



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA  
E TECNOLOGIA DA PARAÍBA**  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Dissertação de Mestrado

**CARACTERIZAÇÃO DE COBERTURA DE  
SINAIS NA FAIXA DE 700 MHZ EM  
AMBIENTES *INDOOR***

Niedson Almeida Lemos  
Mestrando

Jefferson Costa e Silva, D.Sc.  
Orientador

Alfrêdo Gomes Neto, D.Sc.  
Co-orientador

Março, 2015

João Pessoa – PB



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA  
E TECNOLOGIA DA PARAÍBA**  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



# **CARACTERIZAÇÃO DE COBERTURA DE SINAIS NA FAIXA DE 700 MHZ EM AMBIENTES *INDOOR***

Niedson Almeida Lemos

Dissertação de Mestrado submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências no domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Eletromagnetismo Aplicado

Jefferson Costa e Silva, D.Sc.  
Orientador

Alfrêdo Gomes Neto, D.Sc.  
Co-orientador

João Pessoa – PB, março de 2015

©Niedson Almeida Lemos – nillharck@gmail.com

Niedson Almeida Lemos

# **CARACTERIZAÇÃO DA COBERTURA DE SINAIS NA FAIXA DE 700 MHZ EM AMBIENTES *INDOOR***

Dissertação de Mestrado submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências no domínio da Engenharia Elétrica.

## **BANCA EXAMINADORA**

Jefferson Costa e Silva, D.Sc. – IFPB

Orientador

Alfrêdo Gomes Neto, D.Sc. – IFPB

Co-orientador

Joabson Nogueira de Carvalho, D.Sc. – IFPB

Examinador Interno

José de Ribamar Silva Oliveira, D.Sc. – IFRN

Examinador Externo

João Pessoa – PB, março de 2015

©Niedson Almeida Lemos – nillharck@gmail.com

“Se fui capaz de ver mais longe, é porque me apoiei em ombros de gigantes.”

(Sir Isaac Newton)

---

# Agradecimentos

---

Aos meus pais, Paulo (*in memoriam*) e Fátima, pois, sem eles, nada seria.

À minha amada esposa Eweline, manancial inesgotável de inspiração, por toda paciência, apoio e compreensão durante meus momentos de estudo.

Ao meu amado e querido filho João Paulo, pela alegria de sua existência e por tornar-se parte fundamental de minha motivação maior.

Aos meus irmãos, Nadja e Nielington, pelo apoio de sempre.

Aos amigos de trabalho, Guilherme Ricardo, Josinaldo Januário, Danilo Araújo, Luiz Humberto “Killer” e Francisco Celestino pela contribuição contínua e pelo apoio logístico para a conclusão deste trabalho.

Aos professores Jefferson e Alfrêdo, pela orientação, motivação e contribuição substancial na elaboração deste trabalho.

Aos meus amigos de mestrado Joalle e Hillner, pela amizade, parceria e incentivo durante todo o curso.

À Maria do Carmo Frazão, pelo apoio e ajuda durante as campanhas de medições.

E aos demais professores, funcionários e amigos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEE do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba.

---

# Resumo

---

O planejamento de novas redes de comunicações sem fio, a exemplo da quarta geração de telefonia móvel celular (4G), representa um grande desafio ao incluir serviços cada vez mais avançados com diferentes requisitos de qualidade, suporte à mobilidade, altas taxas de transmissão e capacidades de tráfego elevadas. Os diversos ambientes nos quais essas redes operam e os fenômenos associados a eles produzem diversos efeitos no comportamento do sinal recebido e, conseqüentemente, uma variação no desempenho dos enlaces de comunicação via rádio. Por conseguinte, esses efeitos devem ser avaliados corretamente, de tal forma que o dimensionamento da rede atenda aos requisitos de qualidade regulamentados.

O presente trabalho tem por objetivo estabelecer a caracterização da cobertura de sinais de comunicação sem fio em ambientes *indoor* na faixa de frequência em torno de 700 MHz. Essa banda foi escolhida devido a sua destinação para ser utilizada pelos sistemas de comunicação em banda larga 4G/LTE no Brasil. Desta forma, foram realizadas simulações baseadas no método do Traçado de Raios e medições para efeitos comparativos.

As medições para caracterização da cobertura e comportamento do sinal foram realizadas obtendo-se valores médios do sinal em intervalos regularmente espaçados, de modo a se garantir uma menor influência do fenômeno de desvanecimento rápido e uma maior espacialidade entre elas.

A pesquisa considerou a aferição de valores abordando artifícios como transmissores virtuais nas simulações, posicionados no início de cada corredor transversal, que consideraram como potência de saída a mesma potência aferida naquele ponto ou local, a partir do transmissor real. Deste modo, os resultados obtidos mostraram uma boa concordância entre os valores simulados, medidos e teóricos, calculados a partir da fórmula de Friis, nas situações com visada e sem visada.

Palavras-chave: Predição, Propagação, Cobertura, Ambientes *Indoor*, Traçado de Raios.

---

# Abstract

---

The planning of new wireless communications networks, such as the fourth generation of mobile telephony (4G), represents a major challenge to include more and more advanced services with different quality requirements, mobility support, high transmission rates and high traffic capacities. The various environments in which these networks operate and the your associated phenomena, produce different effects in the behavior of the received signal and hence a variation in the performance of the radio links communication. Therefore, these effects should be evaluated correctly, in such a way that the sizing of the network meets the quality requirements regulated.

This paper aims to establish the characterization of wireless signal coverage in indoor environments in the frequency range of 700 MHz. This band was chosen because of its allocation to be used by communication systems broadband 4G / LTE in Brazil. Thus, simulations based on the ray tracing method and measurements were made for comparative purposes.

The measurements to characterize the coverage and signal behavior were carried out obtaining average values of the signal at regularly spaced intervals so as to ensure a smaller influence of fast fading phenomenon and greater spatiality therebetween.

The research considered the values using artifices as virtual transmitters in the simulations, positioned at the beginning of each cross runner, who considered the same power output power measured at that point or location from the actual transmitter. Thus, the results showed a good agreement between simulated, measured and theoretical values calculated from the Friis formula, in situations with line of sight and without line of sight.

Keywords: Prediction, Propagation, Coverage, Indoor Environments, Ray-Tracing.

---

# Sumário

---

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>V</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>VI</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>VII</b>
<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>X</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>XII</b>
<b>LISTA DE SIGLAS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	<b>XVII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
1.1. MOTIVAÇÃO .....	18
1.2. OBJETIVO.....	21
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO .....	22
<b>2. PADRÃO LTE</b> .....	<b>23</b>
2.1. MULTIPLEXAÇÃO POR DIVISÃO ORTOGONAL DE FREQUÊNCIA .....	27
2.2. LTE-ADVANCED.....	30
2.3. AGREGAÇÃO DE PORTADORAS .....	31
2.4. MÚLTIPLAS ENTRADAS E MÚLTIPLAS SAÍDAS .....	31
2.5. RETRANSMISSÃO DE NÓS E OPERAÇÃO COORDENADA MULTI PONTO .....	34
<b>3. PROPAGAÇÃO E MODELOS DE PREDIÇÃO</b> .....	<b>35</b>
3.1. PROPAGAÇÃO E COMUNICAÇÕES SEM FIO .....	37
3.2. AS EQUAÇÕES DE MAXWELL E AS ONDAS ELETROMAGNÉTICAS .....	37
3.3. PROPAGAÇÃO NO ESPAÇO LIVRE .....	39
3.4. MECANISMOS DE PROPAGAÇÃO.....	41
3.5. REFLEXÃO .....	41
3.6. REFRAÇÃO .....	41

3.7. DIFRAÇÃO.....	42
3.8. CANAL DE RADIO MÓVEL.....	44
3.9. MULTIPERCURSO.....	44
3.10. MODELOS DE PREDIÇÃO.....	45
3.11. MODELOS DE PREDIÇÃO EMPÍRICOS.....	45
3.12. MODELOS DE PREDIÇÃO DETERMINÍSTICOS.....	46
3.13. MÉTODO DO TRAÇADO DE RAIOS.....	47
<b>4. METODOLOGIA E RESULTADOS OBTIDOS .....</b>	<b>49</b>
4.1. AMBIENTES ANALISADOS.....	49
4.2. SOFTWARE DE PREDIÇÃO DE COBERTURA WINPROP®.....	51
4.3. WALLMAN.....	52
4.4. AMAN.....	56
4.5. PROMAN.....	58
4.6. METODOLOGIA DE MEDIÇÃO.....	65
4.7. RESULTADOS .....	70
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>74</b>
5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	74
5.2. TRABALHOS FUTUROS.....	75
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>77</b>

---

# Lista de figuras

---

Figura 1.1: Previsão de crescimento global de dispositivos móveis [4].	19
Figura 2.1: Soluções de rede de GSM para LTE [11].	24
Figura 2.2: Interfaces X2 e S1 [11].	25
Figura 2.3: OFDMA e SC-FDMA [11].	26
Figura 2.4: LTE R9: <i>Home</i> eNB ou HeNB [11].	27
Figura 2.5: Estrutura de portadoras FDM tradicional e OFDM [14].	28
Figura 2.6: Estrutura de portadoras OFDM [15].	30
Figura 2.7: Ilustração simplificada de MIMO 2x2 ( <i>Spatial Multiplexing</i> ).	32
Figura 2.9: Técnicas de processamento do sinal MIMO. Adaptado de [17].	33
Figura 3.1: Reflexão [34].	41
Figura 3.2: Refração [34].	42
Figura 3.3: Difração em uma abertura (a) e ilustração do princípio de Huygens para a construção geométrica de uma nova frente de onda (b) [34].	43
Figura 3.4: Sinal submetido ao desvanecimento em um canal radiomóvel típico [22].	44
Figura 3.5: Método do Traçado de Raios em ambientes <i>indoor</i> . Adaptado de [45].	48
Figura 4.1: IFPB – Campus João Pessoa: Local das medições.	50
Figura 4.2: Esquema dos corredores de medição.	51
Figura 4.3: WallMan: Seleção do tipo de base de dados.	53
Figura 4.4: WallMan: Valores padrão para objetos.	53
Figura 4.5: WallMan: importação do CAD.	54
Figura 4.6: WallMan: conversão.	54
Figura 4.7: Interface do WallMan com o cenário importado do CAD (a), visualização em 2D (b) e 3D (c).	56
Figura 4.8: Ilustração dos padrões da antena: plano vertical (a), plano horizontal (b) e 3D (c) [47].	57
Figura 4.9: Antena em relação aos planos E e H.	58
Figura 4.10: Tela do ProMan com o cenário das medições importado.	59

Figura 4.11: ProMan: Novo projeto.....	59
Figura 4.12: ProMan: <i>Site with sectors</i> e <i>Omni Site</i> .....	60
Figura 4.13: ProMan: Configuração do <i>site</i> .....	60
Figura 4.14: ProMan: Definição da área de simulação.....	61
Figura 4.15: ProMan: Diretórios de saída e resultados calculados.....	62
Figura 4.16: ProMan: Configuração de potência do TX, frequência de operação, padrão, polarização e altura da antena.....	62
Figura 4.17: ProMan: Configuração do modelo de previsão.....	63
Figura 4.18: ProMan: Parametrização do Método do Traçado de Raios.....	64
Figura 4.19: ProMan: Cálculo sendo efetuado.....	64
Figura 4.20: Esquema dos transmissores virtuais (TX' e TX'').	66
Figura 4.21: Esquema do <i>setup</i> de medição.....	66
Figura 4.22: Esquema dos corredores de medição.....	67
Figura 4.23: Esquema de medição nos pontos.....	67
Figura 4.24: Esquema de medição nos pontos e a distância entre eles.....	68
Figura 4.25: <i>Setup</i> de medição: TX (a) e base móvel com analisador de espectro com antena RX (b e c).....	68
Figura 4.26: Gráfico comparativo entre a medição pontual e a realizada com média de nove pontos.....	69
Figura 4.27: Resultado da simulação.....	70
Figura 4.28: Extração dos dados simulados.....	70
Figura 4.29: Comparação dos valores simulados e medidos no corredor de Eletroeletrônica.	71
Figura 4.30: Comparação dos valores simulados e medidos no corredor da Coordenação de Engenharia Elétrica.....	72
Figura 4.31: Comparação dos valores simulados e medidos no corredor do PET.....	72

---

# **Lista de tabelas**

---

Tabela 1: Instrumentos e dispositivos utilizados nas medições. ....	65
Tabela 2: Parâmetros utilizados nas medições. ....	68

---

# Lista de siglas

---

16QAM	<i>16-Quadrature Amplitude Modulation</i>
3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
4G	<i>4th Generation</i>
64QAM	<i>64-Quadrature Amplitude Modulation</i>
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ARIB	<i>Association of Radio Industries and Businesses</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CMR	Conferência Mundial de Radiocomunicações
CoMP	<i>Coordinated Multi Point Operation</i>
CRS	<i>Cell-specific Reference Signal</i>
CW	<i>Continuous Wave</i>
DBPSK	<i>Differential Binary Phase Shift Keying</i>
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
DL	<i>Dowlink</i>
DM-RS	<i>Demodulation-Reference Signal</i>
DPM	<i>Domain Path Model</i>
DQPSK	<i>Differential Quadrature Phase Shift Keying</i>
E-UTRA	<i>Evolved-Universal Terrestrial Radio Access</i>
E-UTRAN	<i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network</i>
EDGE	<i>Enhanced Data GSM Environment</i>
EIRP	<i>Effective Isotropic Radiated Power</i>

eNB	<i>evolved NodeB</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
EPS	<i>Evolved Packet System</i>
ERB	<i>Estação Rádio Base</i>
FAF	<i>Floor Attenuation Factor</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
FDM	<i>Frequency Division Multiplex</i>
FDTD	<i>Finite Diference Time Domain</i>
FEM	<i>Finite Element Method</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Services</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
GTD	<i>Geometrical Theory of Diffraction</i>
HDTV	<i>High Definition Television</i>
HeNB	<i>Home eNB</i>
HSDPA	<i>High Speed Downlink Packet Access</i>
HSPA	<i>High Speed Packet Access</i>
HT	<i>High Throughput</i>
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
IMT	<i>International Mobile Telecommunication</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ISDB-T	<i>Integrated Services Digital Broadcasting for Terrestrial Television Boradcasting</i>
ITU-R	<i>International Telecommunication Union-Radiocommunication Sector</i>
LOS	<i>Line-of-Sight</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>

MBMS	<i>Multimedia Broadcast Multicast Service</i>
MCM	<i>Multi Carrier Modulation</i>
MIMO	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>
MMDS	<i>Multichannel Multipoint Distribution Service</i>
MPEG	<i>Movie Pictures Expert Group</i>
NLOS	<i>Non-Line-of-Sight</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplex</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
PAPR	<i>Peak-to-Average Power Ratio</i>
PRBS	<i>Pseudo Random Binary Sequence</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
RN	<i>Relay Nodes</i>
RT	<i>Ray Tracing</i>
SAP	<i>Secondary Audio Programm</i>
SBTVD-T	<i>Sistema Brasileiro de Televisão Digital Terrestre</i>
SC-FDMA	<i>Single Carrier-Frequency Division Multiple Access</i>
SCM	<i>Serviço de Comunicação Multimídia</i>
SDM	<i>Spatial Division Multiplexing</i>
SM	<i>Spatial Multiplexing</i>
SNR	<i>Signal-Noise Ratio</i>
SRT	<i>Standard Ray Tracing</i>
STBC	<i>Space-Time Block Coding</i>
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TM	<i>Transmission Mode</i>

TMCC	<i>Transmission and Multiplexing Configuration Control</i>
TS	<i>Transport Stream</i>
TSP	<i>Transport Stream Packet</i>
TTI	<i>Transmission Time Interval</i>
TxBF	<i>Transmit Beamforming</i>
UE	<i>User Equipment</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
UIT	União Internacional de Telecomunicações
UL	<i>Uplink</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Terrestrial System</i>
UTD	<i>Uniform Theory of Diffraction</i>
UWB	<i>Ultra Wide Band</i>
VSWR	<i>Voltage Standing Wave Ratio</i>
WCDMA	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>
WiMax	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>

---

# Lista de símbolos

---

$\lambda$	Comprimento de onda
$P_T$	Potência transmitida
$P_R$	Potência recebida
$G_T$	Ganho da antena transmissora
$G_R$	Ganho da antena receptora
$f$	Frequência
$\vec{H}$	Campo magnético
$\vec{J}$	Densidade superficial de corrente
$\vec{D}$	Indução elétrica
$\vec{E}$	Campo elétrico
$\vec{B}$	Indução magnética (Densidade de fluxo magnético)
$\rho$	Densidade volumétrica de carga
$T$	Duração do símbolo
$\Delta$	Intervalo de guarda
$W_i$	Sinal de saída da sequência pseudo-aleatória para portadora $i$
$\epsilon$	Permissividade elétrica
$\mu$	Permeabilidade magnética
$\sigma$	Condutividade elétrica
$\alpha$	Constante de atenuação
$\beta$	Constante de fase

---

# 1. Introdução

---

## 1.1. Motivação

Nos últimos anos, a expansão das comunicações móveis e sua crescente utilização em ambientes diversos motivaram a necessidade do uso de ferramentas de análise de cobertura mais precisas. Neste tipo de ambiente, um planejamento adequado requer especial atenção, sobretudo no que concerne ao melhor aproveitamento do espectro eletromagnético. A busca por sistemas mais eficientes se deve ao aumento do número de usuários, associado ao grande volume de dados que trafegam nas redes de comunicações. Neste cenário, não há mais espaço para sistemas mal planejados, com baixo grau de eficiência espectral e fator de reuso de frequências, o que sugere uma correta divisão de áreas geográficas e ambientes fechados em células ou setores, além do posicionamento adequado das estações de rádio [1].

Nesse contexto, os métodos utilizados para predição da propagação e da cobertura são ferramentas essenciais à agilidade de implementação das redes sem fio, sendo ainda essenciais à melhoria da qualidade dos serviços prestados aos usuários. Desse modo, uma das principais colaborações dessas ferramentas é a estimativa confiável da distribuição de sinais de rádio nos ambientes atendidos por uma dada antena emissora.

A informação e a interatividade estão cada vez mais presentes no cotidiano das pessoas, criando uma demanda crescente por capacidade de tráfego e taxas de dados mais altas, o que fomenta a evolução das redes de tal modo que estas sejam capazes de suportar o aumento de tráfego e ao mesmo tempo permaneçam estáveis e confiáveis. As redes de comunicações móveis de quarta geração, surgem com o intuito de aprimorar a experiência dos usuários, oferecendo velocidades de acesso rápidas e robustas. Atualmente, a banda de 108 MHz, compreendida entre 698 MHz e 806 MHz, é utilizada pela TV analógica no Brasil. Contudo, o governo brasileiro pretende alocar esta faixa para o uso do sistema 4G [2].

O Ministério das Comunicações estipulou o prazo final de transição para a TV Digital no Brasil para o ano de 2016, depois prorrogado até o ano de 2018. Com isso, foi colocado em discussão o potencial de uso do espectro na faixa de 700 MHz por sistemas de banda larga, o

que convencionou-se chamar “dividendo digital” da transição da TV Analógica para a TV Digital [2]. Esse tema começou a ser abordado pela Anatel em 2008, ao lançar consulta pública 833/2008, que prevê a destinação de canais UHF (*Ultra High Frequency*) para o Serviço SCM (Serviço de Comunicação Multimídia).

Devido às excelentes condições de propagação de sinais nessa faixa (raio de cobertura de até 50 Km a partir do transmissor, sem visada direta e com penetração de edificações), ela é considerada também adequada para implementação de sistemas banda larga [3].

Historicamente, a demanda por capacidade em sistemas sem fio era menor que a de sistemas cabeados; contudo, com o surgimento de dispositivos móveis que utilizam tecnologia de informação, tais como *tablets* e *smartphones*, a demanda por altas taxas de dados elevou-se consideravelmente. O aumento do número de dispositivos móveis que acessam redes sem fio em todo o mundo é um dos principais fatores que contribuem para o forte crescimento do tráfego global de dados em sistemas de comunicação sem fio. Mais de meio bilhão (526 milhões) de conexões móveis foram ativadas em 2013. As conexões móveis globais cresceram, em 2013, de 6,5 para 7 bilhões [4], conforme pode ser observado na Figura 1.1.

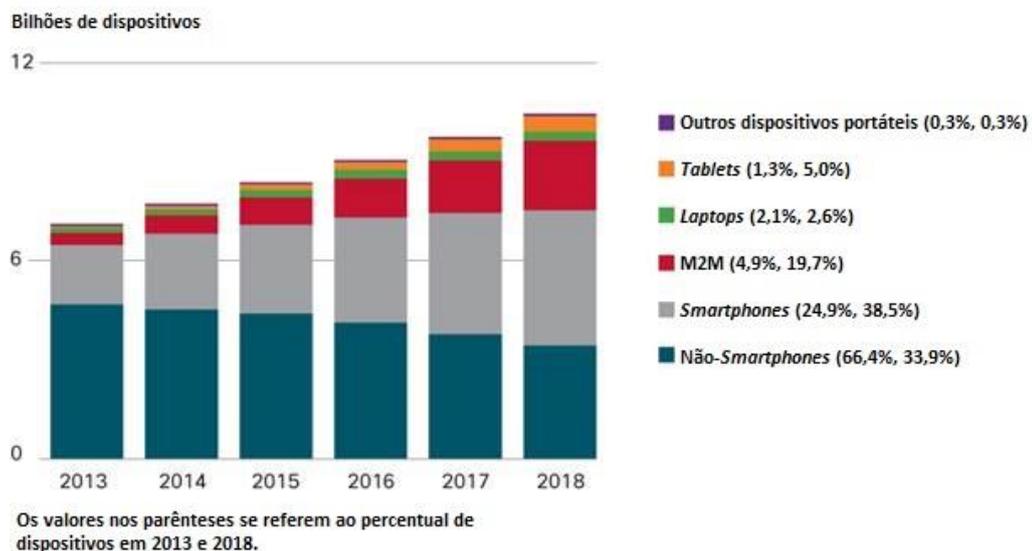


Figura 1.1: Previsão de crescimento global de dispositivos móveis [4].

