transmissão de sinais entre eles, assumindo, assim, um ambiente ideal. Este

modelo consiste na base sobre a qual todos os demais são construídos, sendo de grande importância, mesmo que seus resultados sejam os mais distantes de uma realidade de ambientes interiores.

Neste modelo, a atenuação do sinal (*Path Loss*) é expressa apenas como a fração da potência da onda transmitida que chega ao receptor, por um determinado percurso. Em espaço livre, a energia irradiada por uma antena omni-direcional é espalhada sobre a superfície de uma esfera de raio  $d$ , cuja área é  $(4\pi d)^2$  [LASSONEN, 2003] como pode ser observado na equação (11). Desta forma, a potência recebida  $P_R$  é expressa pela Equação de Friis.

$$P_R = P_T \cdot G_T \cdot G_R \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \quad (11)$$

Onde  $P_T$  é a potência transmitida,  $G_T$  e  $G_R$  são os ganhos no transmissor e no receptor, respectivamente,  $d$  é a distância entre transmissor e receptor e  $\lambda$  é o comprimento de onda do sinal. Conforme a equação de Friis, a atenuação de uma onda eletromagnética em espaço livre  $A_0$  pode ser calculada como mostra a equação (12).

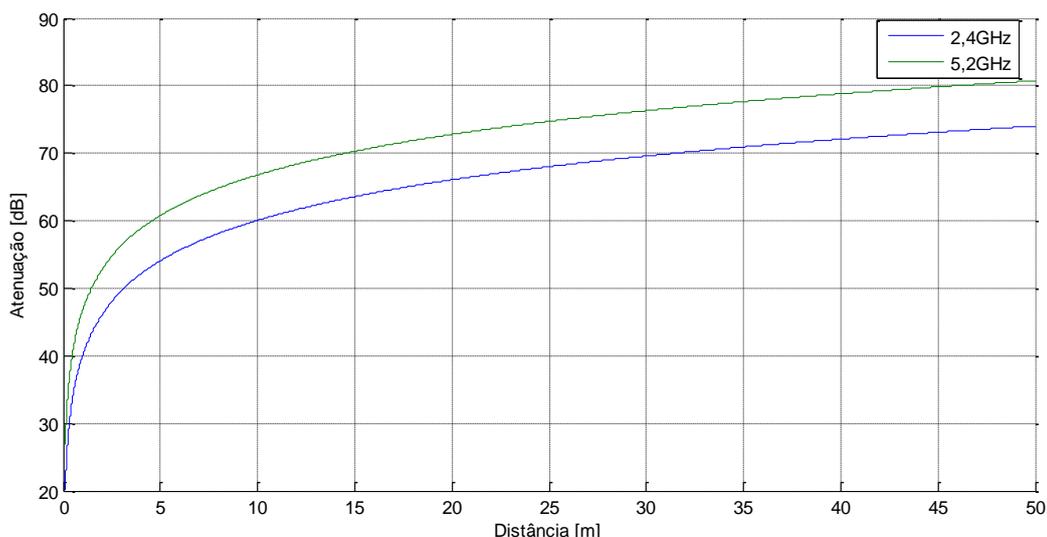
$$A_0 = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \quad (12)$$

Ainda, é conveniente que esta atenuação seja expressa em dB, conforme expresso na equação (13).

$$A_{0[dB]} = -20 \cdot \log \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right) \quad (13)$$

O modelo de atenuação em espaço livre, por se distanciar da realidade de propagação, serve como aferição inicial de perdas, permitindo que sejam feitas as primeiras estimativas sobre a rede que se pretende implementar. Na Figura 7 é mostrado o comportamento da atenuação do sinal neste modelo, considerando as possíveis frequências da norma IEEE 802.11g.

Figura 7. Atenuação em Espaço Livre para frequências de 2,4GHz e 5,2GHz



Como pode ser observado na Figura 7, a uma distância de aproximadamente 5 metros entre emissor e receptor, a atenuação já chega a ser cerca de 7 dB superior para a frequência de 5,2GHz, em relação à frequência de 2,4GHz. Deste modo, é possível concluir que, nos outros modelos, os quais são baseados neste, existirá uma diferença de atenuação entre as duas bandas, repercutindo na cobertura que os dois sistemas são capazes de proporcionar. No entanto, sabe-se que existem outras variáveis que irão influenciar esta cobertura, as quais serão consideradas nos modelos que seguem.

#### 4.2. Modelo de Atenuação Recomendado pela ITU- R P.1238-1

Em 2003, a ITU publicou uma recomendação para que fossem modelados os efeitos da propagação de ondas de rádio, no que diz respeito à atenuação de sinais, sendo esta identificada como Recomendação ITU-R P1238-1 [ITU]. Esta recomendação considera que, para que seja planejada a cobertura de um sinal de rádio, é necessário que se possuam dados exatos acerca da construção da planta onde se deseja realizar a implementação, no que diz respeito ao material utilizado para a construção, geometria e mobília, além dos diagramas de irradiação das antenas utilizadas. Entretanto, para que se faça um estudo preliminar, onde se deseja definir o número de PAs que se necessita para que a área de interesse seja coberta de forma eficiente, é apresentado um modelo, no qual é recomendado o uso da equação (14).

$$A_{ITU[dB]} = 20 \cdot \log(f_{[MHz]}) + N \cdot \log(d_{[m]}) + L_{f[dB]} \cdot (n_p) - 28 \quad (14)$$

Onde  $f$  é a frequência do sinal transmitido,  $N$  é o coeficiente de perdas de potência com a distância,  $d$  é a distância entre emissor e receptor,  $L_f$  é o fator de perdas de penetração dos pisos e  $n_p$  é o número de pisos entre o emissor e o receptor.

A Recomendação ITU-R P1238-1 fornece tabelas, obtidas através de medidas, para os parâmetros  $N$  e  $L_f$ , em várias frequências. Para o estudo neste projeto, os valores destes parâmetros, nas bandas de interesse, são mostrados nas Tabela 2 e Tabela 3.

Tabela 2. N – Coeficiente de perdas de potência.

Frequência [GHz]	Residencial	Escritório	Comercial
1,8 – 2,4	28	30	22
5,2	-	31	-

Tabela 3.  $L_f$  – Fator de perdas de penetração dos pisos.

Frequência [GHz]	Residencial	Escritório	Comercial
1,8 – 2,4	$4 \times n_p$	$15 + 4 \times (n_p - 1)$	$6 + 3 \times (n_p - 1)$
5,2	-	16	-

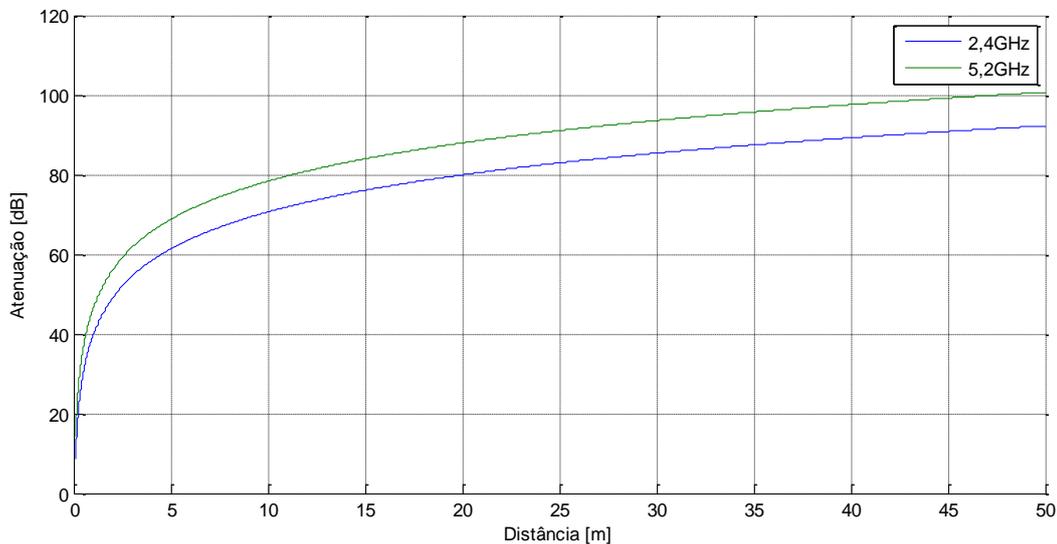
Ainda, é fornecido pela Recomendação ITU-R P1238-1, o desvio padrão esperado para alguns tipos de ambientes, em relação à média de atenuação, fornecida pelo modelo, conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4. Desvio padrão do desvanecimento log-normal.

Frequência [GHz]	Residencial	Escritório	Comercial
1,8 – 2,4	8	10	10
5,2	-	12	-

Considerando, um ambiente interno de laboratório, que pode ser assemelhado a um escritório, contendo PAs e TMs em um único piso, são obtidas curvas de atenuação do sinal transmitido, conforme este modelo. Estas curvas são mostradas na Figura 8.

Figura 8. Atenuação conforme ITU-R 1238-1 para frequências de 2,4GHz e 5,2GHz



Como pode ser observado na Figura 8, a uma distância de aproximadamente 5 metros entre emissor e receptor, a atenuação já chega a ser cerca de 7 dB superior para a frequência de 5,2GHz, em relação à frequência de 2,4GHz, conforme foi observado no modelo de atenuação em espaço livre, mostrado na Figura 7.

### 4.3. Modelo de Atenuação de Um Degrau

O modelo de atenuação de um degrau considera a dependência linear entre as perdas de percurso e a distância logarítmica, analisando a propagação como um todo, onde a atenuação proveniente das paredes e pisos são quantificadas através de um índice de decaimento de potência, sendo expresso pela equação (15).

$$A_{1d[dB]} = A_{1[dB]} + 10 \cdot n \cdot \log(d_{[m]}) \quad (15)$$

Onde  $A_1$  representa a atenuação do sinal a uma distância de 1 metro do PA,  $n$  é o índice de decaimento de potência e  $d$  é a distância entre o emissor e o receptor.

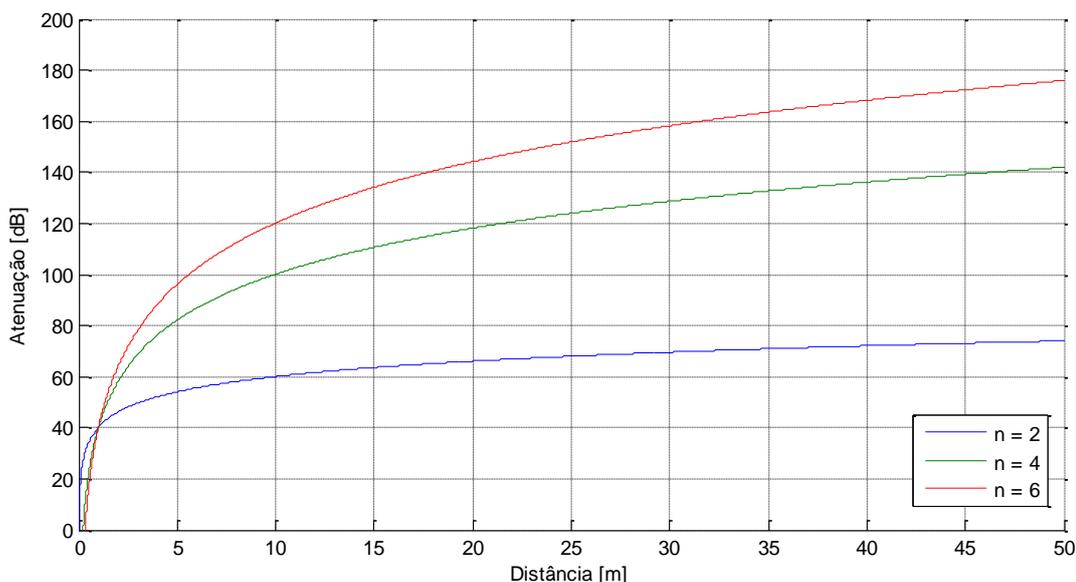
O valor do índice de decaimento de potência depende do tipo de ambiente e, conforme aumenta o índice  $n$ , mais rapidamente o nível de sinal decai com a distância. Também é possível observar que para  $n = 2$ , a equação (15) é igual à expressão da atenuação de espaço livre. Ou seja, quando existe linha de visada desobstruída entre o emissor e receptor, este modelo usa  $n = 2$  e não é mais que a expressão de atenuação em espaço livre. Genericamente, na propagação de sinais rádio em interiores, o valor de  $n$ , pode variar entre 1,5 e 6 devido à presença de reflexões nas paredes e nos objetos contidos no meio de propagação. Existem valores estimados para vários tipos de ambiente, agrupados na Tabela 5, conforme [KEENAN,1990].

Tabela 5. Valores do índice de decaimento de potência para diversos ambientes.

Ambiente	Índice de Decaimento de Potência - $n$
Ambiente interior, com linha de visada livre	1,5 a 2
Ambiente interior, com linha de visada obstruída	2 a 4
Ambiente interior, com separação de 1 a 3 pisos, com obstrução de linha de visada.	4 a 6

A Figura 9 mostra a atenuação de um sinal de 2,4 GHz, conforme o modelo de um degrau, para três diferentes índices de decaimento de potência.

Figura 9. Atenuação de sinal de 2,4GHz, para índices de decaimento iguais a 2, 4 e 6.



Analisando a Figura 9 fica claro que a determinação do índice  $n$ , é de grande importância para os resultados obtidos, uma vez que os resultados obtidos são fortemente impactados por ele. Sendo assim, é interessante que se utilize uma forma de medir o valor deste índice, de modo que se utilize o modelo da forma mais próxima da realidade de cada aplicação. Esta forma de medição de  $n$  pode ser obtida a partir do método dos mínimos quadrados, aplicados à equação (15), conforme [KEENAN,1990]. O cálculo de  $n$  acaba sendo expresso conforme a equação (16)

$$n = \frac{\sum_{k=1}^N (10 \cdot \log d_k - \bar{D})(p_k - \bar{P})}{\sum_{k=1}^N (10 \cdot \log d_k - \bar{D})^2} \quad (16)$$

Onde  $N$  é o número de medições efetuadas,  $d_k$  são as distâncias entre o transmissor e os pontos medidos,  $p_k$  é a potência em cada ponto medido,  $\bar{D}$  é a média das distâncias e  $\bar{P}$  é a média das potências medidas.

#### 4.4. Comparação dos Modelos Teóricos Avaliados

Vistos os três modelos mais utilizados para propagação de sinais em ambientes interiores, é interessante que se faça uma comparação entre os resultados obtidos, considerando alguns cenários básicos.

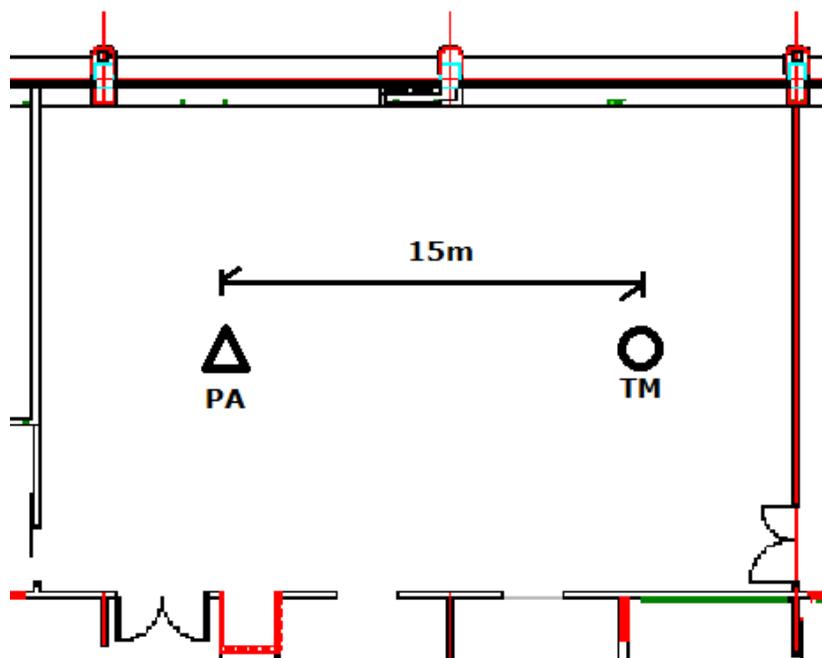
Para esta comparação, será utilizado um sinal transmitido na banda de 2,4GHz em três cenários.