Com o intuito de suprir essa demanda, foi desenvolvida a tecnologia LTE (*Long TErm Evolution*), atualmente no release 13 [5], pelo 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), consórcio de empresas de telecomunicações que se uniram para definir padrões de novas

tecnologias [6]. Com o aparecimento da tecnologia LTE, surgiu uma nova demanda de transmissão de dados no mercado de comunicações móveis. Essa tecnologia passou a oferecer altas taxas de dados.

Durante a Conferência Mundial de Radiocomunicações 2007 (CMR 2007) [7], a faixa de frequências compreendida entre 698 MHz e 806 MHz foi destinada para uso pelo *International Mobile Telecommunication* (IMT) na Região 2 (Américas) da União Internacional de Telecomunicações (UIT), conforme consta no Regulamento de Radiocomunicações da UIT.

O encerramento das transmissões do serviço analógico de televisão no Brasil está previsto para iniciar em 2015, conforme definido no art. 10 do Decreto n.º 5.820, de 29 de Junho de 2006, alterado pelo Decreto n.º 8.061, de 29 de Julho de 2013. O texto, que estabelece prazo até 2018 para o período de transição do sistema analógico para o Sistema Brasileiro de Televisão Digital Terrestre (SBTVD-T) [8]–[10], foi utilizado também como justificativa para a licitação da faixa de 700 MHz para uso pela tecnologia 4G.

A licitação gerou polêmicas e discussões acerca do assunto porque nesta mesma faixa atualmente ainda encontram-se alocados os canais compreendidos entre 52 e 69 em UHF, correspondentes à faixa de 698 MHz e 806 MHz.

O uso da faixa de 700 MHz facilitaria o ingresso, no Brasil, de muitos dispositivos fabricados para trabalhar com esta frequência, como *smartphones* e *tablets*, sem a necessidade de um modelo específico para ser comercializado no país. Além disso, existe outra vantagem em relação à faixa atualmente utilizada (2,5 GHz), que é uma melhor penetração em ambientes fechados (*indoor*), o que pode reduzir a quantidade de antenas utilizadas para cobertura de uma mesma região.

O Ministério das Comunicações publicou a portaria n.º 14, de 06 de Fevereiro de 2013, que estabelece diretrizes para acelerar o processo de transição da TV analógica para a TV digital no Brasil e determina que a Anatel (Agência Nacional de Telecomunicações) inicie os estudos para disponibilizar a faixa de 698 MHz a 806 MHz para o sistema 4G (*4th Generation*). Inicialmente, a Anatel havia destinado para o 4G (Res. 544 de 11/08/2010), a faixa de frequências de 2.500 MHz a 2.690 MHz, anteriormente destinada ao MMDS (*Multichannel Multipoint Distribution Service*).

A Resolução 625 da Anatel, publicada no Diário Oficial da União em 13 de Novembro de 2013 (página 129), aprova a atribuição, a destinação e o regulamento sobre condições de uso de radiofrequências na faixa de 698 MHz a 806 MHz [2].

Além do sucesso de tecnologias sem fio devido aos inúmeros serviços oferecidos e o que elas podem proporcionar, a grande motivação deste trabalho é a designação de uma mesma faixa de frequência (700 MHz) para serviços adjacentes, os quais podem interferir e serem interferidos entre si, quais sejam o SCM 4G/LTE e o sistema de radiodifusão de sons e imagens terrestre.

Há duas técnicas de grande precisão para predição de propagação denominadas de Traçado de Raios (Ray Tracing) e Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD). No entanto, essas técnicas necessitam de grande quantidade de informações sobre o ambiente a ser estudado (os materiais de construção de paredes, pisos e tetos, informações sobre as mobílias etc.), além de ser necessário, dependendo do algoritmo utilizado, um grande esforço computacional para predizer a perda de propagação no ambiente em estudo. Além dessas técnicas citadas, existem os modelos de predição empíricos, através dos quais estuda-se o ambiente através da medição do sinal. Um transmissor é instalado no ambiente em questão e são realizadas medições do sinal recebido ao longo de determinado local. A partir dos dados obtidos na medição, é proposta uma equação para descrever a perda de propagação. Entretanto, esses modelos não apresentam grande precisão.

## 1.2. Objetivo

O objetivo deste trabalho é caracterizar e analisar a propagação e a área de cobertura do sinal em ambientes *indoor* usando a faixa de 700 MHz. Entende-se por área de cobertura a região em estudo onde se poderá conectar a rede desejada (celular, WLAN etc).

### 1.3. Estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado da seguinte forma:

O Capítulo 1 corresponde à Introdução, onde é realizada uma abordagem inicial sobre o tema, apresentando a motivação, justificativa, relevância, objetivo e a estrutura adotada para a dissertação.

O Capítulo 2, descreve a fundamentação teórica das redes baseadas no padrão LTE.

No Capítulo 3, é descrita a fundamentação teórica sobre sinais de ondas eletromagnéticas: propagação, cobertura, modelos de predição e características de propagação em diversos tipos de ambientes.

No Capítulo 4, é apresentada a metodologia adotada para as medições e a suíte de softwares WinProp<sup>®</sup>, composta por vários módulos que tratam desde a modelagem do ambiente, à predição de propagação utilizando métodos empíricos e determinísticos. Também no Capítulo 4, são apresentados os resultados das medições, simulações, além dos comparativos com base na fórmula de Friis, dentro da proposta de análise e caracterização de propagação e cobertura de sinais na faixa de 700 MHz.

Finalmente, no Capítulo 5, são apresentadas as considerações finais do trabalho, suas contribuições e sugestões para sua continuidade.

---

## 2. Padrão LTE

---

O LTE (*Long Term Evolution*), introduzido a partir do Release 8 do projeto 3GPP (3GPP R8), tem como seus principais requisitos a alta eficiência espectral, altas taxas de dados, bem como flexibilidade na frequência e largura de banda; foi concebido também para assegurar a continuidade da competitividade do sistema 3G, atender a demanda dos usuários por maiores taxas de dados e qualidade de serviço, a demanda contínua por redução de custos, por possuir baixa complexidade e para evitar a fragmentação desnecessária de tecnologias para a operação de banda emparelhadas e não emparelhadas [11].

O Release 8 (R8) do LTE foi finalizado em dezembro de 2008. Ele tem sido a base para os primeiros equipamentos. As especificações são muito estáveis, com o benefício de melhorias adicionais que tem sido introduzidas em todas as releases 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) [11].

A arquitetura do LTE é definida por uma estrutura EPS (*Evolved Packet System*), sendo esta constituída pela interface aérea E-UTRAN (*Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*) no lado do acesso e pelo EPC (*Evolved Packet Core*) no lado do *core*. Em termos radioelétricos, o LTE utiliza no DL (*Downlink*) o OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*). A transmissão é dividida no tempo por blocos de 0.5 ms em duas sub-tramas de 1.0 ms. As modulações utilizadas nas sub-portadoras são a QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), 16QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) e 64QAM. Para o aumento do ritmo binário e melhor cobertura, utiliza-se a tecnologia MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*), cujo objetivo consiste em utilizar múltiplos transmissores e receptores. No UL (*Uplink*) o LTE utiliza o SC-FDMA (*Single Carrier-Frequency Division Multiple Access*) e as modulações utilizadas são 64QAM, QPSK, e 16QAM [12].

O GSM (*Global System for Mobile Communications*) foi desenvolvido para realizar serviços em tempo real, em um circuito de dados comutado (Figura 2.1) possibilitados apenas por conexão de modem, ou seja, com taxas de dados muito baixas. O primeiro passo para uma solução através de pacotes de dados baseado em IP comutado (*Internet Protocol*) (Figura 2.1)

foi tomada com a evolução do GSM para GPRS (*General Packet Radio Services*), utilizando a interface “ar” e método de acesso TDMA (*Time Division Multiple Access*) [11].

Em seguida, sucedendo o GPRS, para alcançar maiores taxas de dados em UMTS (*Universal Mobile Terrestrial System*) uma nova tecnologia de acesso WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) foi desenvolvida. A rede de acesso UMTS emula uma ligação em circuito comutado para serviços em tempo real e uma ligação de comutação por pacotes para os serviços de comunicação de dados (Figura 2.1). No UMTS, o endereço IP é atribuído ao UE (*User Equipment*), quando um serviço de comunicação de dados é estabelecido e liberado quando o serviço for finalizado.

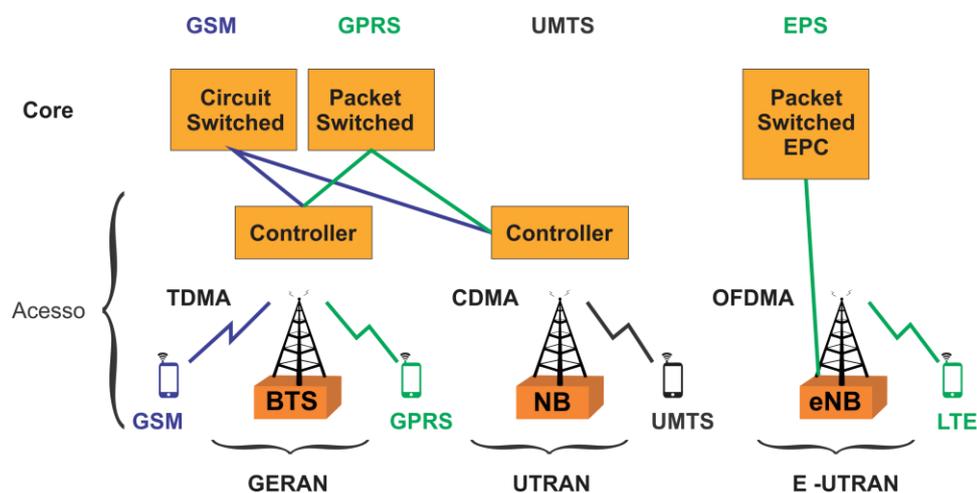


Figura 2.1: Soluções de rede de GSM para LTE [11].

O EPS (*Evolved Packet System*) é puramente baseado em IP. Ambos os serviços (serviços em tempo real e serviços de comunicação de dados) são executados pelo protocolo IP. O endereço IP é atribuído quando o celular está ligado e liberado depois de desligado. O LTE, baseado em OFDMA e também em uma combinação com modulação de ordem mais elevada (até 64QAM), oferece grandes larguras de banda (até 20 MHz). Com a multiplexação espacial no *downlink* (até 4x4), pode atingir taxas de dados elevadas, sendo o pico teórico mais elevado sobre o canal de transporte de 75 Mbps, para o *uplink*, enquanto que no *downlink*, usando multiplexação espacial, a taxa pode chegar a 300 Mbps [11].

A rede de acesso LTE é simplesmente uma rede de estações base, *evolved NodeB* (eNB), gerando uma arquitetura plana (Figura 2.2). Não há controlador inteligente centralizado e os eNBs são normalmente interconectados por meio de interface X2. A ligação com o *core* de rede é feita através de interface S1 (Figura 2.2). A razão para a distribuição de

inteligência entre as estações base em LTE é justamente para acelerar o estabelecimento de ligação e reduzir o tempo necessário para uma transferência. Para um usuário final o tempo de *setup* de conexão para uma sessão de dados em tempo real é crucial em muitos casos, especialmente em jogos *on-line*, por exemplo. O tempo de entrega ou o tempo de setup de conexão é essencial para serviços em tempo real, onde os usuários finais tendem a terminar chamadas se há demora excessiva [11].

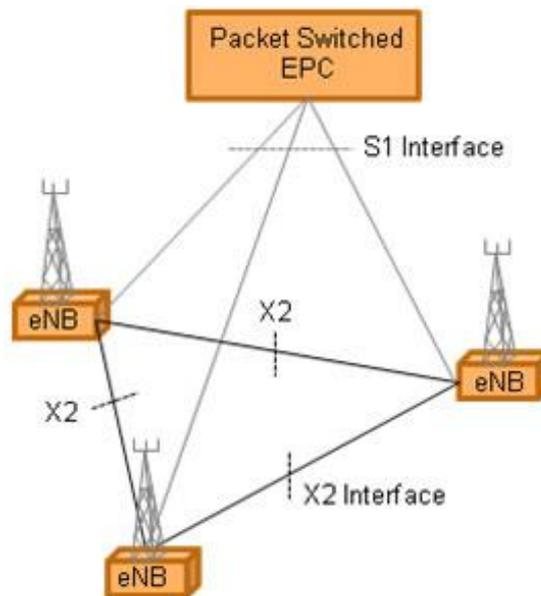


Figura 2.2: Interfaces X2 e S1 [11].

Outra vantagem com a solução distribuída é que a camada de protocolo MAC (*Medium Access Control*), que é responsável pela programação, está representada apenas no UE e na estação base, o que conduz à rápida comunicação e decisões entre o eNB e o UE. No UMTS, o protocolo MAC e a programação estão localizados no controlador que, quando o HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) foi introduzido, uma subcamada MAC adicional, responsável pela programação HSPA (*High Speed Packet Access*), foi adicionado ao NB. O programador é um componente chave para a realização de rápidos ajustes e a utilização dos recursos de rádio de maneira eficiente. O Tempo de Intervalo de Transmissão (TTI) está definido para apenas 1 ms [11].

Para atingir alta eficiência espectral, bem como permitir a programação eficiente nos domínios do tempo e da frequência, o 3GPP escolheu uma abordagem multi-portadora de acesso múltiplo. Conforme mencionado anteriormente, para o *downlink*, foi selecionada a

técnica OFDMA e para o *uplink*, a SC-FDMA, também conhecida como DFT (*Discrete Fourier Transform*) (Figura 2.3).

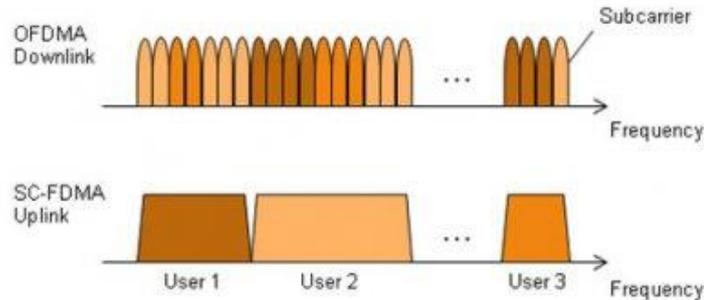


Figura 2.3: OFDMA e SC-FDMA [11].

A tecnologia OFDMA é multi-portadora e atua subdividindo a largura de banda disponível para várias sub-portadoras de banda mais estreita e mútuas ortogonalmente. Estas sub-portadoras podem ser compartilhadas entre vários usuários (diferentemente do OFDM, onde a banda de frequência é destinada a um único usuário). A solução OFDMA leva à alta relação entre a potência de pico e a potência média no tempo (PAPR - *Peak-to-Average Power Ratio*), o que requer amplificadores de potência caros, com altos requisitos de linearidade e o conseqüente aumento do consumo de energia para o remetente ou usuário. Para o eNB isso não é um problema; contudo, a escolha dessa técnica para o usuário final resultaria em aparelhos muito caros. Assim, uma solução diferente foi adotada para o *uplink*. Como ilustrado na Figura 2.3, a solução SC-FDMA gera um sinal com características de portadora única, por conseguinte, com um baixo PAPR [11] e baixo custo para os UEs.

Para tornar possível a implantação em todo o mundo, o LTE foi desenvolvido para um número de faixas de frequências entre 700 MHz e 2.7GHz. As larguras de banda disponíveis são também flexíveis, variando de 1,4 MHz a 20 MHz. O LTE também suporta a tecnologia *Time Division Duplex* (TDD), bem como a tecnologia *Frequency Division Duplex* (FDD). No release 8 (R8), existem 15 bandas previstas para FDD e oito bandas para TDD. No Release 9 (R9) quatro bandas foram adicionados para o FDD, além do MBMS (*Multimedia Broadcast Multicast Service*), e o *Home eNB* (HeNB) [11].

O MBMS é usado para fornecer informações *broadcast* para todos os usuários (por exemplo, publicidade) e *multicast* para um grupo fechado subscrito em um serviço específico (por exemplo, *streaming* de vídeo). Os HeNBs (Figura 2.4) são introduzidos principalmente para fornecer cobertura *indoor* (dentro de casa, em escritórios, por exemplo); são eNBs de

baixa potência para serem utilizadas em pequenas células (femtocélulas), normalmente de propriedade do cliente [11].

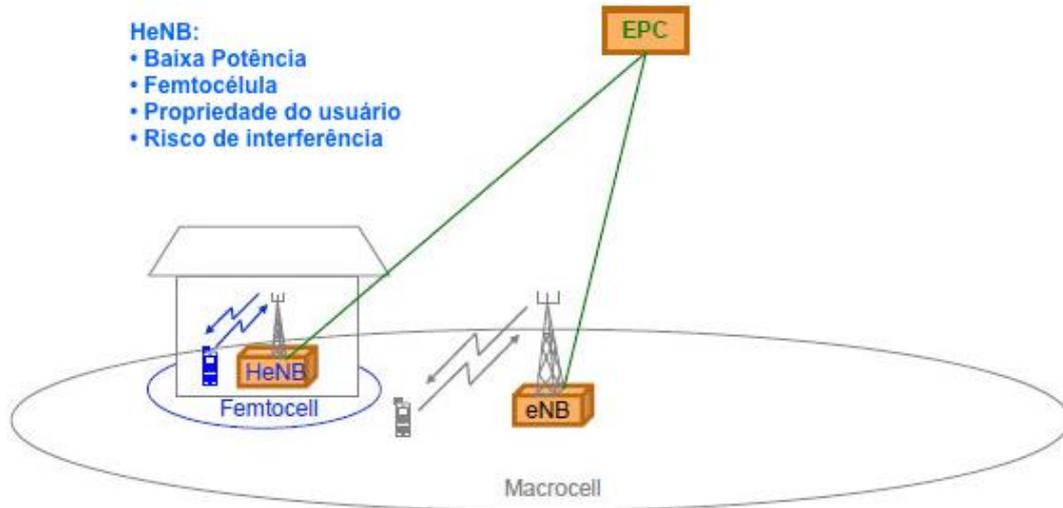


Figura 2.4: LTE R9: Home eNB ou HeNB [11].

## 2.1. Multiplexação por Divisão Ortogonal de Frequência

A técnica OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*) utiliza diversas portadoras ortogonais para transmitir uma informação dividida em várias partes [13]. É uma técnica baseada na Modulação por Multi Portadoras (MCM – *Multi Carrier Modulation*) e na Multiplexação por Divisão de Frequência (FDM – *Frequency Division Multiplex*), podendo ser considerada como um método de modulação ou de multiplexação.

Basicamente a modulação por multi-portadoras divide a banda do sinal em portadoras paralelas que são chamadas sub-portadoras. Diferentemente dos sistemas tradicionais MCM, que utilizam sub-portadoras não sobrepostas, o OFDM utiliza sub-portadoras que são matematicamente ortogonais entre si. Isto permite que cada informação possa ser enviada por sub-portadoras sobrepostas, onde cada uma delas pode ser extraída individualmente. Essa propriedade ajuda a reduzir interferências causadas por portadoras adjacentes e faz com que sistemas que utilizam o OFDM possuam melhor eficiência espectral em relação a outros sistemas [14], conforme apresentado na Figura 2.5:

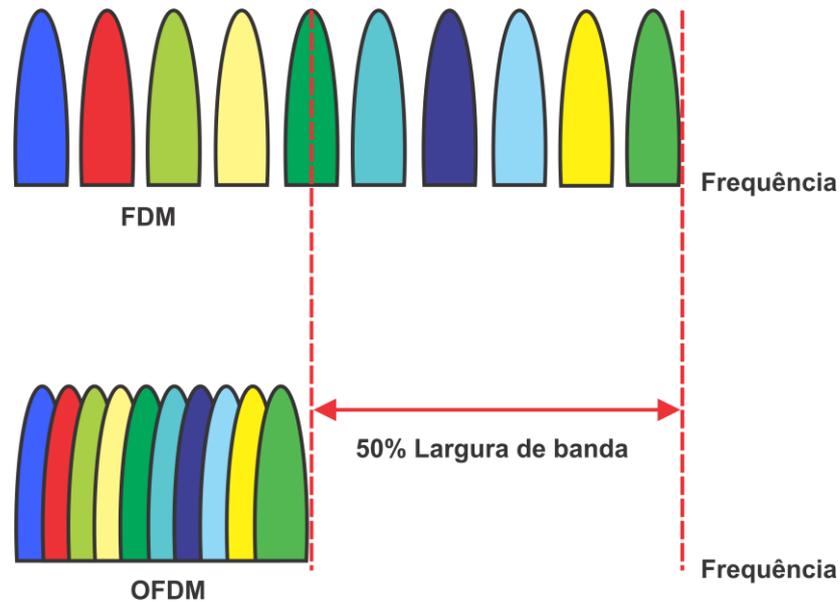


Figura 2.5: Estrutura de portadoras FDM tradicional e OFDM [14].