- **Cenário 1:** Linha de visada direta. O PA e o TM estão em um ambiente sem obstáculos;
- **Cenário 2:** Linha de visada obstruída em um mesmo andar. O PA e o TM estão separados por uma parede;
- **Cenário 3:** Linha de visada obstruída em andares diferentes. O PA e o TM estão localizados em diferentes andares.

#### 4.4.1. Cenário 1 – Linha de Visada Direta

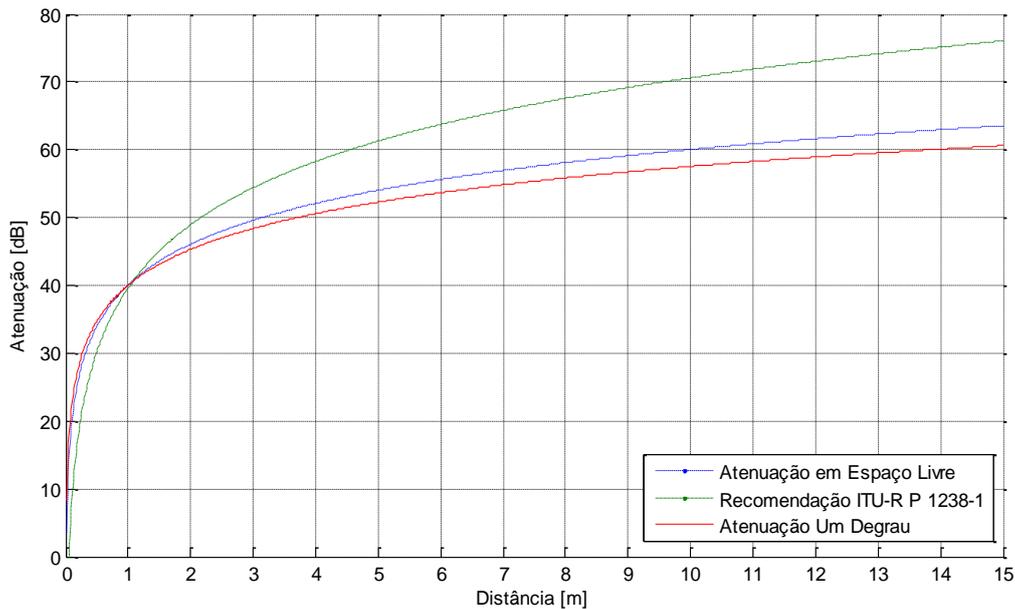
Neste cenário, é considerado um ambiente em que o emissor e o receptor estão na mesma sala, separados por uma distância de 15 m. Conforme mostra a Figura 10.

Figura 10. Planta ilustrativa do cenário 1.



Na situação especificada têm-se um índice de decaimento de potência do sinal que pode variar entre 1,5 e 2, conforme a Tabela 5. Será adotado o valor  $n = 1,75$  por se tratar do valor intermediário aos dois limites. Sendo assim, são obtidas as curvas mostradas na Figura 11.

Figura 11. Cenário 1 – Linha de visada direta.



É possível observar na Figura 11 que os modelos de Atenuação em Espaço Livre e de Atenuação de Um Degrau trazem respostas muito similares, justamente pela utilização de um índice de decaimento de potência que aproxima os dois modelos, conforme abordado na seção 4.3. No entanto, o modelo da Recumendação ITU-R P 1238-1, difere dos dois demais modelos por considerar o fator  $N$  (coeficiente de perda de potência, conforme o tipo de ambiente).

#### 4.4.2. Cenário 2 – Linha de Visada Obstruída, em um Mesmo Andar

Neste cenário é considerado que o emissor e o receptor estão separados por uma parede, a uma distância de 15m, conforme mostrado na Figura 12.

Nesta situação têm-se um índice de decaimento de potência do sinal que pode variar entre 2 e 4, conforme a Tabela 5. Será adotado o valor  $n = 3$  por se tratar do valor intermediário aos dois limites. Sendo assim, são obtidas as curvas mostradas na Figura 13.

Figura 12. Planta ilustrativa do cenário 2.

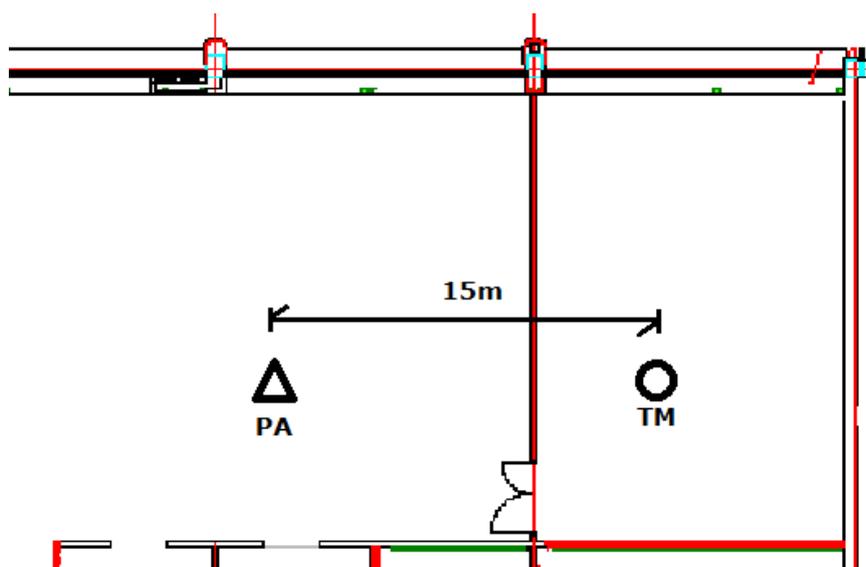
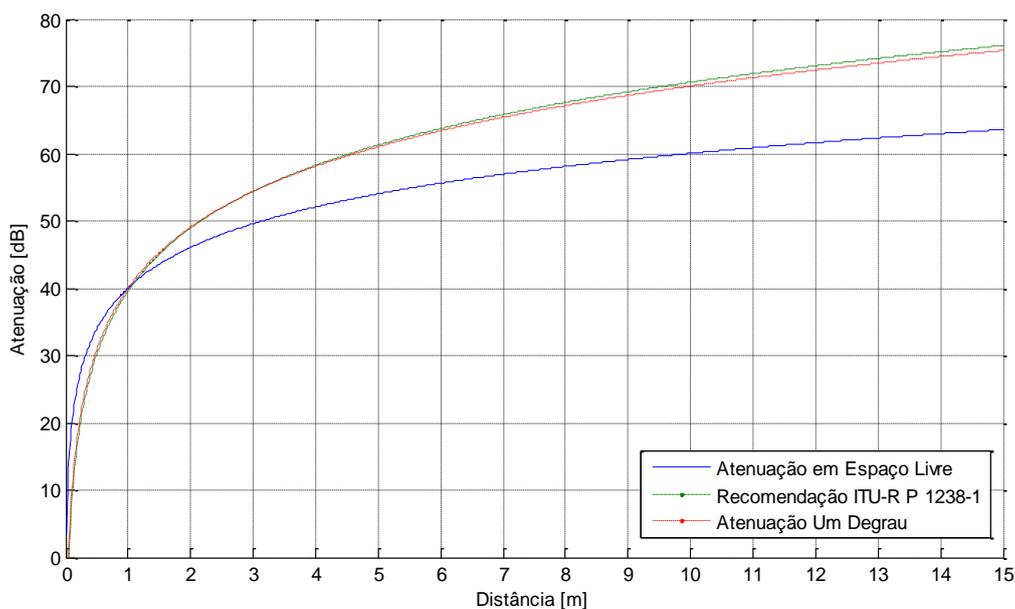


Figura 13. Cenário 2 – Linha de visada obstruída, em um mesmo andar.



É possível observar na Figura 13 que os modelos da Recomendação ITU-R P 1238-1 e de Atenuação de Um Degrau trazem respostas muito similares, justamente pela utilização de um índice de decaimento de potência que aproxima os dois modelos, conforme abordado na seção 4.3. No entanto, o modelo de atenuação em Espaço Livre, difere dos dois demais modelos por não considerar a obstrução do sinal.

#### 4.4.3. Cenário 3 – Linha de Visada Obstruída, em Andares Diferentes

Para este cenário se considera que o emissor e o receptor estão separados por um pavimento, a uma distância de 15m, conforme mostrado na Figura 14.