No processo de transmissão utilizando OFDM, a largura de banda utilizável é dividida em várias faixas menores, onde sub-portadoras em frequências diferentes são utilizadas para transmitir simultaneamente a informação. Cada portadora transporta apenas alguns bits da informação original, após passar pelos processos de embaralhamento (*interleaving*) e incluir códigos de correção de erro. Estas portadoras são ortogonais entre si, para evitar que haja interferência entre elas. Isso significa que o espaçamento entre as portadoras é igual ao inverso da duração de um símbolo [15].

As portadoras de baixa velocidade resultantes da técnica OFDM são mais tolerantes ao desvanecimento provocado pelas múltiplas reflexões no percurso do sinal. Outra característica da OFDM é a alta relação entre a potência de pico e a potência média no tempo (PAPR), e uma distribuição de energia que se assemelha ao ruído Gaussiano [15].

A técnica OFDM era baseada em apenas 52 portadoras ( $26 \times 2$ ), espaçadas entre si em 312,5 kHz, totalizando cerca de 16,8 MHz para operar em canais de 20 MHz de largura de banda. As alterações mais recentes dessa tecnologia acrescentam mais sub-portadoras para serem transmitidas em canais de maior largura de banda (40 MHz) [15].

Baseado nessas características, dispositivos que utilizam a tecnologia OFDM podem operar em vários modos diferentes:

**a) Modo *Legacy Non HT (High Throughput)***

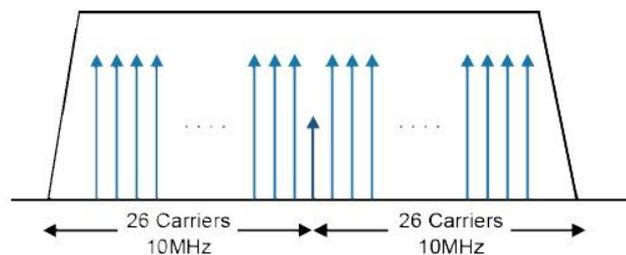
- Modo de operação original da técnica OFDM, onde são utilizadas 52 portadoras ocupando cerca de 16,8 MHz do canal de 20 MHz [15], conforme ilustrado na Figura 2.6 a.

**b) Modo *Mixed HT (High Throughput)***

- No modo misto HT20, um canal de 20 MHz é ocupado incrementando-se o número de portadoras de 52 para 56 na porção HT, conforme Figura 2.6 b. A porção original do preâmbulo ainda possui 52 subportadoras.
- No modo misto HT40, um canal de 40 MHz é ocupado utilizando dois canais adjacentes de 20 MHz, com um total de 114 portadoras ( $57 \times 2$ ) para a parte da informação. A parte original do preâmbulo possui um total de apenas 104 portadoras ( $52 \times 2$ ), conforme pode ser visto na Figura 2.6 c. Os frames de controle são enviados em canais de 20 MHz com 52 portadoras, para possibilitar a interoperabilidade com o modo original [15].

**c) Modo *Greenfield HT (High Throughput)*:**

- No modo *Greenfield*, também disponível no HT20 e HT40, o número de portadoras é o mesmo definido no Modo *Mixed HT*. A principal diferença entre ambos é que no Modo *Greenfield* não possui o preâmbulo original, isto é, não há possibilidade de os dispositivos que utilizam a técnica OFDM original se comunicarem com este modo [15].



(a) Modo *Legacy Non HT*.

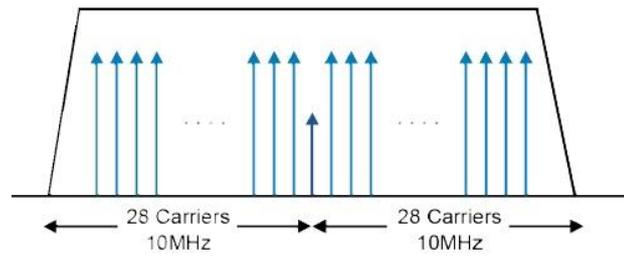
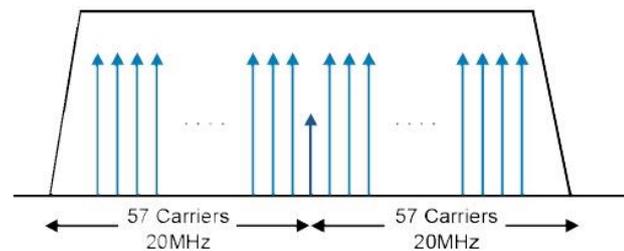
(b) Modo *Mixed* e *Greenfield* HT20.(c) Modo *Mixed* e *Greenfield* HT40.

Figura 2.6: Estrutura de portadoras OFDM [15].

## 2.2. LTE-Advanced

A força motriz para desenvolver o LTE ainda mais no sentido de *LTE-Advanced* (LTE Release 10) era fornecer taxa de dados ainda mais elevados, de uma forma economicamente eficiente e, ao mesmo tempo, cumprir plenamente os requisitos estabelecidos pela ITU para o *IMT-advanced*, também referido como 4G. São características do R10:

- O aumento da taxa de dados de pico, DL 3 Gbps, UL 1,5 Gbps;
- Maior eficiência espectral, de um máximo de 16bps/Hz (R8) para 30 bps/Hz (R10);
- Aumento do número de assinantes ativos simultaneamente;
- Melhor desempenho nas zonas limítrofes das células, por exemplo DL para MIMO 2x2, pelo menos, 2,40 bps/Hz/celular.

As principais funcionalidades introduzidas no *LTE-Advanced* são *Carrier Aggregation* (CA), o uso aprimorado de técnicas multi-antena (MIMO) e suporte ao *Relay Nodes* (RN) [16].

### 2.3. Agregação de portadoras

Para aumentar a capacidade do sistema é necessário adicionar mais largura de banda. Uma vez que é importante se manter a compatibilidade entre dispositivos que utilizam os *Releases* R8 e R9, o aumento da largura de banda em *LTE-Advanced* é fornecido através da agregação de portadoras de R8/R9. A agregação de portadora pode ser utilizada tanto para FDD quanto para TDD.

Cada portadora agregada é referida como uma portadora componente que pode ter uma largura de banda de 1,4, 3, 5, 10, 15 ou 20 MHz e podem ser agregadas em um máximo de cinco portadoras componentes. Por conseguinte, a largura de banda máxima é de 100 MHz. O número de portadoras agregadas pode ser diferente em DL e UL; no entanto, sua quantidade para UL nunca é maior do que para DL.

No R10 existem duas portadoras agregadas no DL e apenas uma no UL (nenhuma agregação de portadora no UL). No R11 existem duas portadoras agregadas para o DL e uma ou duas para o UL, quando a agregação de portadora é utilizada [16].

### 2.4. Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas

O sistema de Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas (MIMO - *Multiple Input Multiple Output*) é uma tecnologia que utiliza múltiplas antenas para transmitir mais informações do que é possível usando uma única antena. Uma maneira de conseguir isso é através do SDM (*Spatial Division Multiplexing*) que tem o objetivo de transmitir vários fluxos de dados independentes e simultâneos dentro de um canal específico. O SDM pode aumentar significativamente a taxa de transferência de dados através do aumento do número de fluxos de dados. Cada fluxo de dados requer uma antena no transmissor e outra no receptor [17].

Dessa forma, a tecnologia MIMO é utilizada para aumentar a taxa de bits total através da transmissão de dois (ou mais) fluxos de dados diferentes, em duas (ou mais) antenas – utilizando os mesmos recursos tanto em frequência quanto em tempo, separadas apenas por meio da utilização de diferentes sinais de referência, para ser recebido por duas ou mais antenas (Figura 2.7) [16].

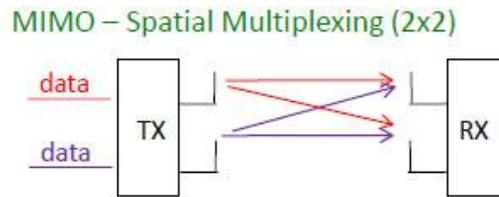


Figura 2.7: Ilustração simplificada de MIMO 2x2 (*Spatial Multiplexing*).

Para tornar possível o ajuste ao tipo de esquema de transmissão multi-antena, de acordo com o ambiente de rádio, foi definido um número de diferentes modos de transmissão (TM - *Transmission Mode*). O UE é informado sobre o modo de transmissão usado. No DL há nove modos de transmissão diferentes, onde os modos TM de 1 a 7 foram introduzidos no R8, o TM8 foi introduzido em R9 e o TM9 foi introduzido no R10. No UL há o TM1 e o TM2, onde TM1, padrão, foi introduzido em R8 e o TM2 foi introduzido no R10. Os diferentes modos de transmissão diferem em:

- Número de *layers* ou camadas (*streams*);
- Quantidade de antenas;
- Tipo do sinal de referência: *Cell-specific Reference Signal* (CRS) ou *Demodulation Reference Signal* (DM-RS), introduzido no R10;
- Tipo de pré-codificação (*precoding*).

Através do TM9, o MIMO 8x8 passa a ser suportado no DL, e com a introdução do TM2, o MIMO 4x4 também está habilitado no UL. Naturalmente, também é necessário que o UE também suporte esses modos.

Conforme pode ser observado na Figura 2.9, segundo [17], as técnicas de processamento de sinal utilizadas em sistemas MIMO são:

- a) **Multiplexação Espacial (*Spatial Multiplexing* – SM):** Subdivide o fluxo de sinal de saída em múltiplas partes, transmitidas através de múltiplas antenas. Em razão de se propagarem por diferentes caminhos, esses “pedaços”, usualmente chamados de

*streams*, chegam ao receptor com níveis de potência e atrasos diferentes entre si. Desde que os *streams* cheguem ao receptor com assinaturas espaciais suficientemente distintas, um receptor SM é capaz de montá-las de volta e refazer o sinal original.

- b) **Codificação de Blocos Espaço-Tempo (*Space-Time Block Coding – STBC*):** Envia fluxos de sinal de saída com redundância utilizando até quatro *streams* espaciais codificados diferentemente, cada um transmitido através de uma antena diferente. Ao comparar os *streams* espaciais recebidos, o receptor tem melhores chances de determinar precisamente o fluxo de sinal original na presença de interferência eletromagnética ou outras distorções. Ou seja, a STBC melhora a confiabilidade do sistema, reduzindo a taxa de erro para uma determinada relação sinal-ruído (SNR).
- c) **Transmissão por Formação de Feixe (*Transmit Beamforming - TxBF*):** Direciona um fluxo de sinal de saída para o receptor pretendido, concentrando a energia de RF transmitida em uma determinada direção. Esta técnica aproveita os impactos aditivos e destrutivos do ambiente, explorando os fenômenos de RF, tais como reflexão e multipercurso, para melhorar a intensidade do sinal recebido e sustentar maiores taxas de dados do sinal. Para orientar o sinal na melhor direção, o transmissor precisa saber como esse sinal provavelmente será recebido. Este "conhecimento do canal" pode ser obtido implicitamente (assumindo que a propagação é idêntica em ambos os sentidos) ou explicitamente (através da obtenção do *feedback* do receptor).

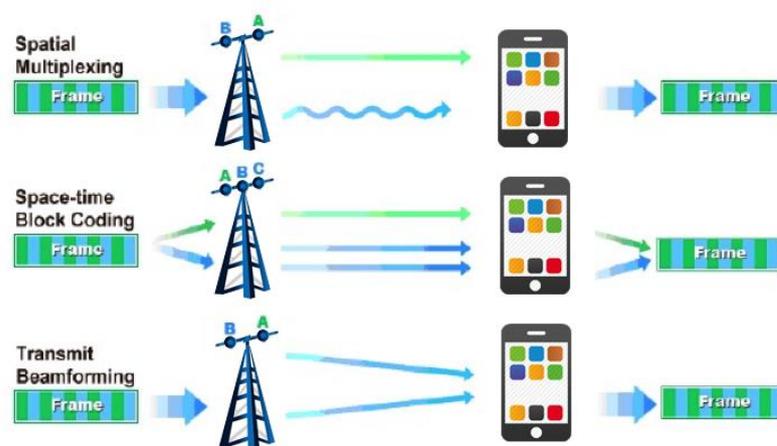


Figura 2.8: Técnicas de processamento do sinal MIMO. Adaptado de [17].

## 2.5. Retransmissão de Nós e Operação Coordenada Multi Ponto

No LTE-*Advanced*, a possibilidade do eficiente planejamento de redes heterogêneas (células grandes e pequenas) é expandida pela introdução da Retransmissão de Nós ou *Relay Nodes* (RNs). Os RNs são estações base de baixa potência que proporcionam uma cobertura mais eficaz e também pode ser usado para conectar áreas remotas [16].

Seguindo a mesma ideia, a Operação Coordenada Multi Ponto (CoMP - Coordinated Multi Point Operation), introduzido a partir do R11, fornece novas formas de agregação de portadoras (*carrier aggregation*) com novas bandas adicionadas e novos recursos introduzidos em lançamentos subsequentes especificados pelo 3GPP.

O LTE é uma tecnologia criada para lidar com comunicações críticas, concebida para atender as necessidades do mercado mantendo a interoperabilidade de dispositivos e redes heterogêneas, equilibrando técnicas de racionalização do espectro eletromagnético e provendo novas oportunidades de negócios.

O próximo capítulo trata da fundamentação teórica sobre propagação, base para os estudos abordados nesse trabalho, bem como sobre os estudos que deram origem às comunicações móveis e sua evolução.

---

## 3. Propagação e Modelos de Predição

---

As telecomunicações encontram-se inseridas em um ambiente de crescentes inovações com destaques para a expansão e popularização dos sistemas de comunicação sem fio. Neste cenário, há uma elevada demanda por soluções que possibilitem a convivência de múltiplos usuários concentrados em uma mesma área geográfica e utilizando faixas do espectro de radiofrequências de forma compartilhada, com serviços e tecnologias convergentes [1].

Um dos principais fenômenos associado à propagação de sinais é o de espalhamento, ocasionado pelas múltiplas reflexões e difrações que os mesmos sofrem ao longo de seus trajetos, gerando componentes de múltiplos percursos, onde o sinal recebido é resultante de uma combinação de múltiplas versões do sinal original transmitido que percorrem caminhos diferentes. Outro efeito dessa difusão é manifestada através de flutuação no nível do sinal devido às obstruções criadas pelo relevo ou provocadas pelo homem. Este efeito é conhecido como sombreamento [18].

A propagação de ondas de rádio está sujeita a reflexões sobre o solo e a refrações na atmosfera, que podem provocar alterações no seu nível e no caminho percorrido, causando variações na intensidade do sinal recebido. Estas variações são chamadas de desvanecimento e também podem ser causadas por obstruções na linha de visada [19]. Assim, a antena receptora capta apenas uma parte da energia das ondas eletromagnéticas transmitidas.

No planejamento de um sistema sem fio, é necessária a utilização de um método confiável de predição de cobertura, que possibilite a análise dos efeitos relacionados aos desvanecimentos provocados pelos múltiplos percursos da onda, avaliar as possíveis interferências de co-canal, além de definir o melhor posicionamento das antenas transmissoras [20].

Modelos empíricos, em geral, são obtidos por meio de um conjunto de medições feitas em campo. Os valores obtidos nessas medições são utilizados apropriadamente nas formulações para os ambientes em questão. Por outro lado, modelos de predição

determinísticos (também conhecidos como teóricos, ou modelos físicos), direta ou indiretamente, pautam-se nas Equações de Maxwell, que descrevem de forma completa o comportamento da propagação de ondas eletromagnéticas e da interação destas com o ambiente [1].

Apesar da existência de modelos empíricos bastante difundidos e amplamente utilizados em ambientes urbanos (macrocélulas), a eficácia desses métodos não é constatada em micro, pico e femtocélulas (pequenas estações rádio-base – ERBs, desenvolvidas para operar dentro de edificações). Assim, diversos modelos determinísticos (teóricos) são propostos na literatura para atender essa necessidade no planejamento de sistemas.

Dentre os modelos determinísticos, o método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD – *Finite Difference Time Domain*) e o Método do Traçado de Raios (RT – *Ray-Tracing*) são exemplos de modelos amplamente utilizados para predição de campos em ambientes *indoor*. Os modelos que utilizam o Método de Traçado de Raios pertencem ao grupo dos modelos mais precisos de predição de cobertura, sendo aplicados principalmente para o cálculo de perdas de percurso (*path loss*) e para análises de dispersão temporal (*delay spread*) em micro, pico e femtocélulas [1].

O Método do Traçado de Raios combina técnicas de computação gráfica com o cálculo numérico eletromagnético. Essa técnica realiza a análise da propagação de sinais de radiofrequência em um cenário que represente, com razoável fidelidade, um ambiente onde se deseja realizar a predição de cobertura, levando-se em consideração as diversas interações (reflexão, refração e difração) dos raios com os obstáculos do ambiente. Estes raios representam as ondas eletromagnéticas radiadas por uma antena transmissora.

Em um ambiente *indoor* típico, há a presença de paredes, portas, janelas, mobília etc. Assim, o cálculo do campo é obtido pelo somatório dos campos provenientes dos diversos percursos. O campo total em um ponto é a soma dos campos associados aos diferentes raios que atingem ou convergem para ele, de modo tal que, em visada, o raio direto representa a maior contribuição ao sinal recebido [21], enquanto que, quando o receptor não tem visada com o transmissor, os raios refletidos, refratados e difratados são os principais contribuintes da energia total do sinal recebido.

### 3.1. Propagação e comunicações sem fio

Em sistemas de comunicação sem fio, a interação das ondas com os obstáculos aumenta a complexidade do modelamento do canal de comunicação [20]. Em diversos sistemas, fenômenos como reflexão, refração e difração são cruciais para calcular o comportamento da onda eletromagnética no canal, sobretudo quando considera-se a presença frequente de paredes, janelas, mobília etc.

A onda refletida constitui-se da parcela que retorna ao meio transmissor após a interação com uma superfície. Algumas dessas ondas geram uma componente refratada a qual também deve ser considerada. Além desses fenômenos, cita-se ainda a difração, que pode ser explicado através do princípio de Huygens, onde se considera cada frente de onda como uma fonte geradora de ondas secundárias.

Os sistemas de comunicação sem fio podem ser representados por canais em que as ondas eletromagnéticas se propagam. Estes canais simulam percursos que vão desde simples linhas de visada direta (propagação direta entre transmissor e receptor, sem a interação da onda com obstáculos), até complexos sistemas severamente obstruídos por prédios, montanhas, vegetação etc. Ao contrário dos sistemas guiados, que são estacionários e previsíveis, os canais de rádio são extremamente aleatórios e de difícil análise [22].

### 3.2. As Equações de Maxwell e as Ondas Eletromagnéticas

Entre 1856 e 1865 o cientista escocês James Clerk Maxwell, baseado nos trabalhos de Ampère, Gauss, Faraday, entre outros cientistas, publicou uma série de artigos que deram origem à consagrada Teoria Eletromagnética, descrita pelas quatro “Equações de Maxwell”.

Através da introdução da noção de “corrente de deslocamento” (1862), Maxwell possibilitou, sob forma completa, o estabelecimento desse grupo de equações que sintetiza o comportamento físico de todas as grandezas eletromagnéticas [23].

A comprovação prática da propagação de ondas eletromagnéticas (rádio-propagação) – descrita pelas equações de Maxwell – foi feita por Heinrich Rudolf Hertz em 1887.

As Equações de Maxwell, sob a forma local (diferencial), são apresentadas a seguir:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{Lei de Ampère}) \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{Lei de Faraday}) \quad (2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{Lei de Gauss}) \quad (3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{Lei de Gauss no magnetismo}) \quad (4)$$

Onde:

$\vec{H}$  é a densidade de campo magnético (A/m);

$\vec{j}$  é a densidade superficial de corrente elétrica (A/m<sup>2</sup>);

$\vec{D}$  é a densidade de fluxo elétrico (C/m<sup>2</sup>);

$\vec{E}$  é densidade de campo elétrico (V/m);

$\vec{B}$  é a densidade de fluxo magnético (T);

$\rho$  é a densidade volumétrica de carga (C/m<sup>3</sup>).

Deve-se considerar, ainda, as propriedades físicas dos materiais. Essas relações são conhecidas como relações constitutivas e são representados pelas equações a seguir:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (5)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (6)$$

$$\vec{J}_c = \sigma \vec{E} \quad (7)$$

Onde:

$\epsilon$  é a permissividade elétrica (F/m);

$\mu$  é a permeabilidade magnética (H/m);

$\sigma$  é a condutividade elétrica (S/m).

A propagação ocorre através de variações temporais de campos eletromagnéticos e essa variação, em um dado ponto, produz campos magnéticos variando no tempo, em pontos espacialmente deslocados do primeiro, conforme a equação (1). Essa variação do campo magnético, por sua vez, produz campos elétricos também variantes no tempo e deslocados no espaço, conforme a equação (2), dando continuidade à propagação. Esse fenômeno é, portanto, descrito pelas equações de Maxwell [20].

Considerando uma onda plana para um meio homogêneo e linear, pode-se obter a equação que rege a propagação de ondas sob forma fasorial:

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{E} = j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)\vec{E} = 0 \quad (8)$$

Considerando  $\vec{E} = E_x \vec{i}$ ,  $\partial/\partial_z \neq 0$  e  $\partial/\partial_x = \partial/\partial_y = 0$ , a equação da onda no domínio do tempo é dada por:

$$E(z, t) = E_0 e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z) \quad (9)$$

Onde  $\alpha$  é a constante de atenuação (em Np/m) e  $\beta$  é a constante de fase (em rad/m), obtidas a partir da constante de propagação:

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)} = \alpha + j\beta \quad (10)$$

### 3.3. Propagação no espaço livre

A propagação no espaço livre é estudada em ambientes onde a transmissão de ondas de rádio entre as antenas transmissora e receptora de um determinado sistema de comunicação está livre de todos os objetos que possam interagir de alguma forma com a energia eletromagnética [24]. Considerando uma antena transmissora qualquer, de ganho  $G_T$ , com sua irradiação máxima apontando na direção da antena receptora, tem-se a equação fundamental

para o cálculo de radio enlaces, também conhecida como fórmula de Friis para o espaço livre [20]. Nesse caso, a potência recebida pode ser calculada por [25], [26]:

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

onde  $P_R$  é a potência do sinal recebido,  $P_T$  é a potência transmitida,  $G_T$  o ganho da antena transmissora and  $G_R$  é o ganho da antena receptora,  $\lambda$  é o comprimento de onda e  $d$  é a distância entre as antenas [27]. Esta fórmula também é conhecida como equação de transmissão de Friis. Observa-se, a partir dessas equações, que a potência decai com o quadrado da distância.

Se  $P_R$  e  $P_T$  são expressas em dBm e os ganhos em dB, a equação (14) pode ser escrita como [28]:

$$P_R = P_T + G_T + G_R + 20 \log \left[ \frac{\lambda}{4\pi d} \right] \quad (12)$$

Para sistemas de comunicação sem fio de banda estreita, a fórmula de transmissão de Friis é utilizada para avaliar o canal de ligação em linha de visada [29] e é muito útil para a análise da perda de propagação do sinal de rádio entre um transmissor e um receptor fixos.

Recentemente, algumas pesquisas sobre a fórmula de Friis têm sido relatadas, mas a sua eficácia é limitada à região de campo distante [30], [31].

No espaço livre a propagação da onda é feita em linha reta, sem efeitos de difração ou reflexão [31]. Como simplificação, a perda de percurso entre transmissor e receptor pode ser dada por [32]:

$$(L) = 32,5 + 20 \log d + 20 \log f \quad (13)$$

Onde  $d$  é a distância em quilômetros (km) e  $f$  é a frequência em Megahertz (MHz).

### 3.4. Mecanismos de propagação

### 3.5. Reflexão

A reflexão constitui um dos principais efeitos de interação das ondas com obstáculos, sendo a onda refletida a parcela da onda incidente que retorna ao meio de origem após a interação com uma superfície [20].

Alguns sistemas exploram o fenômeno da reflexão para o seu perfeito funcionamento, como é o caso dos guias de onda e da propagação ionosférica de ondas curtas [33]. Dessa forma, para analisar o efeito da propagação de uma onda refletida é necessário conhecer a forma geométrica dos obstáculos e as características elétricas dos materiais envolvidos juntamente com o conhecimento da frequência e da polarização das ondas, que têm efeito direto nos coeficientes de reflexão, como será visto A Figura 3.1 ilustra o mecanismo de reflexão.

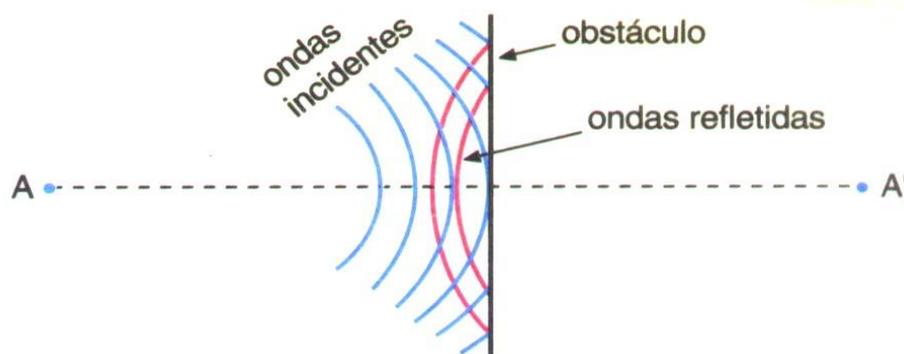


Figura 3.1: Reflexão [34].

### 3.6. Refração

Uma onda incidente na superfície de um obstáculo é parcialmente refletida. Porém, uma componente da mesma onda também é transmitida (ou refratada) [33]. Em muitos cenários, tais como em ambientes *indoor*, é importante conhecer o comportamento dessa componente refratada do campo, haja vista que a incidência da onda nos diversos obstáculos produz componentes transmitidas significativas [20], conforme observado na Figura 3.2.

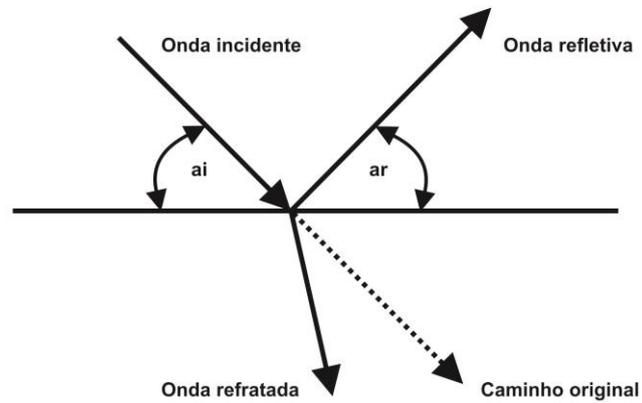
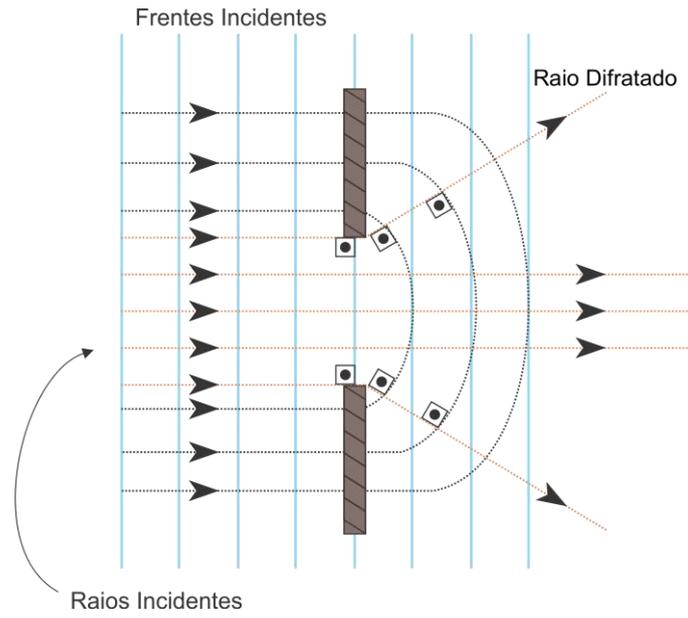


Figura 3.2: Refração [34].

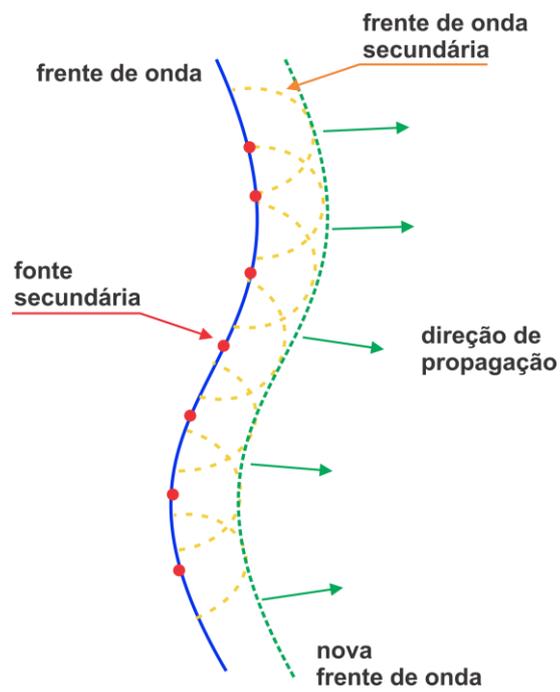
### 3.7. Difração

O fenômeno da difração se constitui da distorção causada numa onda eletromagnética que incide sobre obstáculos que podem ser aberturas em um anteparo, objetos opacos tais como esferas, discos etc. Em todos esses casos, e, assim, ocorre a presença de radiação em locais nos quais ela não seria esperada, ou seja, a interação da radiação com as bordas do obstáculo causa uma perturbação na radiação em propagação de modo que há um espalhamento por regiões onde ela não deveria normalmente ser detectada [34], conforme Figura 3.3 (a).

O fenômeno da difração pode ser explicado pelo princípio de Huygens, que considera cada ponto de uma frente de onda como sendo uma fonte de ondas secundárias, compondo uma nova frente de onda em uma nova posição da propagação, conforme Figura 3.3 (b).



(a)



(b)

Figura 3.3: Difração em uma abertura (a) e ilustração do princípio de Huygens para a construção geométrica de uma nova frente de onda (b) [34].

### 3.8. Canal de radio móvel

A Figura 3.4 apresenta dois comportamentos distintos existentes no sinal recebido, em um ambiente considerado radio móvel. As flutuações rápidas são denominadas de desvanecimento em pequena escala e são associadas ao multipercurso. As variações mais suaves (representadas no gráfico pela linha mais espessa) são conhecidas como desvanecimento de larga escala, o qual está associado ao sombreamento por obstáculos [1], [20].

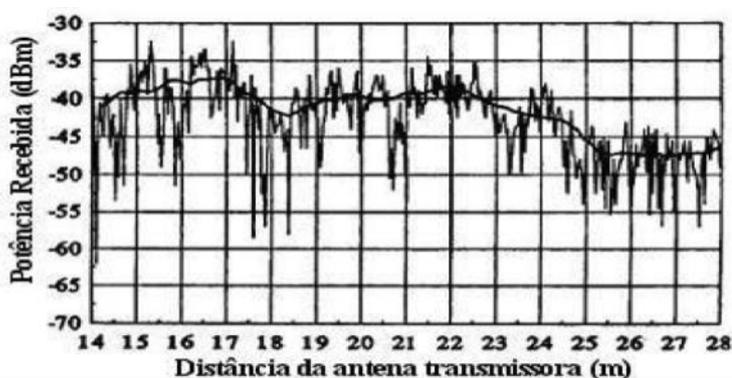


Figura 3.4: Sinal submetido ao desvanecimento em um canal radiomóvel típico [22].

### 3.9. Multipercurso

Nos sistemas de comunicações sem fio, a presença do multipercurso deve-se ao grande número de caminhos distintos percorridos pelas ondas eletromagnéticas em razão de suas diversas interações com os obstáculos. Dessa forma, uma estação móvel recebe sinais provenientes de inúmeras direções. Assim, o efeito de multipercurso provoca desvanecimentos de pequena escala devido à interferência entre duas ou mais versões do sinal que partem do transmissor e chegam ao receptor em tempos ligeiramente diferentes. Os três principais efeitos do multipercurso são [22]:

- mudanças rápidas na intensidade do sinal ao longo de pequenos deslocamentos no espaço e/ou em pequenos intervalos de tempo;
- “modulação” aleatória da frequência devido à variação do deslocamento Doppler em diferentes sinais de multipercurso;

- dispersões no tempo (ecos) causadas pelos atrasos da propagação.

### 3.10. Modelos de predição

A seguir, são descritos modelos e técnicas, baseados em formulações teóricas ou obtidos empiricamente, utilizados em ambientes *outdoor* e *indoor*, cujo objetivo é o aprimoramento e a eficiência das predições de propagação de ondas eletromagnéticas. Esses modelos estão dispostos em dois grupos: empíricos e determinísticos. Os modelos de predição empíricos são obtidos através de campanhas de medições em determinado ambiente. Os modelos determinísticos utilizam, por sua vez, métodos numéricos e computacionais para determinar os resultados. Seus detalhes serão descritos nas próximas seções, particularmente para situações onde figuram ambientes *indoor*.

### 3.11. Modelos de predição empíricos

Os modelos de propagação empíricos são mais amplamente utilizados em ambientes rurais, semiurbanos e urbanos. No entanto, na literatura são encontrados esses tipos de modelos também para ambientes microcelulares e indoor [35], [36].

De um modo geral, os cenários onde se propõe a utilização de modelos empíricos apresentam características que obedecem a certos padrões. Embora cada ambiente possua sua peculiaridade, é possível aproveitar-se dessas semelhanças utilizando modelos de predição que, fazendo-se os devidos ajustes em seus parâmetros, proporcionam resultados satisfatórios nesses cenários. Devido à sua praticidade e por apresentarem baixo custo computacional, os modelos empíricos ainda são os mais utilizados na predição de cobertura dos mais variados cenários.

Estes modelos, em geral, são obtidos por meio de uma bateria de medições feitas em campo. Os valores obtidos nas medições são utilizados apropriadamente nas formulações para os ambientes em questão [1], conforme mencionado anteriormente.

Os modelos empíricos são obtidos a partir de um conjunto de dados provenientes de medições realizadas em uma ou várias regiões. Tais resultados são modelados por expressões matemáticas específicas que fornecem o valor médio da atenuação do sinal. Estes modelos são de fácil aplicação, baixo esforço computacional e contemplam a maioria dos fatores que

afetam a propagação do sinal. Dentre estes modelos podemos mencionar os modelos de Log-distância, Egli, Okumura-Hata [37], Ecerg, COST-231 – Ikegami-Walfisch, Seidel-Rappaport, ITU-R P.1238-1 e o *Multi-Wall* [38].

O modelo COST-231 considera uma componente linear de perda, proporcional ao número de paredes penetradas, e outra componente que depende da quantidade de andares penetrados, produzindo uma perda que se incrementa lentamente com o aumento do número de andares da edificação [38]. O modelo Seidel-Rappaport apresenta um fator de ajuste entre andares denominado *Floor Attenuation Factor* – FAF que se refere à perda da potência entre andares em razão tipo de construção, materiais da edificação, estrutura e suas dimensões.

O modelo ITU-R P.1238-1 realiza a predição de propagação de sinal em ambientes *indoor* que operem nas faixas de frequência entre 900 MHz e 100 GHz. Este modelo considera que a atenuação é dependente da distância e dos obstáculos que se encontram no percurso do sinal. Além disso, considera a atenuação causada pelos diferentes pavimentos [38]. O modelo *Multi-Wall*, conhecido como múltiplas paredes, considera a atenuação causada pelas paredes e pavimentos no trajeto do sinal desde o transmissor até o receptor.

### 3.12. Modelos de predição determinísticos

Os modelos determinísticos são formulados a partir de teorias de computação eletromagnética, tais como a Teoria Geométrica da Difração (GTD – *Geometrical Theory of Diffraction*), a Teoria Uniforme da Difração (UTD – *Uniform Theory of Diffraction*), o Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD – *Finite Difference Time Domain*), o Método dos Elementos Finitos (FEM – *Finite Element Method*) etc [37].

Estes modelos dependem de bases de dados geográficos, da topologia do meio e das características físicas do terreno ou ambiente. Eles predizem com maior precisão o comportamento do sinal ao longo da sua transmissão desde o transmissor até o receptor. São exemplos de modelos determinísticos os modelos de Perda no Espaço Livre, de *Shadowing*, do Traçado de Raios (*Ray Tracing*) [21], [39].

Em geral, os métodos numéricos são utilizados em problemas envolvendo cenários de dimensões limitadas em termos de  $\lambda$  (comprimento de onda). Por outro lado, os métodos

assintóticos, como é o caso do Traçado de Raios, servem melhor para os cenários que consideram obstáculos com muitos comprimentos de onda de extensão [40].

A vantagem desta classe de modelos de predição de cobertura em relação aos modelos empíricos, está na confiabilidade dos valores preditos e na aplicabilidade em variados tipos de ambientes ou cenários. Do ponto de vista da implementação, há maior dificuldade em relação aos modelos empíricos, além da exigência de recursos computacionais elevados, o que acarreta em uma maior quantidade de memória alocada, bem como de tempo de processamento.

### 3.13. Método do Traçado de Raios

O método de Traçado de Raios desempenha um papel importante no projeto de redes sem fio, porque ele também considera os fenômenos físicos da propagação, tais como reflexões, difrações e espalhamento [41]. A propagação de sinais no interior de edificações é caracterizada pelos multipercursos. Os modelos empíricos não consideram os fenômenos tais como reflexão, efeitos de guia de onda nos corredores e difrações verticais e horizontais. Os modelos ópticos de raios, por sua vez, consideram esses efeitos. Este método gera uma imagem que simula o processo físico de propagação da luz [42]. Como as propriedades ópticas da luz são refletidas nos resultados das simulações, o método do Traçado de Raios pode gerar imagens de alta qualidade para consequentes análises [43].

O Método do Traçado de Raios foi escolhido como modelo de análise de sinais para este trabalho por apresentar resultados mais precisos que outros métodos disponíveis (tal como o de percurso dominante, DPM – *Domain Path Model*, que considera apenas a contribuição do raio principal de energia do sinal) e também pelo fato de o ambiente de medições e simulações ter um nível de complexidade elevado para a utilização do FDTD que tem uma maior dificuldade para uso em cenários mais complexos devido à necessidade de se discretizar o espaço e/ou os obstáculos [1].

Este método tem sido empregado para a análise de dispersão e difração de raios. Os transmissores são considerados como fontes isotrópicas e os raios utilizados para a modelagem originam-se dessa fonte isotrópica (transmissor) utilizando um esquema de lançamento uniforme [44]. A Figura 3.5 ilustra o funcionamento deste método. Nela, as componentes do mesmo sinal provenientes do transmissor TX, atingem o receptor RX através

de um percurso direto e de outros obtidos através de reflexão e difração nas paredes. Para o cálculo da componente refletida que atinge o receptor através da reflexão na parede, considera-se que ela foi emitida a partir de um transmissor virtual  $TX'$  localizado em visada com  $RX$  e com mesmo nível que esta componente possui no ponto onde ocorre a reflexão. Da mesma forma, para o cálculo da componente difratada que atinge o receptor através da difração na borda da parede, considera-se que a mesma foi emitida a partir de um transmissor virtual  $TX''$  localizado em visada com  $RX$  e com mesmo nível que esta componente possui no ponto onde ocorre a difração.

Com o Método do Traçado de Raios, a potência recebida em uma posição específica é calculada independentemente para cada raio recebido. Para determinar os raios refletidos e difratados, imagens do transmissor são calculadas [28].

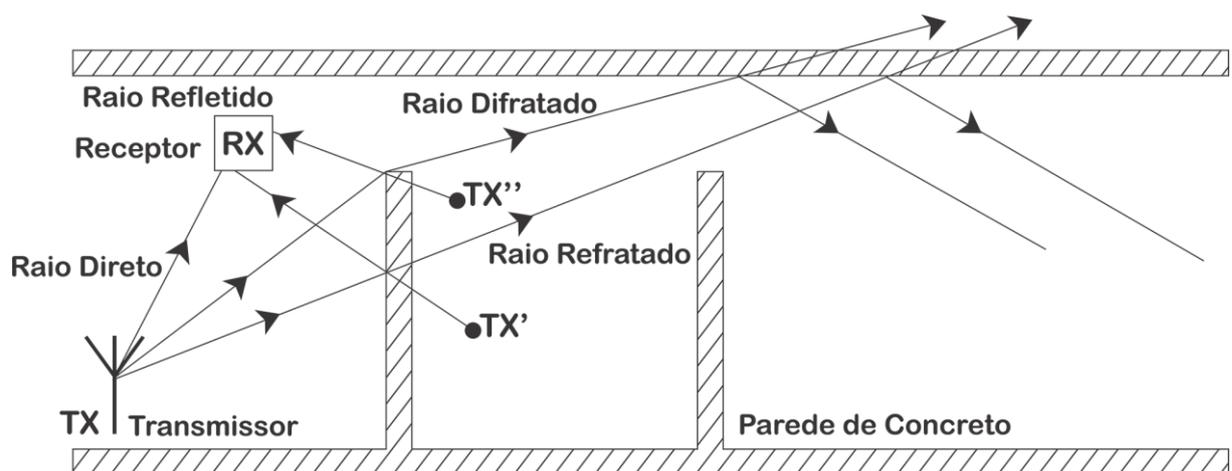


Figura 3.5: Método do Traçado de Raios em ambientes *indoor*. Adaptado de [45].

Os transmissores virtuais representados na Figura 3.5 como  $TX'$  e  $TX''$  não representam o método utilizado nas simulações (Traçado de Raios). Trata-se apenas de uma representação ilustrativa dos sinais refletidos.