Nesta situação têm-se um índice de decaimento de potência do sinal que pode variar entre 4 e 6, conforme a Tabela 5. Será adotado o valor  $n = 4$  por se tratar do menor valor, na situação em que se considera o menor número de pavimentos previsto. Além disso, para o modelo da Recomendação ITU-R 1238-1, utiliza-se  $n_p = 1$ . Sendo assim, são obtidas as curvas mostradas na Figura 15.

Figura 14. Planta ilustrativa do cenário 3.

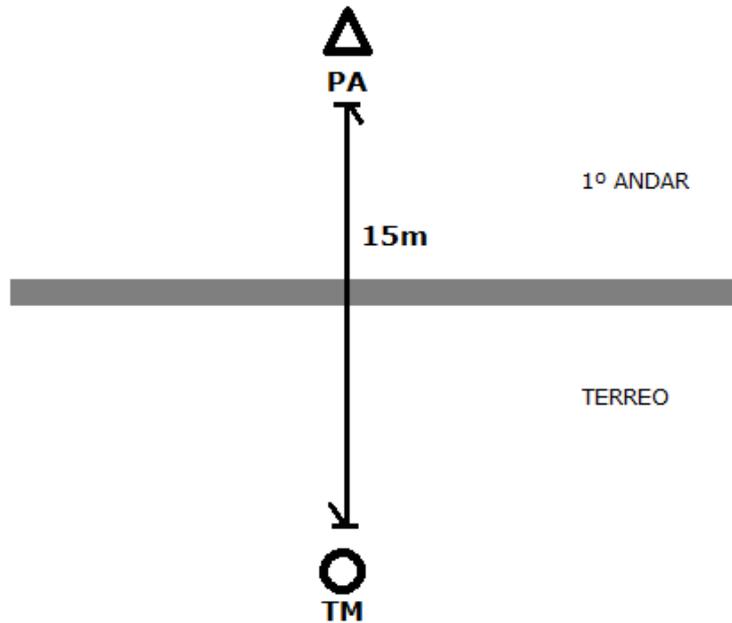
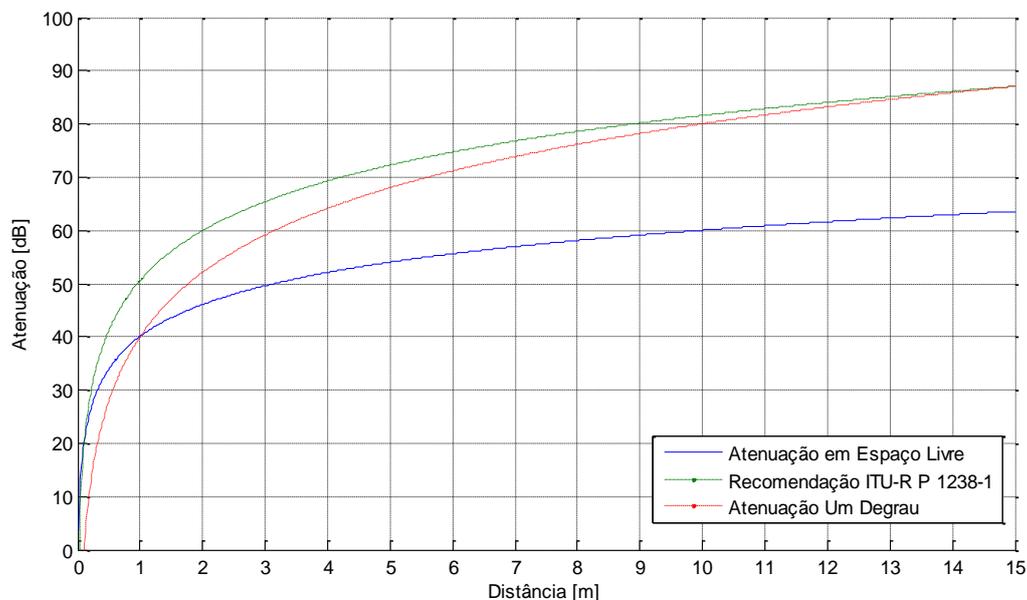


Figura 15. Cenário 3 – Linha de visada obstruída, em andares diferentes.



Analisando as curvas obtidas na Figura 15, é possível verificar, que assim como no Cenário 2, as curvas obtidas pelo modelo da Recomendação ITU-R P 1238-1 e de Atenuação de Um Degrau, trazem respostas similares, principalmente a partir dos 10 m, sendo as duas bastante distantes do modelo de Atenuação em Espaço Livre.

## **5 MEDIÇÕES REALIZADAS NA BANDA DE 2,4GHz**

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir de uma série de medições realizadas no laboratório onde se fará a implementação da rede sem fio. O ambiente abrangido é bastante diversificado, devido aos variados tipos de equipamentos encontrados nele.

O principal objetivo deste capítulo é a obtenção de valores medidos de atenuação de sinal, para que possa ser feita uma comparação com os valores teóricos, obtidos ao longo do capítulo 4, tornando possível a discussão destes resultados medidos frente ao previsto teoricamente, realizada no capítulo 6.

O cenário de estudo é mostrado na Figura 16, o qual é composto por um corredor que abrange toda a extensão do laboratório, seis salas onde não são utilizados equipamentos e cinco grandes salas, as quais são os laboratórios, propriamente ditos, com presença de diversos equipamentos analíticos, como cromatógrafos e balanças, por exemplo.

Para realização deste estudo, foi realizada a instalação de quatro PAs, com o intuito de fazer uma cobertura eficiente de 51 TMs, sendo estes distribuídos conforme mostra a Figura 17.

A Figura 17 mostra a identificação de cada PA e de cada TM, através de números, para que os mesmos possam ser facilmente identificados na apresentação dos resultados medidos.

Figura 16. Laboratório onde será feita a implementação da rede sem fio.

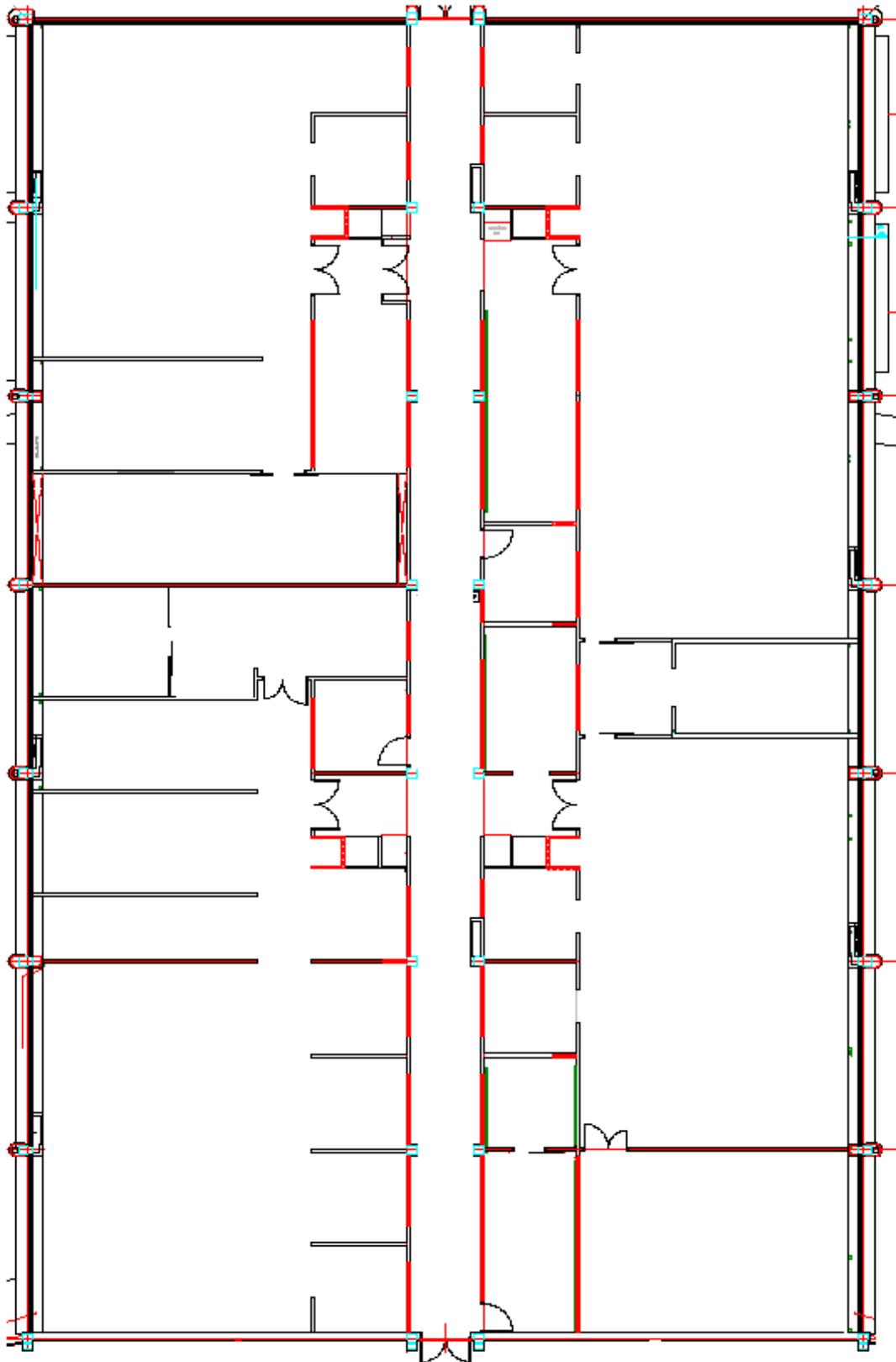
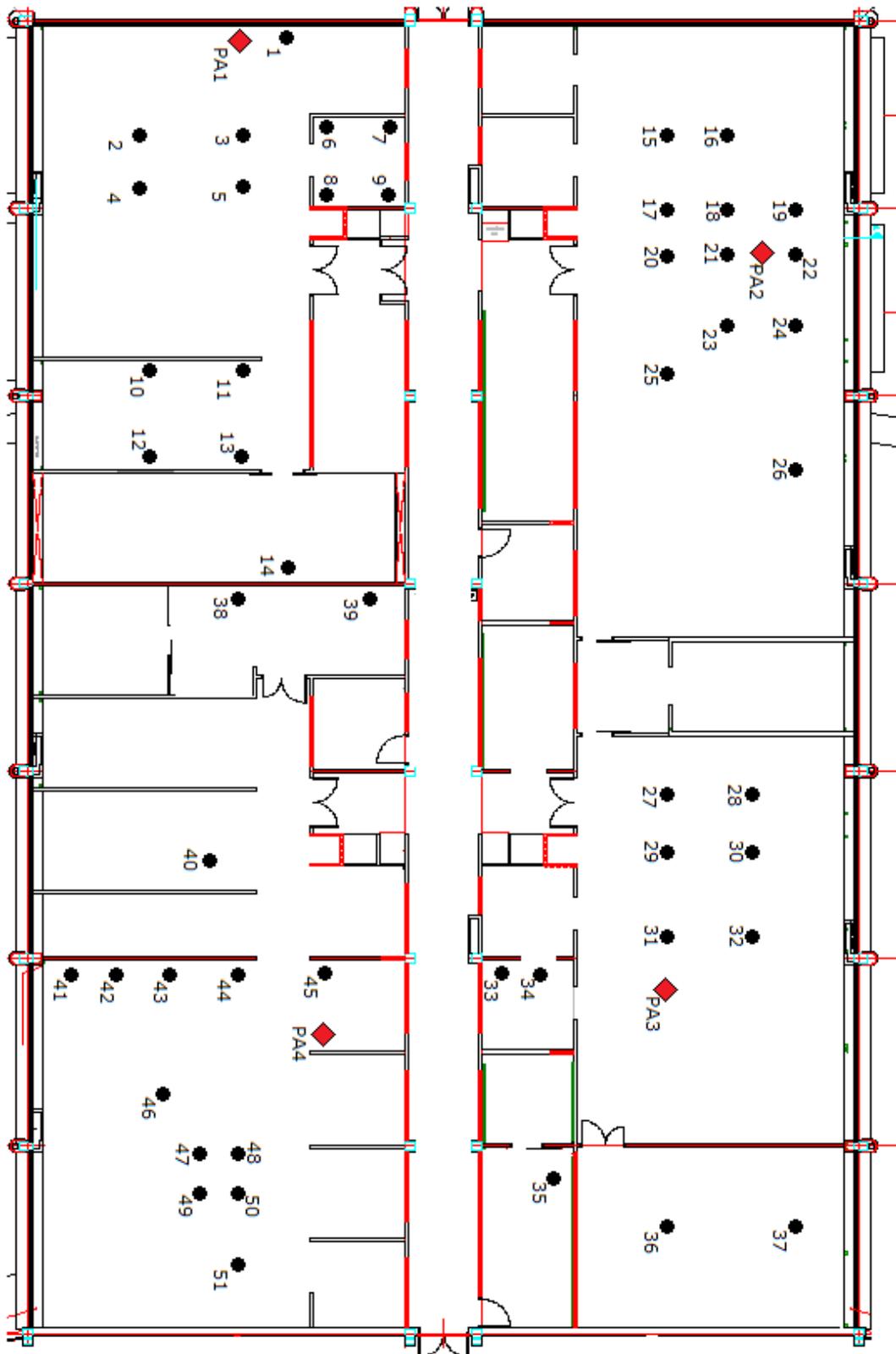


Figura 17. Identificação dos PAs e TMs no laboratório.



## 5.1. Hardware e Software Utilizados nas Medições

Para a realização das medições foram utilizados um ponto de acesso comercial e computador portátil, como receptor móvel. Ainda, foi utilizado um software de monitoramento de sinais de WLANs.

### 5.1.1. Ponto de Acesso

O ponto de acesso utilizado foi um roteador wireless DLINK DI-524, conforme é mostrado na Figura 18. As especificações deste equipamento estão compiladas na Tabela 6.

Figura 18. Ponto de Acesso Wireless – DLINK DI-524



Fonte: <http://www.dlink.com.br> ACESSADO EM 01/06/2013

Tabela 6. Especificações do Ponto de Acesso

Normas Suportadas	IEEE 802.11b e IEEE 802.11g
Canais	Seleção de 14 canais dentro da banda de 2.4GHz
Antena	Dipolo - SMA reversa destacável
Sensibilidade	-68 dBm @ 54 Mbps
Potência Máxima de transmissão Wireless	17 dBm

### 5.1.2. Terminal Móvel

O terminal móvel utilizado para a realização das medições foi um computador móvel Samsung Ultrabook Series 5, o qual conta com uma antena embutida, com processador Intel® Core i7 e sistema operacional Windows® 8. As especificações do terminal móvel estão compiladas na Tabela 7.

**Figura 19. Terminal Móvel – Samsung Ultrabook Series 5**



Fonte: <http://www.samsung.com.br> ACESSADO EM 01/06/2013

© 2011 UWHS

**Tabela 7. Especificações do Terminal Móvel**

Normas Suportadas	IEEE 802.11 a/b/g/n
Canais	Seleção de 14 canais dentro da banda de 2.4GHz
Sensibilidade	-80 dBm @54 Mbps
Potência Máxima de transmissão Wireless	22 dBm