---

## 4. Metodologia e resultados obtidos

---

Para possibilitar a caracterização e análise da cobertura de sinais em um ambiente *indoor*, bem como o seu desempenho em diferentes situações (com visada e sem visada), foram realizadas simulações e medições. Na fase de simulações, foi reproduzido o contexto do ambiente analisado e algumas de suas propriedades (tais como paredes e aberturas de janelas e portas), em diferentes corredores. Além disso foram consideradas algumas características de propagação do sistema tais como as distâncias utilizadas, a presença ou ausência de visada, a altura e polarização das antenas, dentre outros, bem como a utilização da técnica de traçado de raios para a predição dos sinais em cada um dos ambientes analisados. Em um segundo instante, foram realizadas medições no mesmo ambiente, com as mesmas características e parâmetros das configurações anteriores. Em uma terceira etapa, os resultados simulados e medidos foram comparados entre si e também com o resultado teórico da propagação no espaço livre.

Nas próximas seções serão especificados o local e os equipamentos utilizados nas medições, assim como as características e configurações do *software* WinProp<sup>®</sup>, suíte de aplicativos para o estudo de propagação de ondas de rádio e planejamento de redes de comunicação utilizado durante as simulações. Também serão detalhados os procedimentos metodológicos utilizados para cada medição realizada.

### 4.1. Ambientes analisados

Os ambientes analisados se localizam no campus João Pessoa do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB, na localização ilustrada pela Figura 4.1 (planta baixa do IFPB João Pessoa, com o local das simulações e medições indicado pela elipse vermelha).



Figura 4.1: IFPB – Campus João Pessoa: Local das medições.

Os corredores utilizados foram os do bloco de Eletroeletrônica, Coordenação do curso de Engenharia Elétrica e do bloco do PET em Engenharia Elétrica. O corredor de Eletroeletrônica mede 88 m, enquanto que os corredores transversais, da Coordenação e PET de Engenharia Elétrica, medem, ambos, 38 m. Os equipamentos de medição foram posicionados no início do corredor dos laboratórios de Eletroeletrônica (TX) e ao longo dos três corredores, conforme indicação da Figura 4.2.

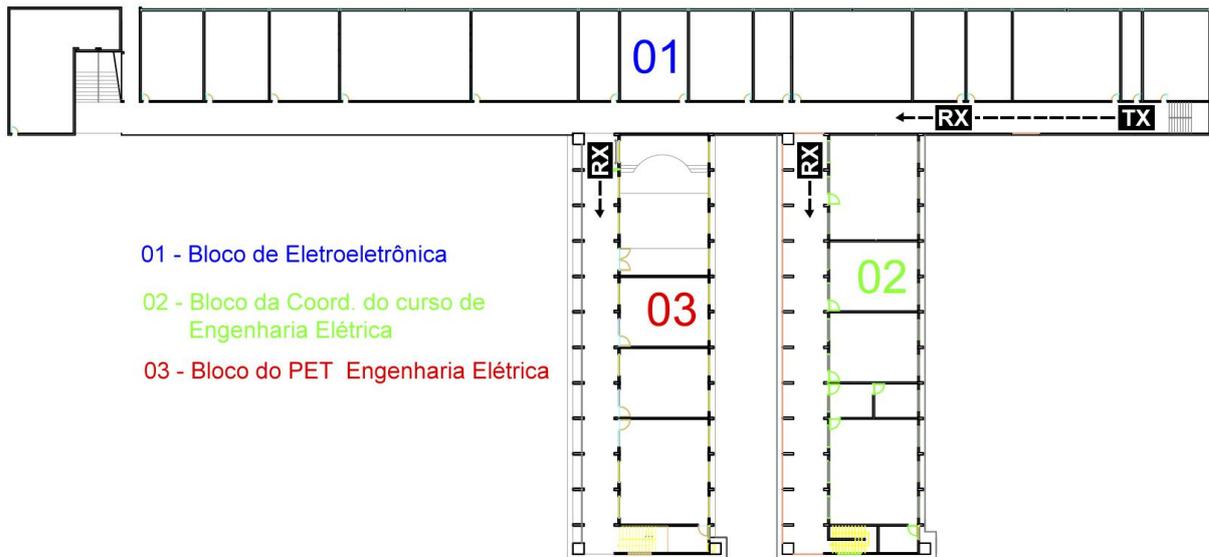


Figura 4.2: Esquema dos corredores de medição.

#### 4.2. Software de predição de cobertura WinProp<sup>®</sup>

O software utilizado para as simulações foi o WinProp<sup>®</sup>, versão 12.3, suíte de aplicativos para o estudo de propagação de ondas de rádio e planejamento de redes de comunicação. Trata-se de um *software* comercial para simulação de predição de propagação de ondas de rádio e planejamento de redes de telefonia celular e de radiodifusão. O IFPB possui uma licença acadêmica perpétua para uso em uma máquina por usuário. Este *software* é amplamente utilizado tanto por grandes empresas de telecomunicações, como também por Universidades reconhecidas mundialmente. O WinProp<sup>®</sup> roda em plataforma PC (*Personal Computer*) com o Microsoft Windows (versões Vista, XP, 7 e 8, de 32 bits e 64 bits) e/ou Linux (através de implementações de bibliotecas específicas) [46]. O pacote de software para a modelagem e predição de propagação inclui modelos de propagação para os seguintes cenários:

- Rural
- Suburbano
- Urbano
- *Indoor*
- Túneis

Os modos de propagação abordados são empíricos e/ou *ray-optical*/determinísticos. Além desses modos clássicos, são abordados ainda os modelos de Caminho Dominante (DPM – *Domain Path Model*) e o Traçado de Raios (3D Ray-Tracing). É possível também utilizar uma combinação dos cenários acima [46].

Com base na precisão dos modelos de propagação, os módulos de planejamento de rede disponíveis, são:

- 2G (GSM, IS 95);
- 2,5G (GPRS, EDGE);
- 3G (UMTS FDD & TDD, HSDPA, TD-SCDMA);
- B3G (OFDM);
- 4G/LTE (OFDM, SC-FDMA);
- Satélite (GPS, S-DMB);
- WLAN;
- WiMax;
- ISDB-Tb (SBTVD-T);
- Padrões definidos pelo usuário [46].

Com o WinProp<sup>®</sup>, foi possível simular a propagação de sinais na faixa de 700 MHz em ambientes *indoor*. Os módulos da suíte WinProp<sup>®</sup> utilizados foram o WallMan, o Aman e o ProMan.

### 4.3. WallMan

O WallMan é um editor gráfico para bases de dados vetoriais. Oferece facilidade para gerar e editar bancos de dados de construções urbanas e *indoor*. Vários filtros de importação para arquivos nos padrões GIS (MapInfo, Arcview etc), CAD (DWG, DXF, Shapefile etc) e formatos baseados em mapas de pixels (Bitmaps) estão disponíveis. A Figura 4.3 mostra a seleção do tipo de base de dados (*indoor*) e o modo de operação (conversão de arquivo CAD).

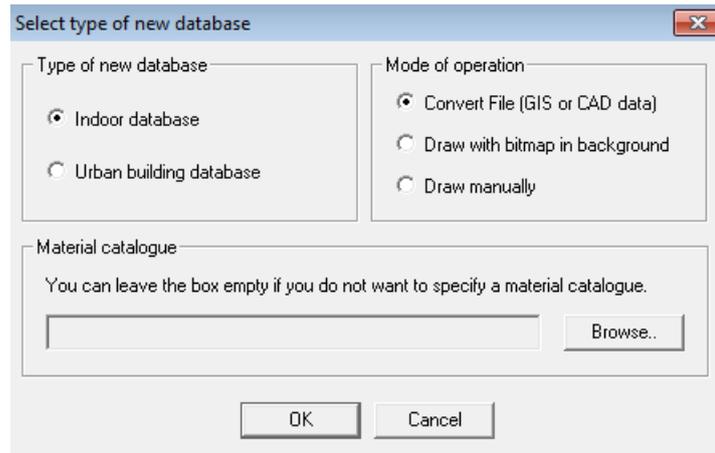


Figura 4.3: WallMan: Seleção do tipo de base de dados.

É possível, ainda, definir os tipos de materiais que constituem as edificações e a inserção de objetos não-determinísticos (transeuntes, por exemplo). A Figura 4.4 mostra a tela padrão de seleção dos valores para novos objetos. Neste caso, os objetos foram considerados como paredes de alvenaria.

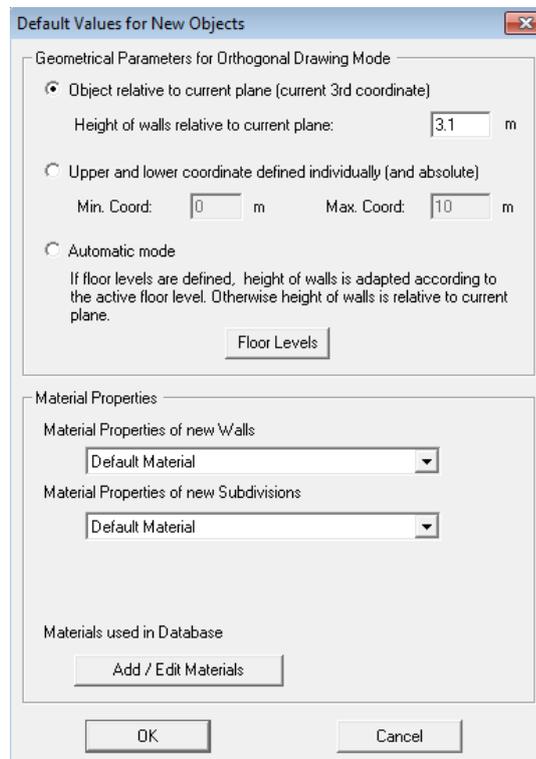


Figura 4.4: WallMan: Valores padrão para objetos.

Neste trabalho foi utilizada a importação de um arquivo DWG (trabalhado a partir do Autocad®) através da opção de conversão de bases de dados vetoriais *indoor*, conforme a Figura 4.5.

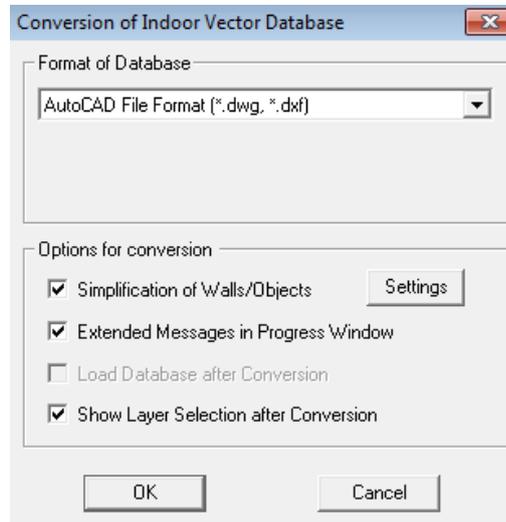


Figura 4.5: WallMan: importação do CAD.

Após a seleção da planta, foi necessário converter os objetos em *walls* (paredes), conforme mostra a Figura 4.6. Para tanto, foi necessário selecionar o *layer* referente aos objetos para conversão.

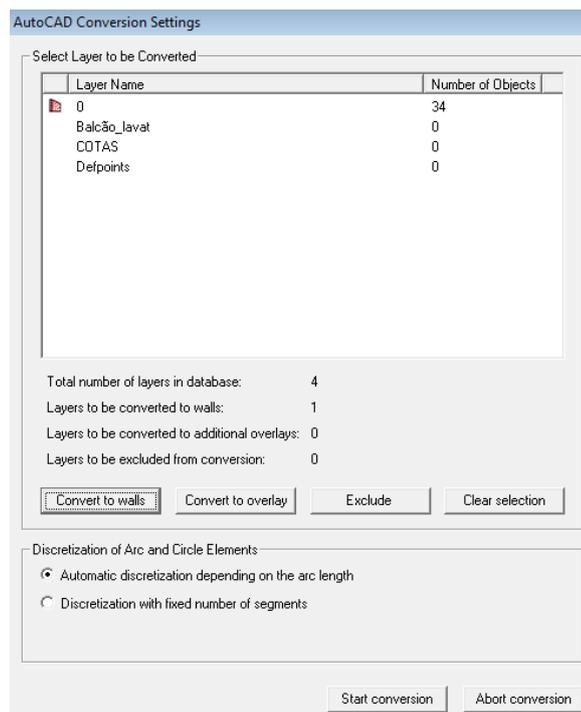
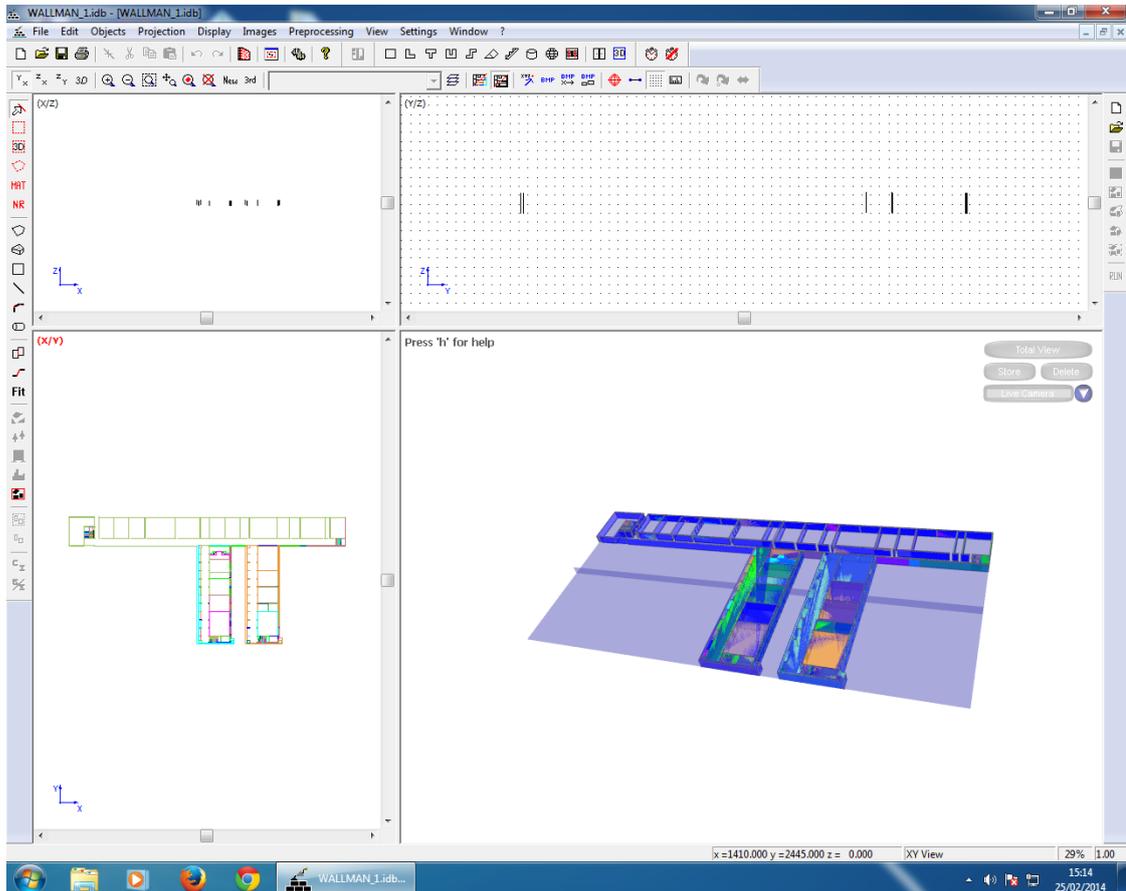


Figura 4.6: WallMan: conversão.

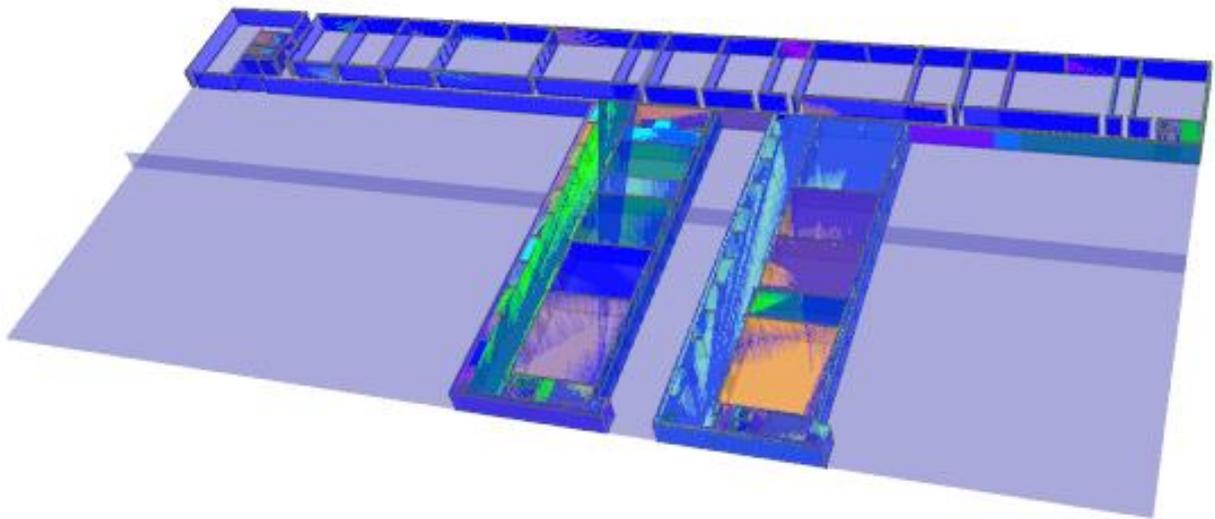
A Figura 4.7 (a) mostra o cenário importado para a interface do WallMan. Nele, foram definidos o nível do piso como 0 m, a altura da predição (altura da antena transmissora ou *site*) como sendo 1,5 m e a altura do teto como sendo 3,10 m. As Figuras 4.7 (b) e 4.7 (c) representam o cenário em 2D e 3D, respectivamente.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.7: Interface do WallMan com o cenário importado do CAD (a), visualização em 2D (b) e 3D (c).

#### 4.4. AMan

As ferramentas de planejamento de redes de rádio dependem de modelos precisos de propagação de ondas para prever a perda de percurso entre dois pontos arbitrários. Além da propagação de multipercurso, o padrão das antenas utilizadas para a ligação de comunicação influencia na perda de percurso real. Por isso, o padrão da antena deve ser descrito com precisão dentro da ferramenta de planejamento da rede de rádio [47].

Para estes efeitos, a ferramenta AMan (*Antenna Manager*) é utilizada para lidar com padrões de antenas com uma interface gráfica conveniente e amigável. As características mais importantes do AMan são:

- Visualização gráfica de padrões de antena (planos horizontal ou vertical) (Figura 4.8 a e b);
- Visualização 3D de padrões de antena (Figura 4.8 c);
- Conversão de formatos de arquivo de antenas comercialmente disponíveis (\* .msi, \* .pln etc);
- Conversão de padrão 2x2D (horizontal e vertical) ao padrão 3D;

- Editor gráfico para definir os padrões verticais e horizontais de antenas manualmente (desenhadas com auxílio de imagens de bitmap digitalizada do padrão como imagem de fundo) [47].

O programa é baseado na arquitetura de visualização do documento (Figura 4.8) que separa os dados do programa a partir de sua representação. Diferentes pontos de vista são usados para representar os diferentes padrões de antena [47]. Alguns fabricantes, como a alemã Kathrein, fornecem o arquivo de antena apropriado para carregar o diagrama diretamente no AMan.