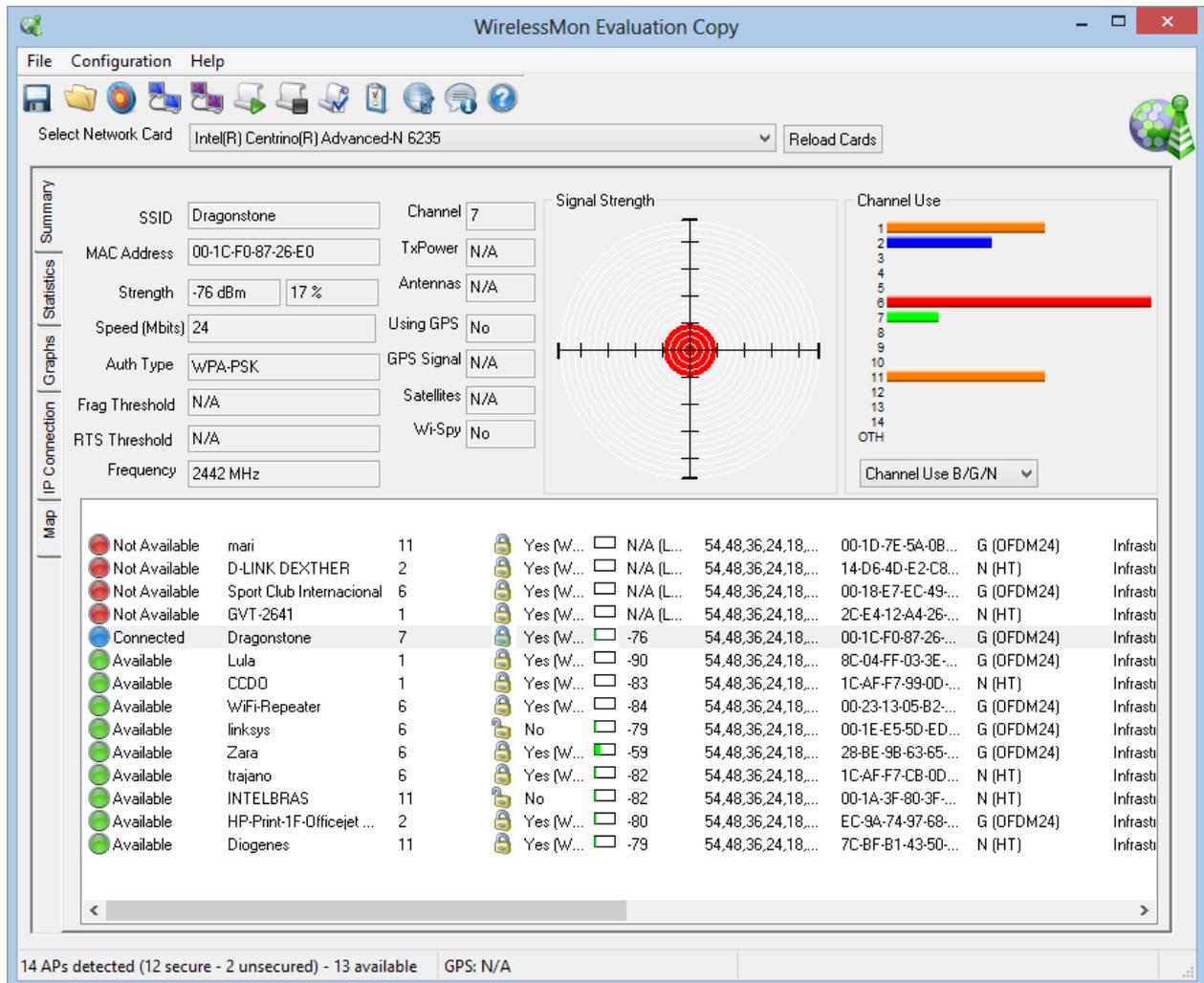
Fazendo uma comparação entre a sensibilidade e a potência máxima de transmissão do ponto de acesso e do terminal móvel é possível chegar a uma atenuação máxima de aproximadamente 85 dB, para que seja estabelecido um enlace com qualidade e confiabilidade. Analisando as Figura 11, Figura 13 e Figura 15 é possível observar que esta atenuação máxima só é potencialmente atingida no Cenário 3, o qual não será parte do estudo das medições realizadas.

### 5.1.3. Software Utilizado para Medições

O software utilizado nas medições foi o WirelessMon V4.0, desenvolvido pela empresa PassMark™ Software em versão *Trial*, e trata-se de um software que realiza um rastreamento de

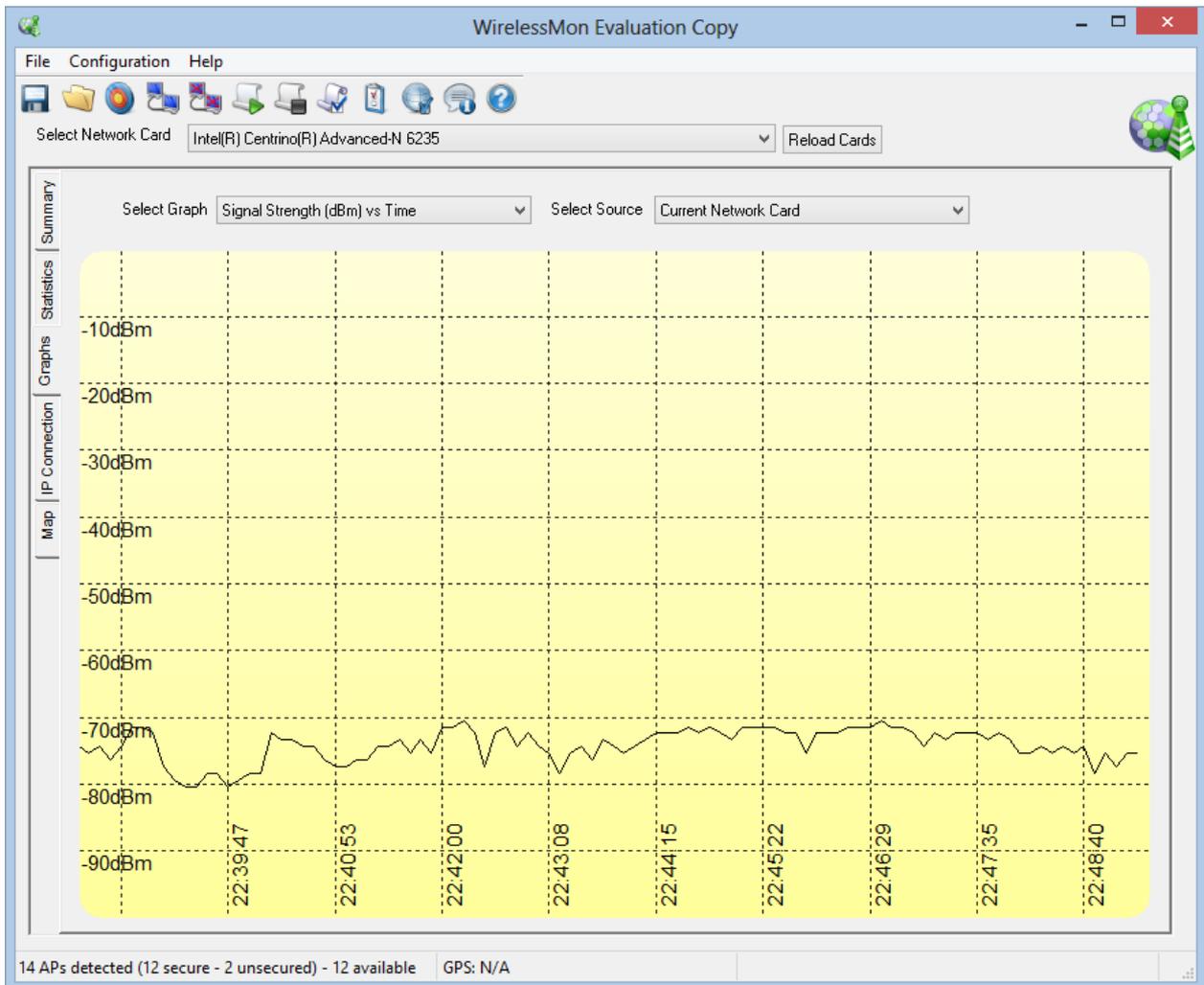
todos os canais de frequência utilizados na banda das WLAN que existam no local, realizando medidas de potência de sinal, conforme mostrado na Figura 20.

Figura 20. WirelessMon – Sumário



O software ainda traça gráficos relacionando atenuação com tempo, permitindo que se utilizem os valores médios em um intervalo para fazer a avaliação da atenuação do sinal, conforme mostra a Figura 21.

Figura 21. WirelessMon – Gráfico Atenuação vs Tempo



## 5.2. Método de Medição

Para a realização das medições, foi instalado o ponto de acesso nas posições especificadas previamente, conforme a Figura 17, levando-se o terminal móvel até cada um dos pontos especificados na mesma figura.

Uma vez que o diagrama de radiação da antena utilizada não é disponibilizado pelo fabricante, o terminal móvel foi mantido na mesma posição em relação ao PA em todas as medições.

Utilizando a interface gráfica disponível no WirelessMon, mostrada na Figura 21, foi avaliado o sinal recebido até que este se estabilizasse, e então, através da interface mostrada na Figura 20, foram anotadas as medições de potência em dBm para cada um dos pontos de interesse. Posteriormente as medições foram convertidas para seu valor de atenuação, em dB, levando em consideração a potência emitida pelo transmissor de 16 dBm.

### 5.3.Resultados Medidos

Os resultados obtidos a partir da metodologia descrita na seção 5.2, foram compilados na Tabela 8, onde foram consideradas as distâncias a partir do Ponto de Acesso mais próximo de cada Terminal Móvel.

Tabela 8. Resultados medidos

Identificação do TM	PA Avaliado	Distância (m)	N° de Obstáculos	Medição (dBm)	Atenuação (dB)
1	PA1	1	0	31	45
2	PA1	2.5	0	43	57
3	PA1	1.5	0	47	61
4	PA1	3	0	50	64
5	PA1	2.8	0	52	66
6	PA1	2.5	0	50	64
7	PA1	3	0	50	64
8	PA1	3.3	0	51	65
9	PA1	4	0	50	64
10	PA1	7.4	1	67	81
11	PA1	6.8	1	62	76
12	PA1	8.5	1	64	78
13	PA1	8.5	1	65	79
14	PA1	10.8	1	64	78
15	PA2	3.2	0	49	63
16	PA2	3	0	45	59
17	PA2	2.6	0	45	59
18	PA2	1.7	0	39	53
19	PA2	1	0	50	64
20	PA2	2.5	0	47	61
21	PA2	1.5	0	29	43
22	PA2	1	0	36	50
23	PA2	1.5	0	42	56
24	PA2	1.6	0	45	59
25	PA2	3.4	0	46	60
26	PA2	4	0	49	63
27	PA3	3.2	0	54	68
28	PA3	3.5	0	55	69
29	PA3	2.2	0	50	64
30	PA3	2.7	0	52	66

31	PA3	1	0	43	57
32	PA3	2	0	50	64
33	PA3	3.5	1	53	67
34	PA3	3	1	45	59
35	PA3	5	2	65	79
36	PA3	5.5	1	63	77
37	PA3	6	1	58	72
38	PA4	9	1	66	80
39	PA4	9	1	71	85
40	PA4	4.2	1	64	78
41	PA4	5.3	0	54	68
42	PA4	4.2	0	50	64
43	PA4	3.4	0	52	66
44	PA4	2.2	0	50	64
45	PA4	1.4	0	45	59
46	PA4	1.8	0	55	69
47	PA4	3.8	0	54	68
48	PA4	2.8	0	45	59
49	PA4	4	0	54	68
50	PA4	3.2	0	52	66
51	PA4	4.8	0	52	66

## 6 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo são apresentadas comparações entre os valores medidos de atenuação e os valores calculados a partir dos modelos teóricos apresentados no Capítulo 4.

A partir dos valores medidos, compilados na Tabela 8, é possível fazer uma comparação entre os modelos teóricos em cada cenário proposto e os resultados experimentais.

Na Figura 22, são trazidos os resultados que se referem ao que foi proposta como Cenário 1, ou seja, nas situações em que não há obstáculos entre emissor e receptor do sinal. Também é trazida a curva logarítmica obtida a partir dos valores medidos e as curvas dos modelos teóricos.

No caso da Figura 22 é possível observar que a curva obtida pelas medições se aproxima do modelo proposto pela ITU, na Recomendação ITU-R P 1238.1, mostrando que, dentre os modelos teóricos propostos, este se aproxima mais dos resultados. Também é possível concluir que os parâmetros de coeficiente de perdas de potência com a distância e o fator de penetração em pisos, utilizados estão de acordo com a realidade evidenciada experimentalmente.

Na Figura 23, são trazidos os resultados referentes ao que foi definido como Cenário 2, ou seja, na situação em que existe um obstáculo entre a antena e o receptor do sinal.

No caso da Figura 23 já se percebe maior distanciamento entre os resultados das medições e as curvas dos modelos teóricos, entretanto, é possível perceber uma proximidade das medições com os modelos da Recomendação ITU-R P 1238-1 e da Atenuação de Um Degrau, mantendo um distanciamento constante entre estas curvas e a obtida a partir das medições realizadas.

Analisando os dois cenários pode-se perceber a proximidade aos dois pelo modelo teórico da Recomendação ITU-R P 1238-1, o que traz a conclusão que este modelo tem maior aproximação com os resultados reais, mesmo tendo sido usados valores estimados dos parâmetros da equação que representa o modelo.

Figura 22. Comparação Medições e Modelos Teóricos – Cenário 1

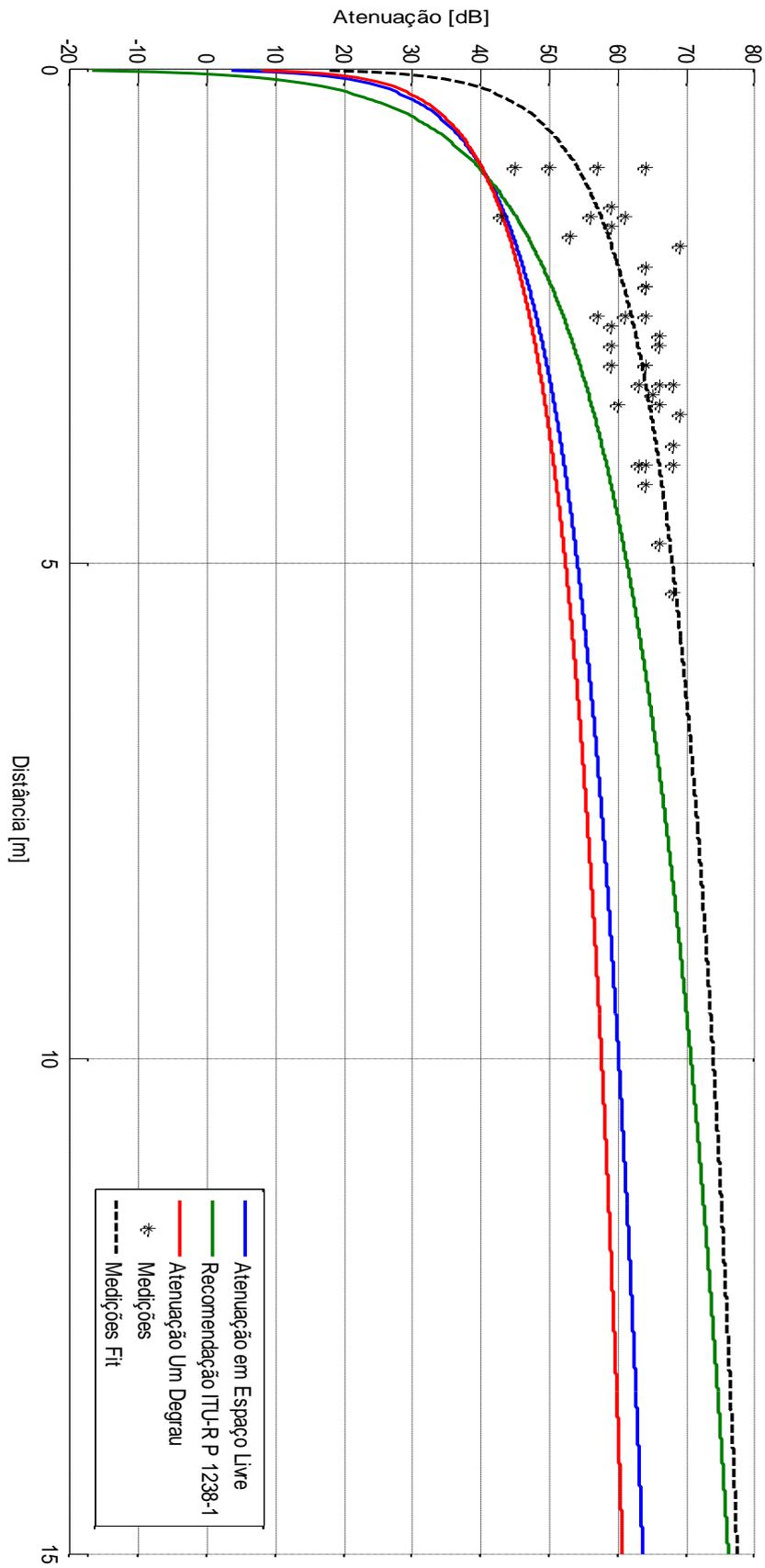
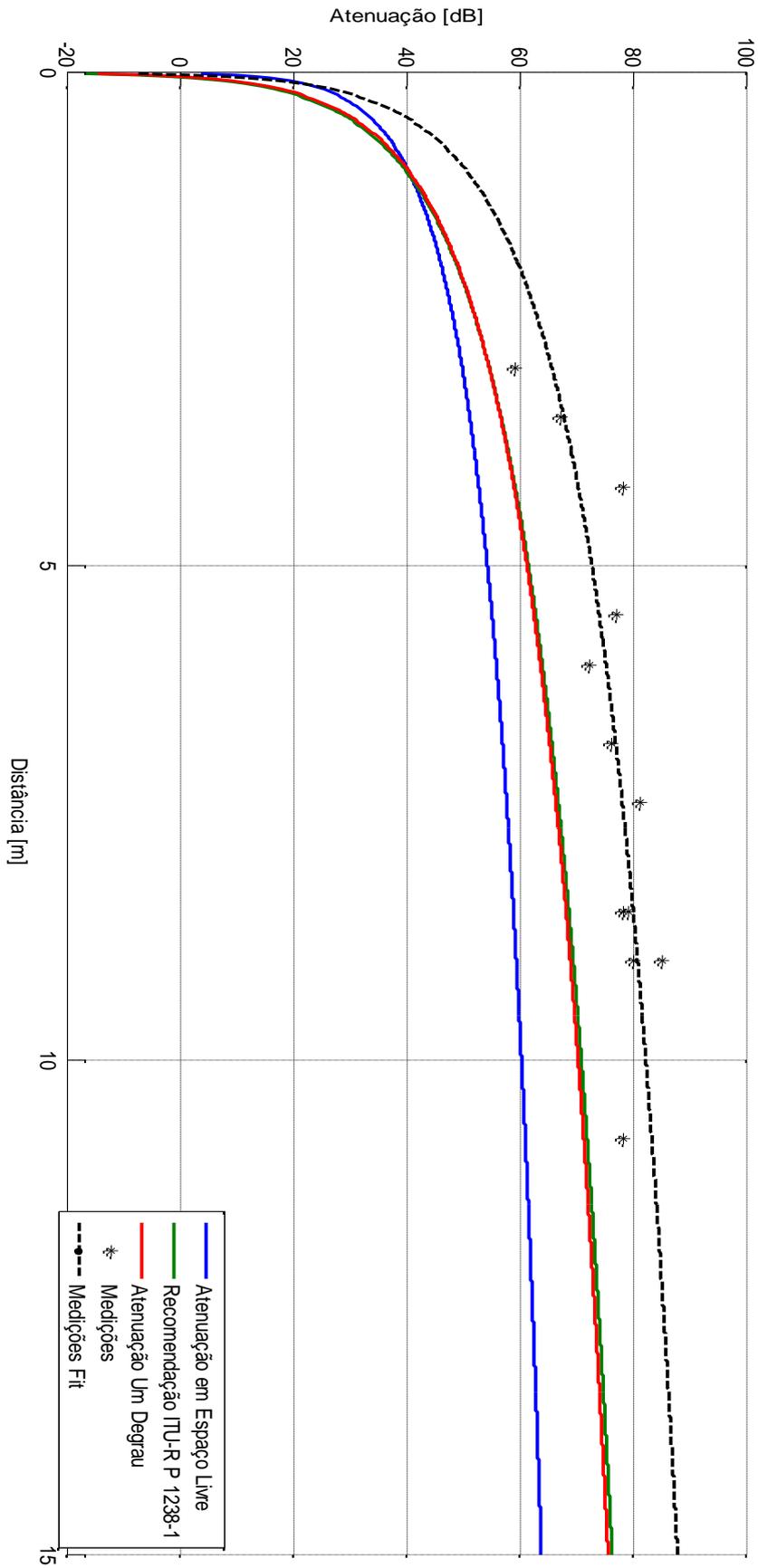