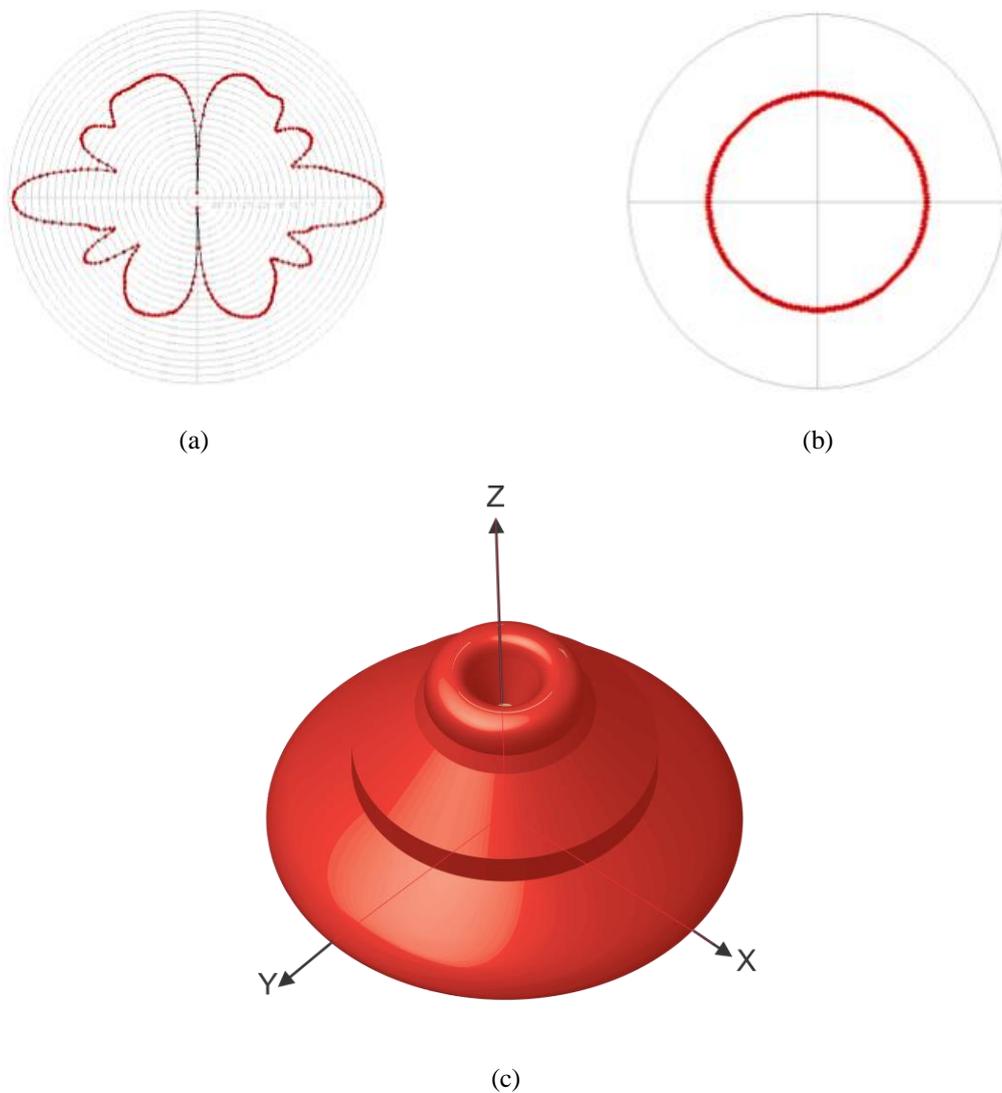


Figura 4.8: Ilustração dos padrões da antena: plano vertical (a), plano horizontal (b) e 3D (c) [47].

A antena utilizada pode ser observada na Figura 4.9, bem como sua disposição em relação aos planos  $\vec{E}$  e  $\vec{H}$ .

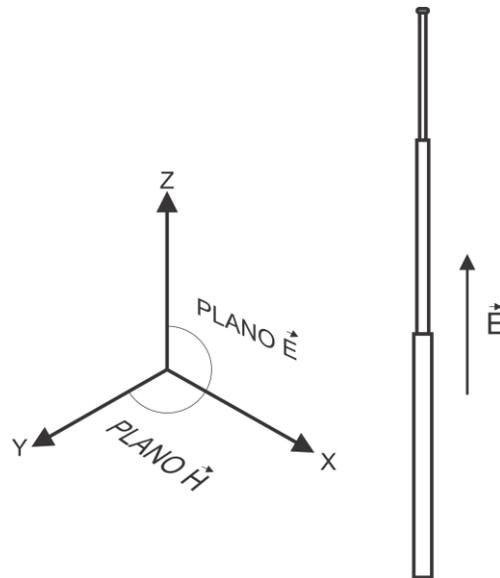


Figura 4.9: Antena em relação aos planos  $\vec{E}$  e  $\vec{H}$ .

#### 4.5. ProMan

A predição das características de propagação entre duas antenas dentro de um edifício é importante especialmente para projetos de telefonia móvel e redes locais sem fio (WLAN). Além disso a instalação de sistemas celulares com as estações de radio base no interior de edificações envolve o uso de modelos de propagação *indoor* específicos [48].

Com o ProMan é possível utilizar os cenários modelados no WallMan para simular a propagação de ondas de rádio, incluindo os modelos de planejamento de rede celular (por exemplo, picocélulas/femtocélulas) no interior de edifícios (incluindo a penetração de redes celulares em edifícios), de radiodifusão (por exemplo, cobertura *indoor* de transmissores terrestres ou satélites), análise de cobertura e planejamento de rede dentro de túneis e estações subterrâneas, análise de enlaces de rádio de curto alcance (por exemplo, UWB – *Ultra Wide Band* – e em torno de veículos), etc [48].

Neste trabalho o ProMan foi utilizado para simulação do ambiente *indoor* sob análise com uma antena omnidirecional com mesmas características da antena de medição, conforme ilustrado na Figura 4.10.

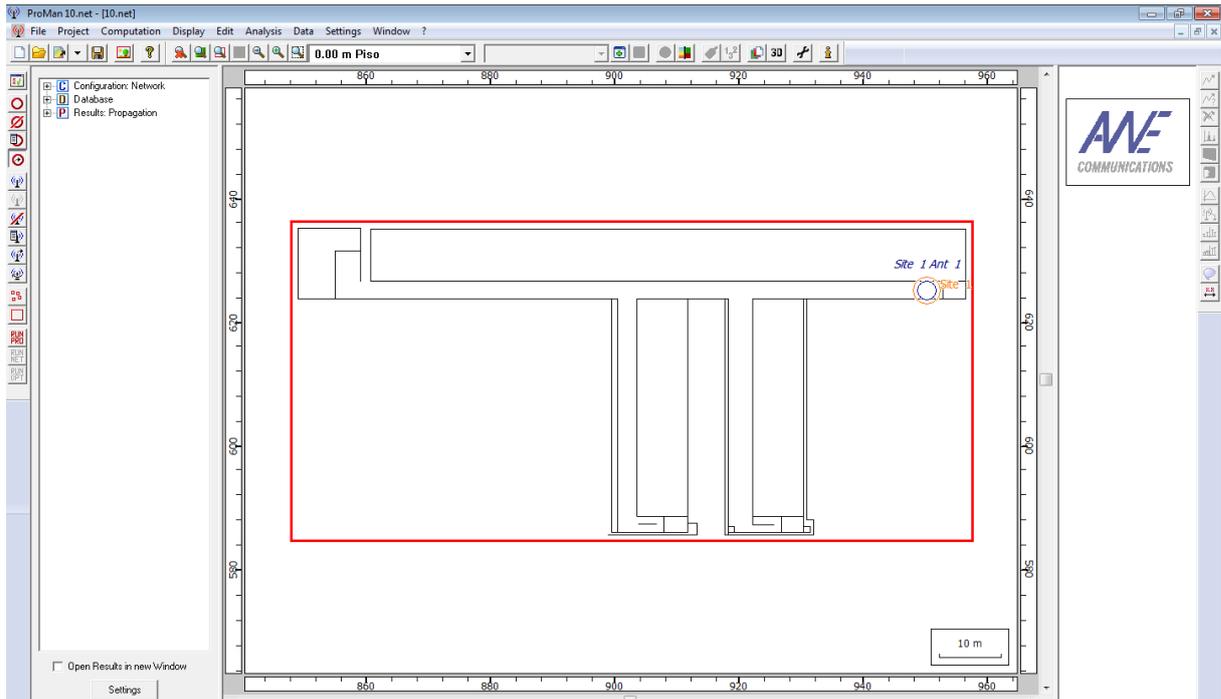


Figura 4.10: Tela do ProMan com o cenário das medições importado.

O ProMan foi utilizado de modo a respeitar as características envolvidas no processo de medição. No *setup* do novo projeto, foram definidos os parâmetros iniciais de interface (*Propagation only*), de cenário (*Indoor or campus scenarios*) e selecionado o arquivo com o cenário pré-processado, conforme exibido na Figura 4.11.

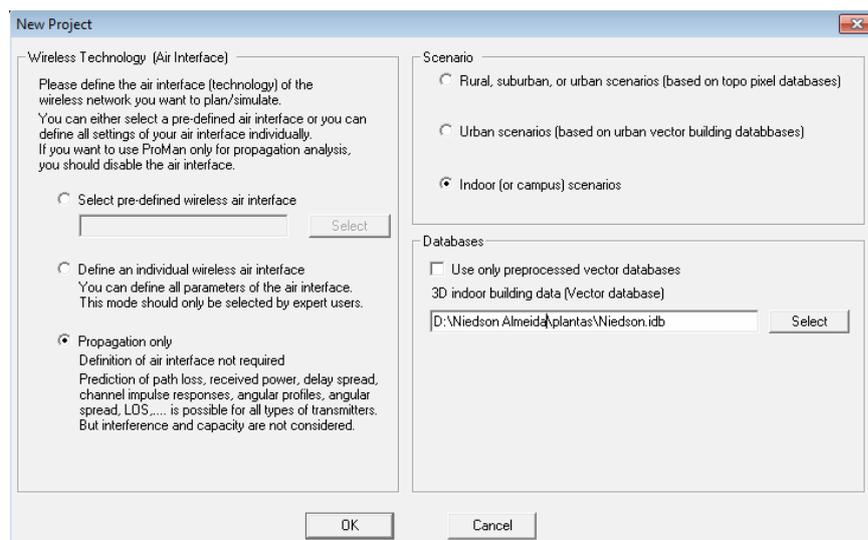


Figura 4.11: ProMan: Novo projeto.

Em seguida, no *setup* do novo projeto de propagação de ondas, o site criado foi definido para o tipo de transmissor (*site with sectors*) e com irradiação de maneira isotrópica (*Omni Site*), de acordo com a Figura 4.12.

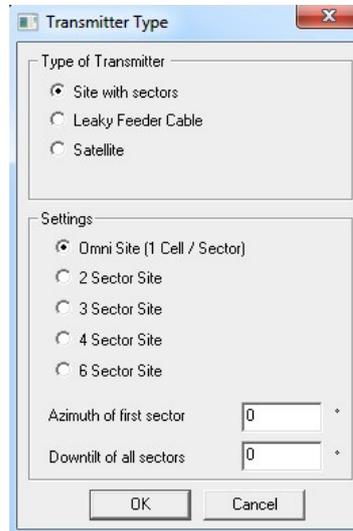


Figura 4.12: ProMan: *Site with sectors* e *Omni Site*.

O próximo passo foi a configuração do *site* e ajuste dos parâmetros de potência de saída do transmissor, frequência de propagação, altura, ganho e polarização da antena, conforme pode ser observado na Figura 4.13.

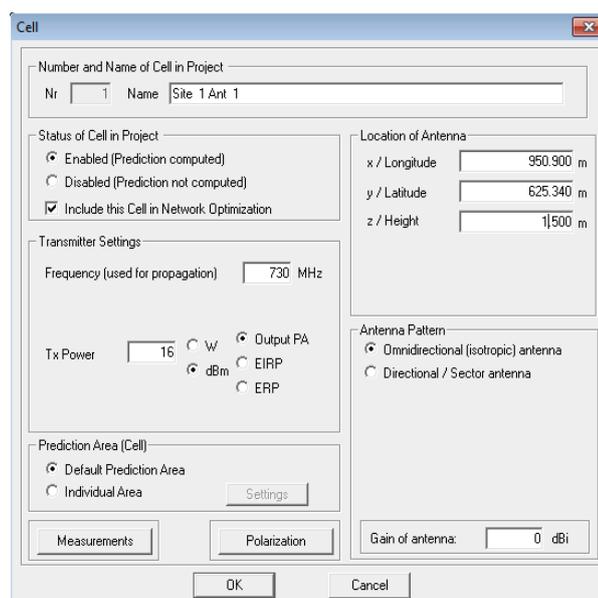


Figura 4.13: ProMan: Configuração do *site*.

Após o posicionamento do *site* (TX), foram definidos alguns parâmetros, tais como a seleção da área de simulação (*Area of Planning/Simulation*), diretórios e formatos de arquivos de saída contendo os dados da simulação da propagação, revisão dos sites, bases de dados e computação (Figura 4.14).

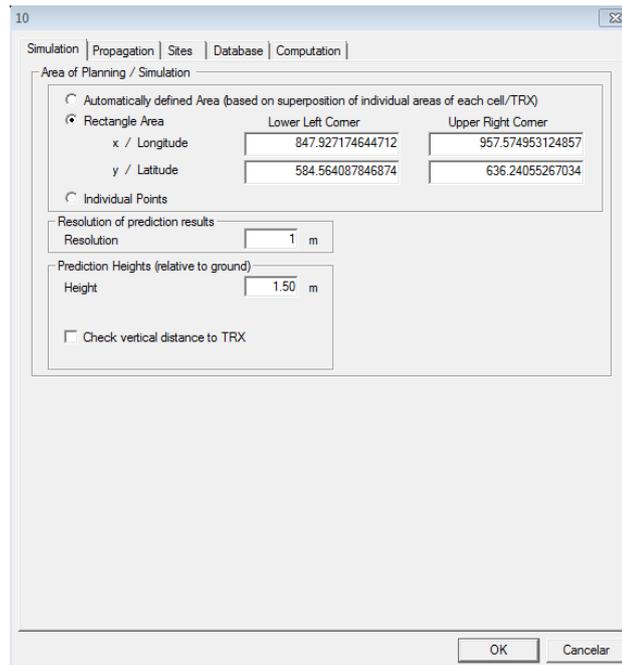


Figura 4.14: ProMan: Definição da área de simulação.

Na aba *Propagation* (Figura 4.15), o diretório de saída foi selecionado, bem como as opções de resultados calculados (*Received Power*, *Field Strength*, *Path Loss*, *LOS Analysis*).

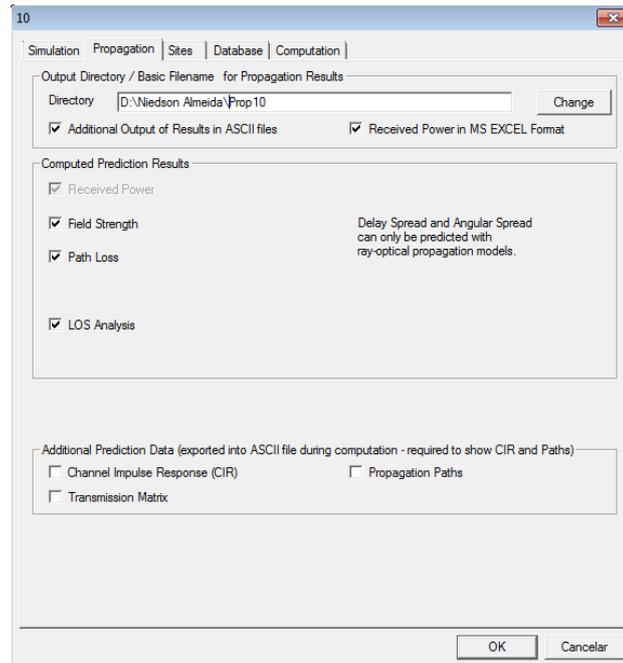


Figura 4.15: ProMan: Diretórios de saída e resultados calculados.

A Figura 4.16, exibe as configurações do site propriamente dito. Os parâmetros de potência do transmissor (TX Power), definida em 16 dBm, para a frequência de 730 MHz, usada na transmissão, além do padrão (isotrópica), altura (1,5 m) e polarização (vertical) da antena.

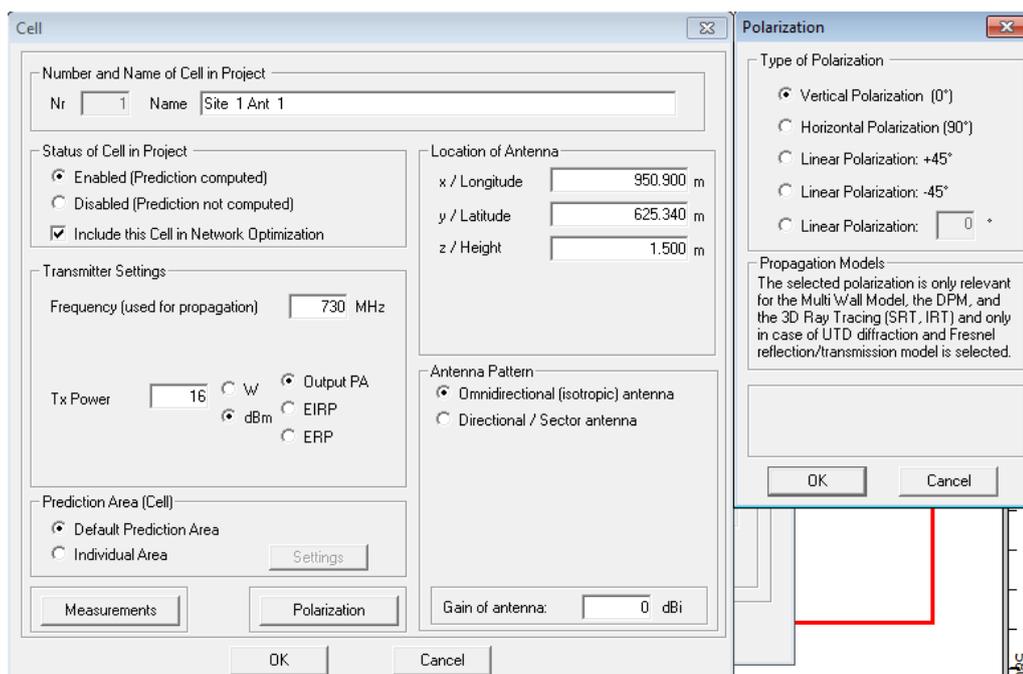


Figura 4.16: ProMan: Configuração de potência do TX, frequência de operação, padrão, polarização e altura da antena.

A Figura 4.17 mostra a tela de seleção dos modelos de predição. Foram selecionados os modelos de propagação baseados em raios ópticos (3D *Ray Tracing* (SRT – *Standard Ray Tracing*)).

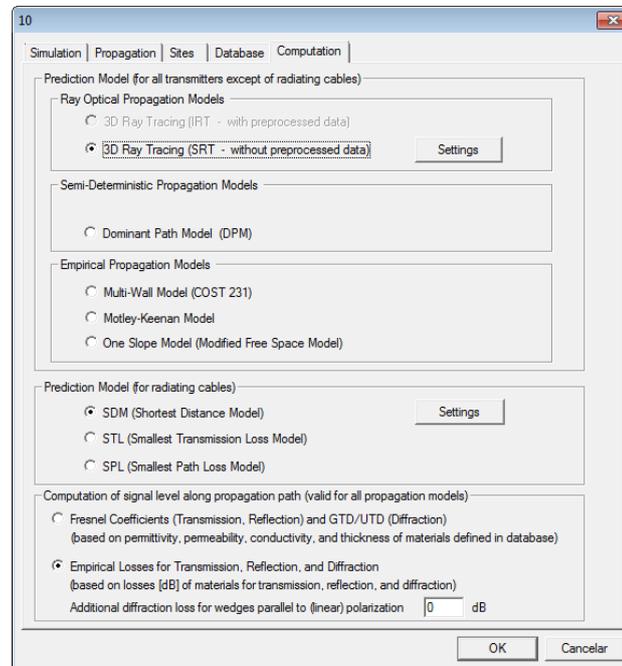


Figura 4.17: ProMan: Configuração do modelo de predição.

A Figura 4.18 mostra a parametrização do Traçado de Raios. Foram definidos, entre outros, o número máximo de transmissões (*Max. Transmissions*), número máximo de reflexões (*Max. Reflections*) e número máximo de difrações (*Max. Diffractions*). Foram ignoradas as interações adicionais e parâmetros de fase com o intuito de diminuir o tempo de processamento da predição. Os modelos determinísticos, utilizam as equações de Fresnel para a determinação da perda de reflexão e transmissão e as teorias geométrica e uniforme da difração (GTD e UTD) para a determinação da perda de difração. Estes modelos, geralmente, tem um tempo de computação ligeiramente mais longo e utiliza três parâmetros de materiais físicos (permissividade, permeabilidade e condutividade) [48]. Os parâmetros definidos na Figura 4.18 foram os que apresentaram um tempo de processamento razoável, dentro do que se esperava para a viabilidade do projeto, e sem detrimento para precisão dos resultados.

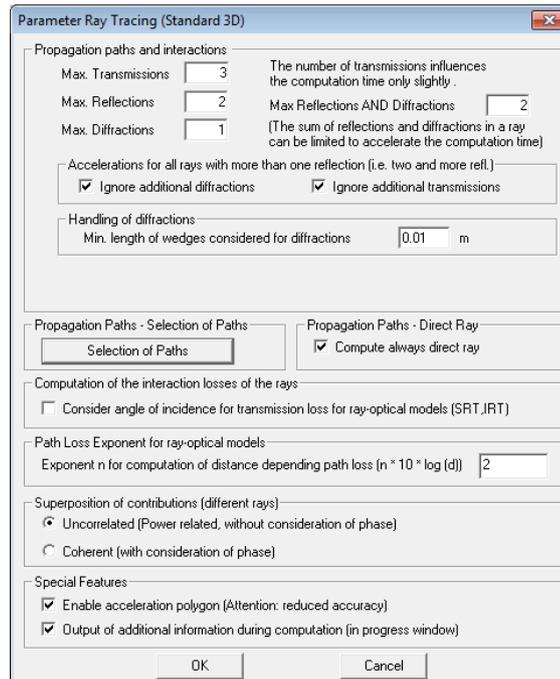


Figura 4.18: ProMan: Parametrização do Método do Traçado de Raios.

Com as configurações de cálculo de predição padrão, o tempo de processamento era de aproximadamente 40 minutos para o ambiente importado. Com as configurações descritas, foi possível diminuir consideravelmente esse tempo para algo em torno de 8 minutos, sem detrimento da precisão da predição. Os resultados pontuais puderam ser extraídos e tratados de maneira separada. Posteriormente, esses resultados foram comparados com os resultados dos procedimentos. A Figura 4.19 exibe o processo de cálculo da predição.

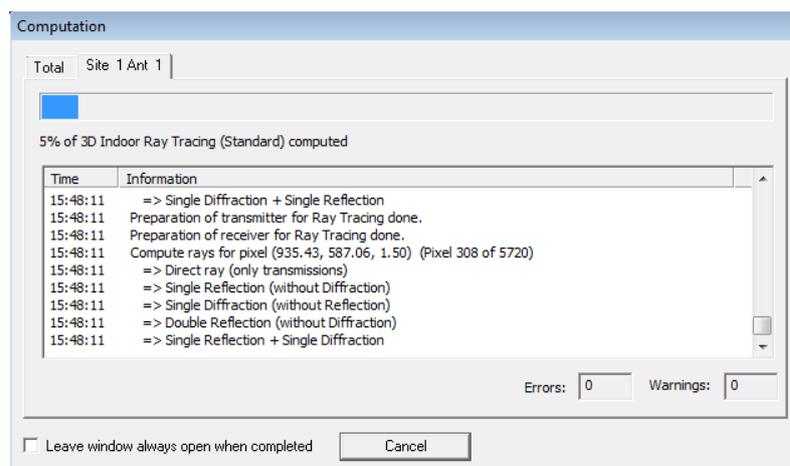


Figura 4.19: ProMan: Cálculo sendo efetuado.

#### 4.6. Metodologia de medição

Os resultados experimentais foram obtidos no IFPB – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Campus João Pessoa. Para tanto, como ambiente de medição, foram utilizados os corredores dos laboratórios da área de Eletroeletrônica, da Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica e do PET em Engenharia Elétrica.

As medições foram realizadas mediante a utilização dos instrumentos e dispositivos listados na Tabela 1. Para a transmissão do sinal (TX) utilizou-se um gerador de sinais Agilent Technologies, modelo E8257D, fixo no início do corredor dos laboratórios de Eletroeletrônica, com uma potência de saída de 16 dBm, atuando na frequência CW (*Continuous Wave*) de 730 MHz, acoplado a uma antena telescópica e transmitindo o sinal ao longo de 88 metros do corredor principal (Figura 4.20, Corredor 1). As medições nesse corredor (com visada) foram realizadas até os 55 m, logo após a entrada do segundo corredor transversal (Figura 4.20, Corredor 3).

No receptor (RX), foram utilizados uma antena telescópica, acoplada a um analisador de espectro portátil do fabricante Rohde & Schwarz, modelo FSH8, posicionados sobre uma base móvel. Um *laptop* também foi utilizado para anotações dos dados.

Tabela 1: Instrumentos e dispositivos utilizados nas medições.

Descrição	Fabricante	Modelo
Gerador de sinais	Agilent Technologies	E8257D
Antenas telescópicas omnidirecionais	-	-
Analisador de Espectro	Rohde & Schwarz	FSH8
Laptop	Apple	MacBook Pro
Base móvel	-	-

Em seguida, foram feitas medições nos corredores da Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica (Figura 4.20, Corredor 2) e do PET em Engenharia Elétrica (Figura 4.20, Corredor 3), perpendiculares ao corredor dos laboratórios da área de eletroeletrônica, distantes do gerador de sinais e da antena transmissora 31 m e 49 m, respectivamente, desta vez sem visada direta. Para esses dois casos, os dados medidos foram obtidos a partir do início desses corredores até os seus 15 m.

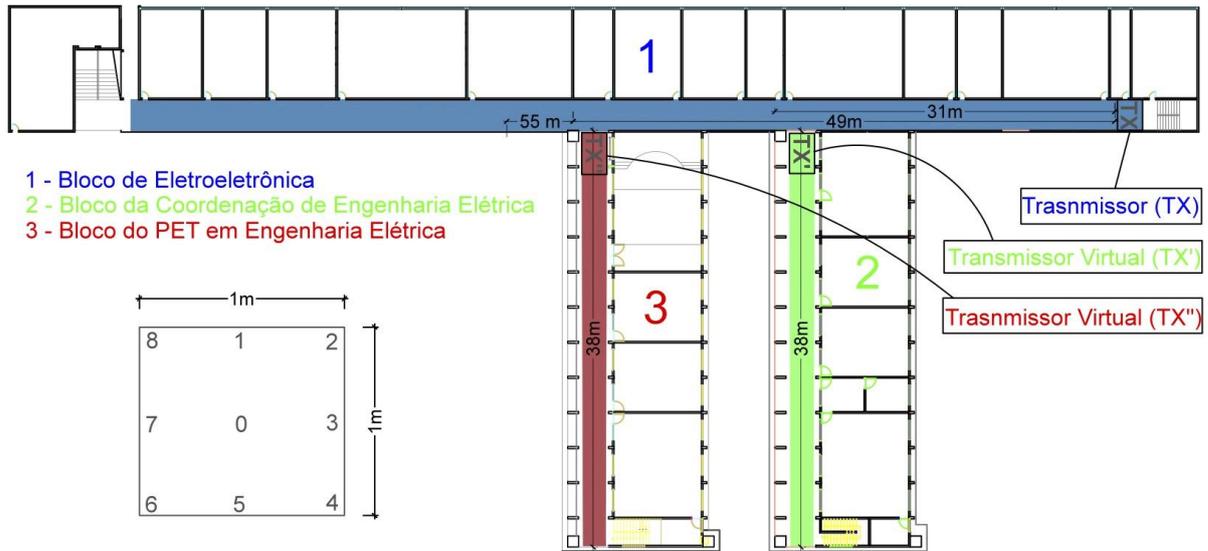


Figura 4.20: Esquema dos transmissores virtuais (TX' e TX'').

As medições foram feitas usando a seguinte metodologia:

- a) O TX foi posicionado no início do corredor principal (Bloco de Eletroeletrônica), conforme Figura 4.20;
- b) Com o equipamento RX sobre uma base móvel, foram feitas as medições de potência recebida a partir de 1 m de distância do transmissor, (Figura 4.21 e 4.22);

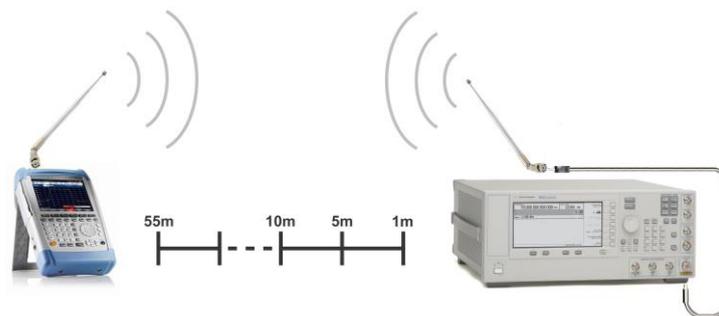


Figura 4.21: Esquema do *setup* de medição.

- c) Após essa medição inicial, foram feitas medições a 5 m de distância do TX;
- d) A partir dos 5 m, o passo das medições passou a ser 5 m. Portanto, as medidas seguintes foram 10 m, 15 m, 20 m, 25 m, 30 m, 35 m, 40 m, 45 m, 50 m e 55 m, conforme mostrado na Figura 4.22;

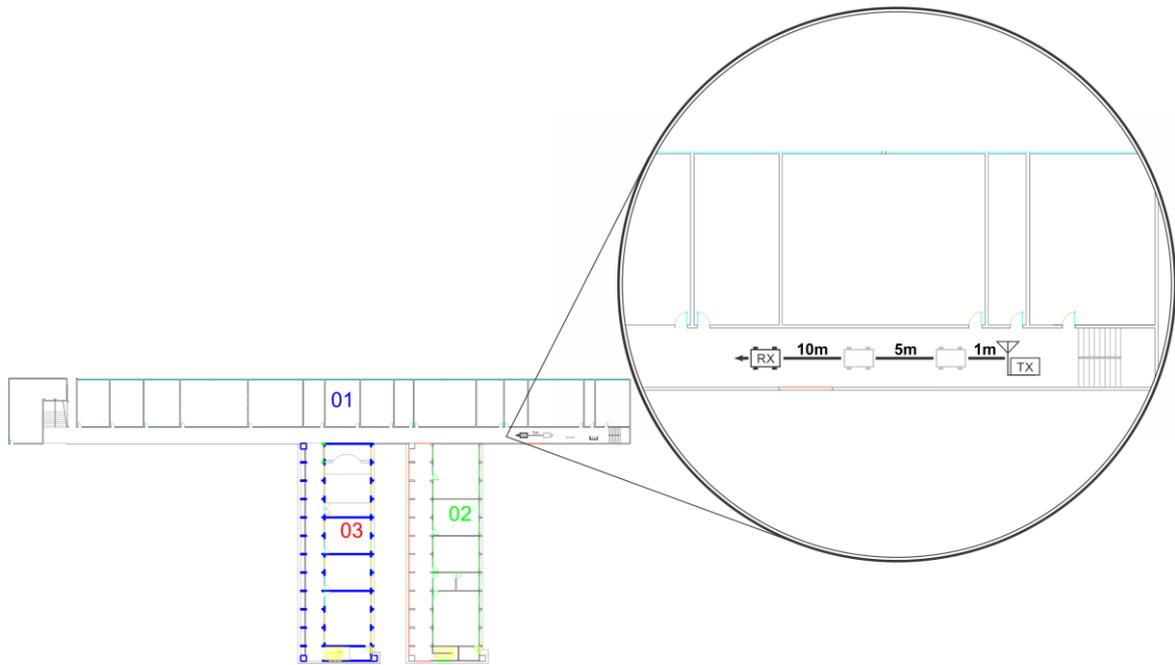


Figura 4.22: Esquema dos corredores de medição.

- e) O mesmo procedimento foi feito nos corredores transversais, iniciando do ponto de convergência dos corredores até os 15 m, ao passo de 5 m;
- f) O valor obtido para cada ponto de medição é o resultado da média de 9 medições realizadas, em uma área de  $1 \text{ m}^2$  em torno do ponto central, conforme mostrado na Figura 4.23, para posterior comparação com os resultados previamente simulados;

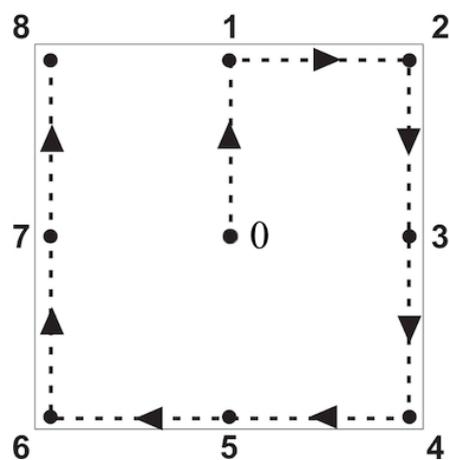


Figura 4.23: Esquema de medição nos pontos.

- g) Para cada ponto, foi observada um espaçamento de 0,5 m, resultando em um  $1 \text{ m}^2$  de medição para cada medição, conforme Figura 4.24.

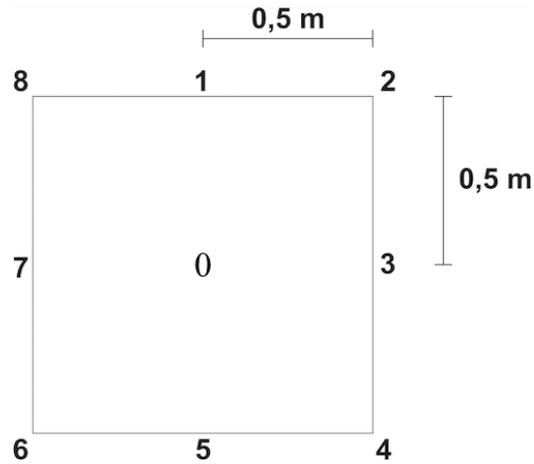


Figura 4.24: Esquema de medição nos pontos e a distância entre eles.

A Tabela 2 mostra os parâmetros utilizados nas medições, semelhantes aos utilizados no processo de simulação.

Tabela 2: Parâmetros utilizados nas medições.

Potência TX	Frequência	Altura da Antena	Passo	Polarização	Ganho
16 dBm	730 MHz	1,50 m	5 m	Vertical	0 dBm

A Figura 4.25 mostra o *setup* de medição (TX e RX).



Figura 4.25: *Setup* de medição: TX (a) e base móvel com analisador de espectro com antena RX (b e c).

A metodologia de medição considerando a média de nove pontos dispostos e medidos em torno do ponto de referência central, de acordo com as Figuras 4.23 e 4.24, foi proposta com o intuito de se tentar diminuir o efeito do desvanecimento rápido (pequena escala). Esse tipo de oscilação no sinal recebido se torna mais evidente quando as medições são realizadas com a obtenção de apenas um valor por posição (como por exemplo, em um único ponto central - ponto zero), em campanhas pontuais. Além disso, os valores medidos também fornecem uma maior dimensão de espacialidade para o ambiente analisado. Desta forma, foram obtidos valores de potência recebida mais confiáveis, tendo como resultado uma curva mais suave em relação às medições pontuais como pode ser observado na Figura 4.26.

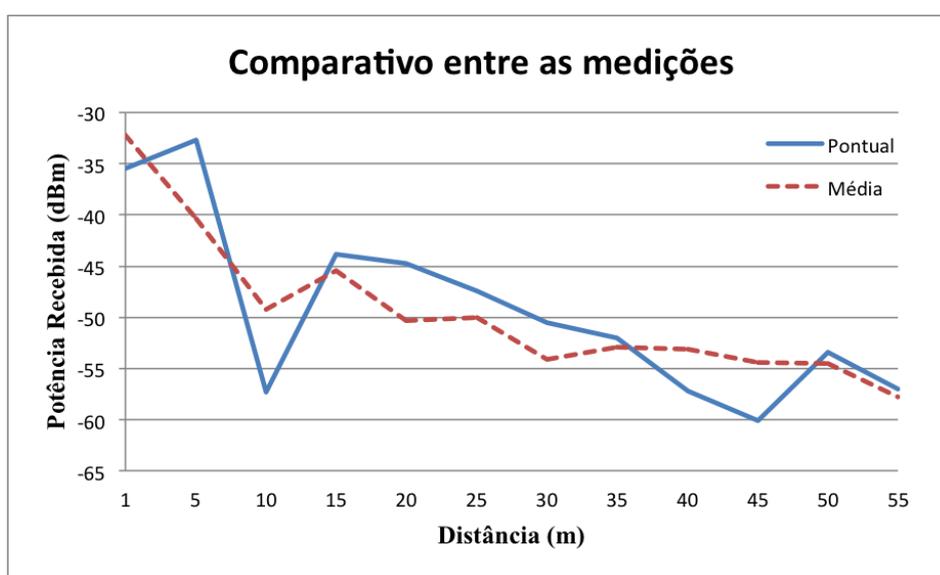


Figura 4.26: Gráfico comparativo entre a medição pontual e a realizada com média de nove pontos.

Durante as simulações, foi considerado um transmissor virtual no início de cada corredor transversal (TX' e TX'', respectivamente), com as mesmas características do TX utilizado no corredor principal, mas com potência de saída igual à obtida naquele ponto do corredor com visada, através do processo de simulação. Ou seja, a potência de saída do TX' e do TX'', respectivamente, é a mesma potência do TX, obtida através de simulação no corredor principal, nos pontos de 31 m e 49 m de distância. A Figura 4.20 ilustra a simulação feita utilizando a metodologia adotada, com ambos os transmissores virtuais posicionados no início de cada corredor transversal. A Figura 4.20, complementada pelas Figuras 4.23 e 4.24, também apresenta o método de medição com a média dos nove pontos.

## 4.7. Resultados

Os resultados obtidos a partir da simulação com o ProMan podem ser observados na Figura 4.27 que representa a cobertura do sinal propagado no ambiente *indoor* do campus.

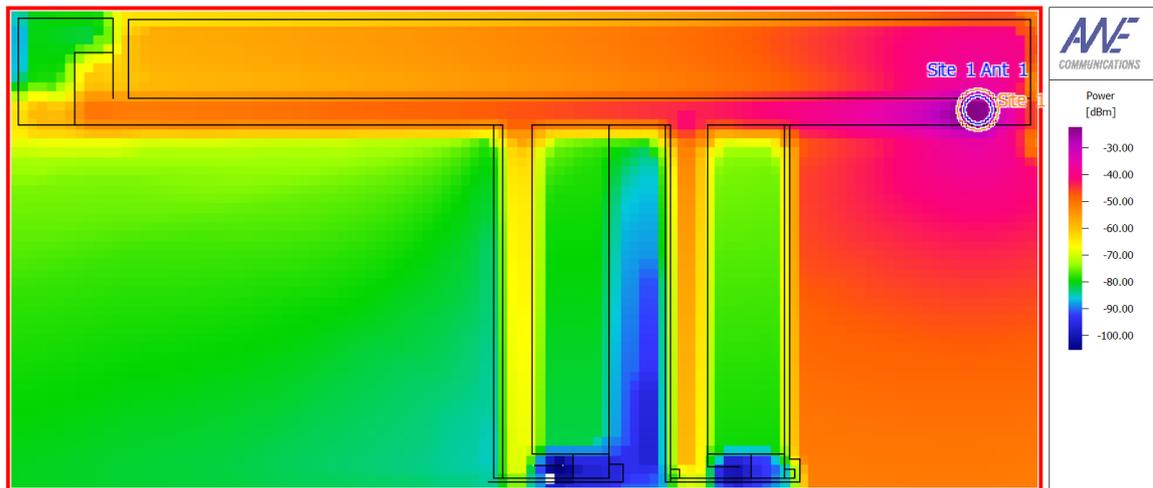


Figura 4.27: Resultado da simulação.

Para obtenção dos resultados da potência recebida em razão da distância a partir do transmissor, foi utilizada a opção de análise de dados onde foi possível traçar uma linha reta do transmissor até o ponto desejado, como pode ser observado na Figura 4.28.

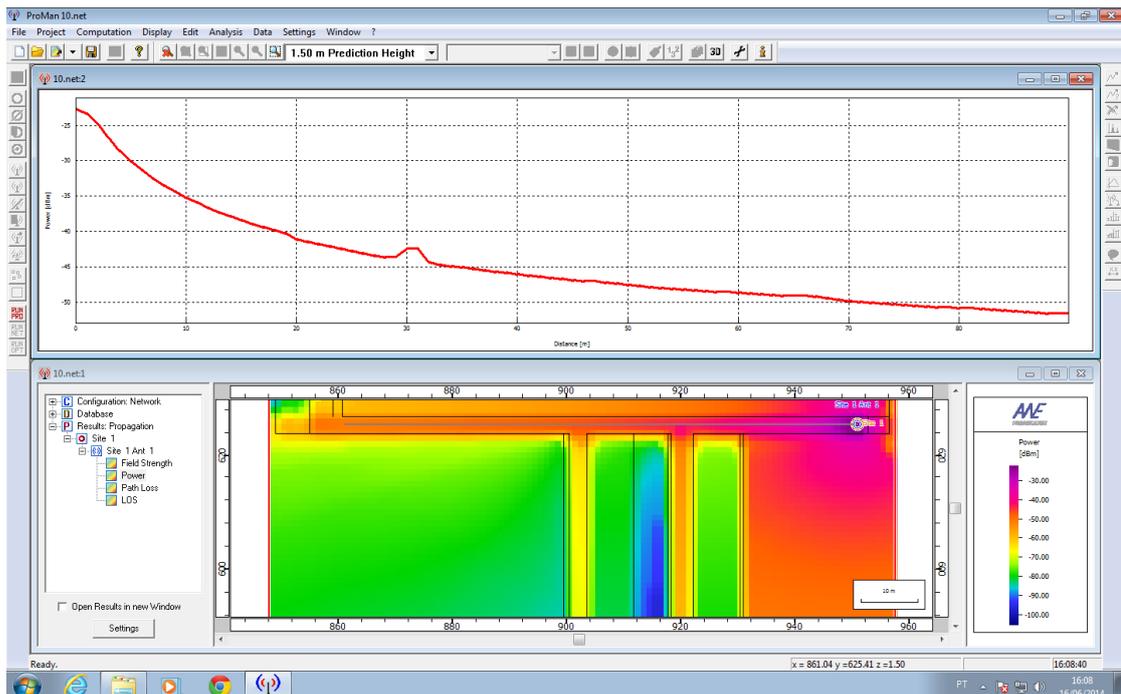


Figura 4.28: Extração dos dados simulados.

Os resultados simulados e medidos para o corredor principal (Figura 4.20 – Corredor 1) foram comparados entre si, conforme o gráfico da Figura 5.28. Além da comparação entre simulação e medição, utilizou-se um resultado calculado a partir da formulação da Perda no Espaço Livre. Os resultados foram normalizados para melhor visualização das curvas sobrepostas.