Figura 23. Comparação Medições e Modelos Teóricos – Cenário 2



## CONCLUSÃO

Neste trabalho foram abordadas áreas relacionadas com a implementação de redes *wireless*, como as formas de propagação das ondas eletromagnéticas e as técnicas de modulação das informações transmitidas. Estas áreas representam os fundamentos básicos da transmissão das informações em fio, sendo a base teórica do trabalho desenvolvido.

Também foram vistas as características das redes de computadores, abordando as tecnologias de transmissão, as classificações quanto à abrangência das redes, focando nas redes sem fio e apresentando o padrão de comunicação sem fio IEEE 802.11, trazendo um breve resumo sobre cada uma das normas desta família.

Ainda foram apresentados e analisados três modelos teóricos de propagação de sinais, que são: Modelo de Propagação em Espaço Livre, Modelo ITU-R P 1238-1, recomendado pela União Internacional de Telecomunicações e o Modelo de Atenuação de Um Degrau, onde foi feita uma comparação entre os três modelos aplicados a três cenários propostos.

Por fim, foram realizadas medições na banda de 2,4 GHz, a partir de onde foi possibilitada a comparação entre resultados obtidos experimentalmente e as previsões teóricas.

O estudo foi realizado com a finalidade de avaliação da implementação de uma rede de computadores sem fio em um laboratório de química analítica, onde existe demanda de integração de um grande número de equipamentos. A partir das medições realizadas e de sua comparação com modelos teóricos foi possível verificar que a rede objetivada era de implementação possível e que, para implementações em outros laboratórios é possível estimar o número de PAs a partir dos modelos teóricos, uma vez que os seus resultados são bastante próximos à realidade medida.

Ainda foi possível concluir que, dentre os três modelos teóricos avaliados, o Modelo ITU-R P 1238-1, trouxe resultados mais próximos aos medidos nos dois cenários avaliados. Entretanto, para o modelo de Atenuação de Um Degrau, foi utilizado o índice de decaimento de potência  $n$  estimado. Com isso, abre-se espaço para um trabalho futuro, onde é possível utilizar os valores medidos para estimar, com maior precisão, o valor de  $n$ , de modo que se obtenham curvas que se aproximem ainda mais às medições realizadas.

Também para um trabalho futuro, é possível implementar um simulador de propagação de ondas através de MatLab® ou utilizando um compilador de linguagem C, para que além dos modelos teóricos e das medições, fossem obtidas curvas a partir de simulação da propagação de ondas na frequência de interesse de estudo no ambiente onde se deseja implementar a rede sem fio, tendo assim, mais resultados para comparações.

Além disso, é importante que seja levada em consideração a exposição das pessoas aos sinais da rede implementada, uma vez que os pesquisadores do laboratório estarão expostos durante quarenta horas por semana às ondas eletromagnéticas na frequência de aproximadamente 2,4 GHz. Os níveis considerados seguros pela ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações) estão estabelecidos na LEI N° 11.934, de 5 de maio de 2009, no entanto este documento dá foco apenas a riscos biológicos da exposição pontual por curtos períodos de tempo às ondas eletromagnéticas, não atentando para efeitos causados pela exposição prolongada às mesmas. Pesquisas apontam que a exposição prolongada à radiação eletromagnética nesta faixa de frequência pode trazer riscos ao sistema imunológico e danos em determinadas estruturas das células, como o DNA e os cromossomos, trazendo risco de câncer em casos extremos. Por esta razão, a avaliação da necessidade do uso de uma rede sem fio deve ser feita com cautela e a potência emitida, pelos pontos de acesso, controlada para que não sejam excedidos os limites estabelecidos pela ANATEL.

## BIBLIOGRAFIA

1. **FONTÁN, F.** *Modeling the wireless propagation channel: a simulation approach with MATLAB®*. John Wiley & Sons Ltd. 2008.
2. **ITU**, Recommendation ITU-R P.1238-3. *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, 2003.
3. **KEENAN, J., MOTLEY, A.**, *Radio coverage in Buildings*, Br.Telecom Technol.J. vol.8, no.1, 1990.
4. **LASSONEN, Kari.** *Radio Propagation Modeling*, University of Helsinki, Department of Computer Science, Faculty of Science, seminar talk of 22nd September, 2003.
5. **MOLISCH, A.** *Wireless Communications*. John Wiley & Sons Ltd. 2011.
6. **MURTY, C., MANOJ, B.** *Ad Hoc Wireless Networks: Architectures and Protocols*. Prentice Hall Professional Technical Reference. New Jersey, 2004.
7. **PEREIRA, C. E.** *Avaliação de Protocolos de Comunicação Wireless em Ambiente Industrial*. Fundação Empresa Escola de Engenharia. Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2009.
8. **RAPPAPORT, T.**, *Comunicações Sem Fio: Princípios e Práticas 2. Ed.* Pearson Prentice Hall. São Paulo, 2009.
9. **STALLINGS, W.**, *Wireless Communications & Networks 2. Ed.* Pearson Prentice Hall. New Jersey, 2005.