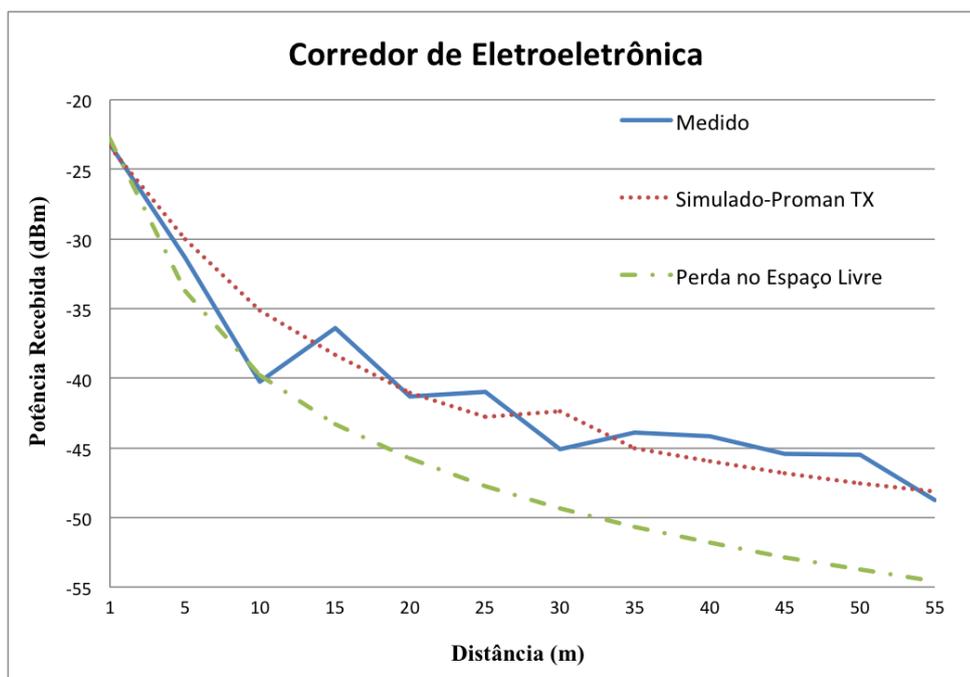


Figura 4.29: Comparação dos valores simulados e medidos no corredor de Eletroeletrônica.

Notou-se que os dados simulados, medidos e calculados foram concordantes, como previsto, devido a existência de visibilidade entre transmissor e receptor e a predominância da componente direta com relação às componentes de múltiplo percurso.

Da mesma maneira, foram comparados os resultados simulados, medidos e calculados (através da fórmula de perda no espaço livre), nos corredores transversais. Inicialmente, para o corredor da Coordenação de Engenharia Elétrica (Figura 4.20 – Corredor 2), conforme gráfico da Figura 4.30. Logo em seguida, os mesmos resultados foram obtidos também para o corredor do PET em Engenharia Elétrica (Figura 4.20 – Corredor 3), conforme gráfico da Figura 4.31. Para ambos os corredores, as medições e simulações foram feitas considerando a distância máxima de 15 m, a partir de seu início. Nesse caso, como descrito anteriormente, os valores simulados foram obtidos considerando-se a existências de dois transmissores virtuais (TX' e TX'') na entrada de cada corredor e com potência de transmissão correspondente à obtida por simulação no corredor principal (Figura 4.20 – Corredor 1), naqueles respectivos

pontos. Ou seja, a potência de saída do TX' e TX'' é a mesma potência do TX simulado nos pontos de 31 m e 49 m, respectivamente, do corredor principal. Também foram coletados valores de simulações considerando apenas o TX real, preservando as mesmas características iniciais, incluindo a posição no início do corredor principal (Figura 4.20 – Corredor 1). Com esta última simulação (nos corredores transversais, considerando apenas o TX real), constatou-se uma boa concordância entre a curva das medições com a metodologia proposta e os valores das simulações.

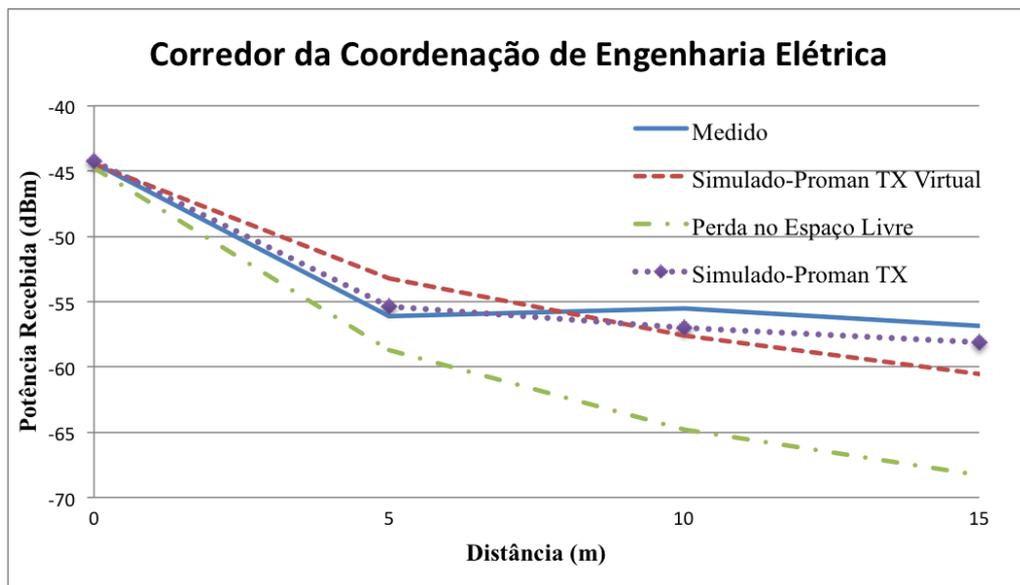


Figura 4.30: Comparação dos valores simulados e medidos no corredor da Coordenação de Engenharia Elétrica.

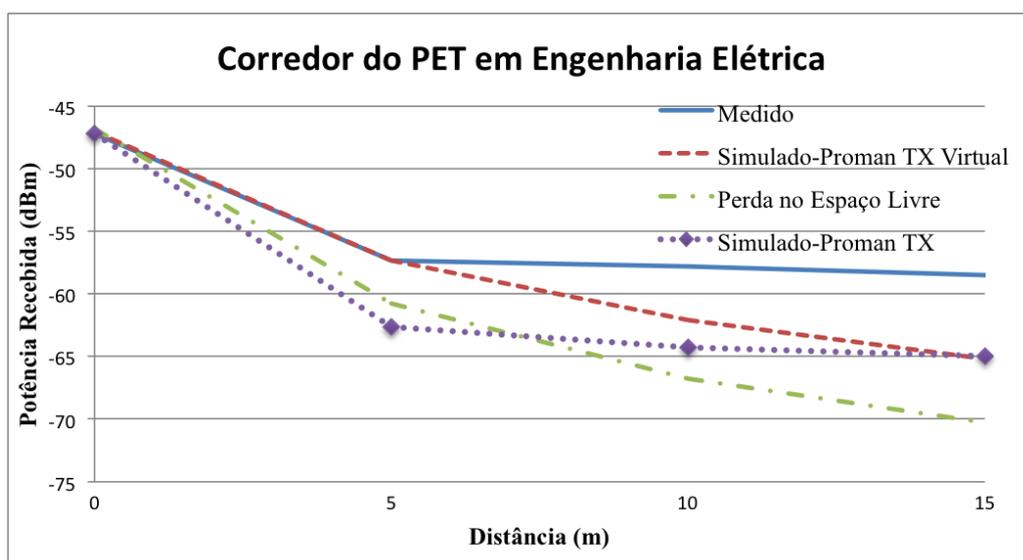


Figura 4.31: Comparação dos valores simulados e medidos no corredor do PET.

Sendo assim, para determinar os valores simulados através do software ProMan foram traçadas retas a partir do TX, TX' e TX'' até o ponto de medição desejado. Com a metodologia adotada, foi possível realizar esta ação de modo a conseguir extrair os resultados simulados dos corredores para comparação com os valores ou resultados medidos e calculados. Para a simulação nos corredores transversais, uma linha foi traçada a partir do início de cada um deles.

Foi possível observar que os dados simulados, medidos e calculados também foram concordantes para ambos os corredores transversais. Neste caso, verifica-se que para a predição de cobertura de sinais com ausência de visada entre transmissor e receptor, não se torna necessário realizar medições ao longo de toda sua extensão de modo a se verificar o nível do sinal e, conseqüentemente, se existe cobertura nesses ambientes. Para isso, basta ter conhecimento do nível do sinal na entrada de cada corredor e, a partir daí, estimar a cobertura ao longo deles, tomando como base a fórmula de Friis. Com isso, poupa-se tempo de medição e aumenta-se o grau de simplicidade do processo de predição de cobertura, sem prejuízo para a confiabilidade dos resultados.

---

## 5. Conclusões

---

### 5.1. Considerações Finais

Neste trabalho foi realizada a análise e a caracterização da cobertura de sinais em ambientes *indoor* na faixa de 700 MHz, escolhida em razão de sua designação para uso de sistemas de comunicação em banda larga 4G/LTE no Brasil. Seu objetivo foi propor uma metodologia baseada em medições de modo a promover uma simplificação no processo de predição e cujos resultados fossem concomitantes com os resultados simulados e teóricos apresentados, dentro do ambiente *indoor* escolhido para este estudo.

Para a obtenção dos valores experimentais, foi proposto um método de medição, onde se obteve uma média adquirida a partir de nove pontos medidos em uma área de um metro quadrado, em torno do ponto de referência central, uniformemente espaçados, em um cenário *indoor*, de modo a se minimizar o efeito do desvanecimento rápido e se obter uma boa abrangência espacial. Observou-se também, a partir da metodologia de medição proposta, que as oscilações no sinal recebido se tornaram mais evidentes quando as medições foram realizadas com a obtenção de apenas um valor por posição, em campanhas pontuais. Além disso, os valores medidos também forneceram uma maior dimensão de espacialidade para o ambiente analisado, o que garantiu valores de potência recebida mais confiáveis, resultando, também em uma curva mais suave em relação às medições pontuais.

Para a obtenção dos valores simulados, nas situações sem linha de visada (nos corredores transversais) foram utilizadas duas fontes virtuais (TX' e TX'') no início de cada corredor com as mesmas características do TX utilizado no corredor principal mas com potência de saída igual à obtida naquele ponto do corredor com visada, através do processo de simulação. Dessa forma, a potência de saída do TX' e do TX'', respectivamente, foi a mesma potência do TX, obtida através de simulação no corredor principal, nos pontos de convergência dos corredores (31 m e 49 m de distância do TX).

Desse modo, a metodologia utilizada foi aplicada de maneira tal a corroborar com os métodos determinísticos e teóricos utilizados durante o processo de simulação dos resultados.

Assim, as principais contribuições deste trabalho foram:

- a) Metodologia utilizada: método utilizando uma média de nove pontos medidos em uma área ao invés de apenas um único ponto (em uma medição pontual), tornou a medição mais confiável e permitiu a minimização efeito do desvanecimento rápido. Foi observado que os valores pontuais apresentaram uma divergência média na ordem de 3,7 dBm;
- b) Verificou-se, pois, que para a predição de cobertura de sinais nos corredores transversais, com ausência de visada entre transmissor e receptor, basta conhecer o nível do sinal na entrada de cada corredor para estimar a cobertura ao longo deles. Desta forma, é possível racionalizar o tempo de predição, além de garantir o grau de simplicidade do processo de predição de cobertura, sem prejuízo para a confiabilidade dos resultados.

Este estudo mostrou uma concordância satisfatória entre os resultados simulados, experimentais e calculados através da fórmula de Friis, em ambos os casos – com e sem linha de visada, o que comprova a eficácia do método proposto para as condições avaliadas, de tal modo que, a análise dos resultados obtidos permitiu constatar os efeitos aplicados aos sinais em razão do ambiente de propagação *indoor*, caracterizado pelos corredores do campus, para o planejamento adequado na implementação de redes com reforçadores de sinal, tanto para aplicações de telefonia e banda larga móvel, como para a recepção de sinal digital de televisão.

## 5.2. Trabalhos Futuros

Como proposta de continuidade desse trabalho, novas pesquisas podem ser realizadas com o objetivo de ampliar as avaliações nele realizadas considerando novas configurações e, conseqüentemente, novas variáveis como:

- Caracterização de cobertura de sinais em ambientes *indoor* gerados a partir de antenas transmissoras diretivas, com análise dos efeitos causados pela variação de polarização e azimutes;
- Estudo sobre a convivência entre o WiMax e o *downlink* de satélite em banda C padrão e estendida;
- Estudos sobre novas técnicas de modulação e multiplexação para agregação de portadoras para aumento de *throughput* em redes de banda larga móveis;
- *Switch-off*: o desligamento do analógico e os desafios de interiorização da TV Digital no Brasil;
- 5G: requisitos e soluções.

---

# Referências

---

- [1] S. Grubisic, “Técnica de Traçado de Raios associada a meta-heurísticas para otimização do posicionamento de antenas em ambientes interiores.” UFSC. Tese de Doutorado, Florianópolis, p. 148, 2012.
- [2] Agência Nacional de Telecomunicações, “Resolução N° 625, de 11 de Novembro de 2013,” *Diário Oficial da União*. Diário Oficial da União, Brasília, 2013.
- [3] Á. A. Souto, D. B. Cavalcante, R. P. Martins, and H. Costa, “Um Plano Nacional para Banda Larga - O Brasil em Alta Velocidade.” Ministério das Comunicações, Brasília, p. 192, 2012.
- [4] T. Cisco, “Cisco Visual Networking Index : Global Mobile Data Traffic Forecast Update , 2013 – 2018,” p. 40, 2014.
- [5] 3GPP, “3rd Generation Partnership Project - Overview of 3GPP Release 13 V0.0.6 (2014-06).” p. 93, 2014.
- [6] 3GPP, “3rd Generation Partnership Project - About 3GPP,” 2014. [Online]. Available: <http://www.3gpp.org/about-3gpp/about-3gpp>. [Accessed: 07-Sep-2014].
- [7] Inter-American Telecommunication Commission, “X Meeting of permanent consultative committee II - Document submitted by the Chair of the Working Group: Proposals for the Work of the conference,” vol. 07. Genebra, 2007.
- [8] Presidência da República, “Decreto 5.820, de 29 de Junho de 2006.” Brasília, 2006.
- [9] Presidência da República, “Decreto 8.061, de 29 de Julho de 2013.” Brasília, 2013.
- [10] Ministério das Comunicações, “Portaria N° 477, de 20 de Junho de 2014.” Diário Oficial da União, Brasília, 2014.
- [11] 3GPP and M. Nohrborg, “3rd Generation Partnership Project - Long Term Evolution (LTE/E-UTRAN),” 2013. [Online]. Available: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>. [Accessed: 19-Nov-2014].
- [12] N. P. Jorge, “Desenvolvimento de Metodologia e Projecto de Sistemas de Quarta Geração Móvel num Ambiente Indoor e Outdoor.” Univesidade de Luanda. Dissertação de Mestrado, Luanda, p. 146, 2011.

- [13] K. D. Lowhan, "Synchronization Analysis and Simulation of a Standard IEEE 802.11g OFDM Signal." Monterey, CA, 2004.
- [14] M. A. F. R. Almeida, "Introdução ao LTE – Long Term Evolution," 2013. [Online]. Available: [http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialintlte/pagina\\_3.asp](http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialintlte/pagina_3.asp). [Accessed: 12-Sep-2014].
- [15] LitePoint Corporation, "Practical Manufacturing Testing of 802.11 OFDM Wireless Devices." Sunnyvale, CA, 2010.
- [16] 3GPP and J. Wannstrom, "3rd Generation Partnership Project - Long Term Evolution (LTE-Advanced)," 2013. [Online]. Available: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced>. [Accessed: 28-Nov-2014].
- [17] F. L. Minozzo, "Estudo Comparativo entre o Padrão IEEE 802.11g e o Draft 2.0 IEEE 802.11n." San Jose, 2009.
- [18] J. Oh, M. Thiel, and K. Sarabandi, "Wave-Propagation," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 56, No. 2, vol. 56, no. 2, Michigan, pp. 76–88, 2014.
- [19] E. Tude, "Enlace rádio digital ponto a ponto," 2004. [Online]. Available: [http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialrdig/pagina\\_1.asp](http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialrdig/pagina_1.asp).
- [20] S. Grubisic, "Predição de campos em ambientes interiores utilizando a Técnica de Traçado de Raios." UFSC. Dissertação de Mestrado, Florianópolis, p. 98, 2005.
- [21] P. Chaves, "Utilização das Redes Neurais Artificiais na Adaptação de Modelos de Propagação em Ambiente Fechado," *CNMAC*, Instituto de Estudos Superiores da Amazônia, Belém, 2004.
- [22] T. S. Rappaport, *Comunicacoes Sem Fio - Principios e Praticas*, 2ª Edição. Prentice Hall, 2008.
- [23] J. P. A. Bastos, *Eletromagnetismo para engenharia: estática e quase-estática*. Florianópolis: Editora da UFSC, 2004.
- [24] L. Moreno, "Propagation topics in radio link design," *Radio Engineering Services*, Torino, p. Section 1, 2006.
- [25] V. K. Garg and J. E. Wilkes, *Principals and applications fo GSM*. New Jersey: Prentice Hall, 1999.
- [26] M. D. Yacoub, *Propagation considerations for mobile radio system*. Campinas: Brazil publications, 1996.
- [27] W. a. Shittu, B. G. Bajoga, F. Anwar, and M. J. E. Salami, "Prediction of received signal power and propagation path loss in open/rural environments using modified Free-Space loss and Hata models," *2008 IEEE Int. RF Microw. Conf.*, pp. 126–130, Dec. 2008.

- [28] K. Feher, *Wireless digital communication: Modulation and spread spectrum applications*. New Jersey: Prentice Hall, 1995.
- [29] H. T. Friis, "A note on a Simple Transmission Formula," *Proc. IRE*, vol. 34, no. 5, pp. 254–256, 1946.
- [30] Y. Rahmat-Samii, S. Xu, and I. Kim, "Generalised correction to the Friis formula: quick determination of the coupling in the Fresnel region," *IET Microwaves, Antennas Propag.*, vol. 7, no. 13, pp. 1092–1101, Oct. 2013.
- [31] E. M. Miyoshi and C. A. Sanches, *Projetos de Sistemas Rádio*, 4<sup>a</sup> ed. São Paulo: Editora Érica, 2010.
- [32] J. Oh, M. Thiel, W. Hong, K. Sarabandi, and A. Arbor, "Indoor wave propagation measurements and modeling for evaluation of coverage enhancement using a repeater system," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 3.
- [33] M. N. O. Sadiku, *Elements of Electromagnetics*, 2<sup>a</sup> Edição. Oxford University Press, 1994.
- [34] "Difração - Princípio de Huygens," *Instituto de Física - USP*, 2007. [Online]. Available: <http://efisica.if.usp.br/optica/universitario/difracao/huygens/>. [Accessed: 09-Jan-2014].
- [35] M. F. Cátedra and J. P. Arriaga, *Cell Planning for Wireless Communications.*, 1<sup>a</sup> Edição. Artech House, 1999.
- [36] J. Zarkovi, P. Stojkovi, and N. Neskovi, "3D Statistical Propagation Model for Indoor WLAN Radio Coverage," *19th Telecommunications Forum (TELFOR 2011)*, pp. 461–464, 2011.
- [37] V. P. A. Santos, F. J. B. da Fonseca, L. J. de Matos, W. D. T. Meza, G. L. Siqueira, and L. a. R. Ramirez, "Indoor signal coverage of a leaky feeder cable," *2013 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC)*, Ieee, Rio de Janeiro, pp. 1–5, Aug-2013.
- [38] A. D. A. Mota, L. T. M. Mota, and R. Rondon Gonzalez, "Determinação da atenuação de sinais em ambientes indoor via lógica nebulosa," *Semin. Ciências Exatas e Tecnológicas*, vol. 32, no. 2, pp. 199–212, Sep. 2011.
- [39] F. A. Alves, M. Rosa, M. Lins, and S. Gonçalves, "Efficient Ray-Tracing Method for Indoor Propagation Prediction," *Microwave and Optoelectronics, SBMO/IEEE MTT-S International Conference*, pp. 435–438, 2005.
- [40] W. L. STUTZMAN and G. A. THIELE, *Antenna Theory and Design*, 2<sup>a</sup> Edição. Wiley, 1998.
- [41] F. Jensen, S. Mourgues, and M. M. Space, "GTD ray-tracing by mapping," pp. 1–4, 1996.

- [42] C. Lauterbach, S.-E. Yoon, and D. Manocha, "Ray-Strips: A Compact Mesh Representation for Interactive Ray Tracing," *2007 IEEE Symp. Interact. Ray Tracing*, pp. 19–26, Sep. 2007.
- [43] J. Lee, Y. Shin, W.-J. Lee, S. Ryu, and J. Kim, "Real-time ray tracing on coarse-grained reconfigurable processor," *2013 Int. Conf. Field-Programmable Technol.*, pp. 192–197, Dec. 2013.
- [44] S. Y. Seidel and T. S. Rappaport, "Site-specific propagation prediction for wireless in building personal communication system design," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 43, pp. 879–891, 1994.
- [45] F. A. Alves, G. M. Feitoza, A. G. Neto, J. C. e Silva, and J. N. Carvalho, "Software didático para predição de cobertura em ambiente indoor." João Pessoa, 2004.
- [46] AWE-Communications, "WinProp - Overview." Stuttgart, Germany, 2006.
- [47] AWE-Communications, "Aman User Reference Guide - WinProp Antenna Pattern Editor." Stuttgart, Germany, 2006.
- [48] AWE-Communications, "ProMan Manual - WinProp Propagation Manager." 2006.