

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE INFORMÁTICA  
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM TECNOLOGIAS DE REDES DE  
COMPUTADORES

FRANCISCO ROYER

**Avaliação Quantitativa de Sites para a  
Implantação de uma Rede LTE no Centro  
Histórico de Porto Alegre**

Trabalho de Conclusão apresentado como  
requisito parcial para a obtenção do grau de  
Especialista

Prof. Dr. Juergen Rochol  
Orientador

Prof. Valter Roesler  
Prof. Alexandre da Silva Carissimi  
Coordenadores do Curso

Porto Alegre, outubro de 2010.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Prof. Carlos Alexandre Netto

Vice-Reitor: Prof. Rui Vicente Oppermann

Pró-Reitor de Pós-Graduação: Prof. Aldo Bolten Lucion

Diretor do Instituto de Informática: Prof. Flávio Rech Wagner

Coordenador do Curso: Prof. Valter Roesler

Vice-Coordenador do Curso: Prof. Alexandre da Silva Carissimi

Bibliotecária-Chefe do Instituto de Informática: Beatriz Regina Bastos Haro

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em especial ao meu orientador, professor Juergen Rochol, que tornou claro os caminhos a serem percorridos ao longo desta jornada. Sua dedicação e entusiasmo durante as aulas me serviram de exemplo e incentivo.

Agradeço a todos os colegas da Vivo e professores do Instituto de Informática da UFRGS que contribuíram de alguma forma para a elaboração deste trabalho.

Agradeço à minha família e aos amigos pela forma com a qual sempre me apoiaram e acreditaram no meu trabalho.

## SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	5
LISTA DE FIGURAS .....	8
LISTA DE TABELAS .....	9
RESUMO .....	10
ABSTRACT .....	11
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1 Histórico da Telefonia Móvel Celular .....	13
1.2 Evolução das Redes 3G.....	14
1.3 Expansão das Redes LTE.....	16
1.4 Objetivos do Trabalho.....	17
1.5 Estrutura do Trabalho.....	17
<b>2 SISTEMA LTE .....</b>	<b>18</b>
2.1 Acesso Múltiplo por Múltiplas Portadoras OFDMA e SC-FDMA .....	19
2.2 Técnicas de Múltiplas Antenas.....	21
2.3 Estrutura de Canal e Largura de Banda.....	23
2.4 Modulação .....	25
2.5 Interface de Rádio Comutada por Pacotes.....	26
2.6 Arquitetura de Rede EPS.....	27
2.7 Estação Rádio Base LTE.....	29
2.8 Estações Móveis LTE.....	30
<b>3 PLANEJAMENTO DA REDE DE RÁDIO CELULAR .....</b>	<b>31</b>
3.1 Propagação do Sinal.....	31
3.2 Modelos de Propagação.....	33
3.2.1 Modelo de Propagação no Espaço Livre.....	34
3.2.2 Modelo de Egli.....	34
3.2.3 Modelo de Okumura-Hata.....	34
3.2.4 Modelo COST 231.....	36
3.2.5 Modelo de Erceg.....	39
3.3 Raio de Cobertura da Célula.....	40
3.4 Plano de Frequência.....	42
<b>4 ESTUDO DE CASO: QUANTIFICAÇÃO DE SITES LTE NO CENTRO HISTÓRICO DE PORTO ALEGRE .....</b>	<b>44</b>
4.1 Quantidade de Terminais Móveis LTE.....	45
4.2 Demanda de Tráfego dos Usuários.....	46
4.3 Capacidade da Estação Rádio Base LTE.....	48
4.4 Quantidade de Sites.....	50
4.5 Legislação Municipal .....	52
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>53</b>
<b>6 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>57</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3G	Terceira Geração
3GPP	3rd Generation Partnership Project
3GPP2	3rd Generation Partnership Project 2
4G	Quarta Geração
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AEV	Área de Exposição ao Vento
AMPS	Advanced Mobile Phone System
ANATEL	Agencia Nacional de Telecomunicações
AS	Access Stratum
AUC	Authentication Center
BCU	Base Band Control Unit
BL	Banda Larga
BW	bandwidth
CDMA	Code Division Multiple Access
CN	Core Network
COST	European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research
CP	Cyclic Prefix
CS	Circuit Switch
DL	Downlink
DVD	Digital Video Disk
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
EiRP	Equivalent Isotropically Radiated Power
eNodeB	Evolved Node B
ERB	Estação Radio Base
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
E-UTRAN	Evolved UTRAN
EV-DO	Evolution Data Optimized

FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile
GW	Gateway
hab	habitantes
HD	Hard Disk
HLR	Home Location Register
HRDP	High Rate Data Packet
HSPA	High Speed Packet Access
HSDPA	High Speed Download Packet Access
HSUPA	High Speed Upload Packet Access
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEEE	Instituto of Electrical and Electronic Engineers
IP	Internet Protocol
IPTV	IP Television
LTE	Long Term Evolution
MAC	Medium Access Control
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MISO	Multiple Input Single Output
MME	Mobility Management Entity
MU-MIMO	Multiple User Multiple Input Multiple Output
NAS	Non Access Stratum
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiple
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PAPR	Peak to Average Power Ratio
PBH	Peak Busy Hour
PCEF	Policy Control Enforcement Function
PCRF	Policy Control and Charging Rules Function
P-GW	PDN Gateway
PDA	Personal Digital Assistant
PDN	Packet Data Network
PTT	Push to Talk
QAM	Quadrature Amplitude Modulation

QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
Rx	Recepção
RRU	Remote Radio Unit
RS	Rio Grande do Sul
RTT	Radio Transmission Technology
SAE	System Architecture Evolution
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SDMA	Space Division Multiple Access
S-GW	Serving Gateway
SIMO	Single Input Multiple Output
SISO	Single Input Single Output
SITAR	Sistema de Informações Técnicas para Administração das Radiocomunicações
SU-MIMO	Single User Multiple Input Multiple Output
SNR	Signal to Noise Ratio
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TD-SCMA	Time Division Synchronous Code Division Multiple Access
TV	Television
Tx	Transmissão
UE	User Equipment
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UL	Uplink
UMB	Ultra Mobile Broadband
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
VoIP	Voice over Internet Protocol
WCDMA	Wide Band Code Division Multiple Access
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Previsão do tráfego móvel total em todo o Mundo.....	12
Figura 1.2: Acessos e municípios cobertos por banda larga móvel.....	13
Figura 1.3: Evolução tecnológica dos sistemas celulares.....	14
Figura 1.4: Tempo requerido pelas redes 3G para o download de arquivos.....	15
Figura 1.5: Expansão das redes LTE pelo Mundo.....	16
Figura 2.1: Tecnologias de múltiplo acesso OFDMA e SC-FDMA.....	20
Figura 2.2: Princípios fundamentais das técnicas de múltiplas antenas.....	21
Figura 2.3: Evolução da tecnologia MIMO.....	22
Figura 2.4: Largura de banda de canal versus largura de banda de transmissão.....	23
Figura 2.5: Estrutura de quadro FDD tipo 1.....	24
Figura 2.6: Estrutura de quadro TDD tipo 2.....	24
Figura 2.7: Constelação.....	25
Figura 2.8: Arquitetura da rede EPS.....	27
Figura 2.9: Equipamentos eNodeB.....	29
Figura 2.10: Dispositivos móveis LTE.....	30
Figura 3.1: Mecanismos de propagação do sinal.....	32
Figura 3.2: Curvas de path loss do modelo Okumura-Hata.....	35
Figura 3.3: Definição gráfica dos parâmetros das equações Walfish-Ikegami.....	36
Figura 3.4: Intervalo entre células no modelo Okumura-Hata.....	42
Figura 3.5: Rede de frequência única com fator de reuso $K=1$ em estação rádio base com 3 Setores.....	43
Figura 4.1: Mapa do Centro Histórico de Porto Alegre.....	44
Figura 4.2: Taxa de download por usuário versus % usuários conectados na rede.....	47
Figura 4.3: Eficiência espectral versus relação sinal/ruído por tipo de antena.....	48
Figura 4.4: SNR em Função da Distância do Centro da Célula.....	49
Figura 4.5: Quantidade de sites considerando raio da célula de 600 metros.....	50
Figura 4.6: Quantidade mínima de sites no Centro Histórico de Porto Alegre.....	51
Figura 5.1: Quantidade de sites existentes, por operadora, no Centro Histórico.....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Resumo das principais características técnicas de desempenho oferecidas pelo LTE.....	18
Tabela 2.2: Largura de banda de transmissão versus largura de banda de canal LTE....	24
Tabela 2.3: Categorias das estações móveis LTE.....	30
Tabela 3.1: Parâmetros dos Modelos da Equação de Erceg.....	39
Tabela 3.2: LTE uplink link budgets.....	40
Tabela 3.3: LTE downlink link budgets.....	41
Tabela 3.4: Faixa de frequências 2,5 GHz para o LTE.....	42
Tabela 4.1: Estimativa da quantidade de terminais móveis.....	45
Tabela 4.2: Estimativa da taxa de dados requerida no horário de pico.....	46
Tabela 4.3: Demanda de tráfego do Centro Histórico.....	47
Tabela 4.4: Máxima taxa de pico realizável no downlink (Mbps) considerando o tamanho do bloco de transporte.....	48
Tabela 4.5: Quantidade mínima de células em função do tráfego de rede.....	49
Tabela 4.6: Quantidade mínima de células em função do raio de cobertura.....	50
Tabela 4.7: Capacidade da rede para 12 células com modulação 64QAM.....	51

## RESUMO

O aumento da demanda de tráfego de voz e dados tem motivado a aceleração do processo evolutivo das redes de telefonia móvel celular. O escasso espectro de frequências desperta estudos direcionados na busca de sistemas que apresentem técnicas de melhor eficiência espectral.

O sistema LTE se apresenta como o sucessor tecnológico das redes 3G existentes. Concebido para fornecer elevadas taxas de transmissão com baixa latência ao usuário, esta tecnologia possui a capacidade de oferecer largura de banda adequada para atender a crescente demanda dos usuários.

Este trabalho propõe uma metodologia para estimar a quantidade mínima de sites necessários para implantar uma rede LTE no Centro Histórico de Porto Alegre, considerando critérios de demanda de tráfego e de cobertura celular.

O cálculo da demanda de tráfego é realizado a partir da estimativa da quantidade de dispositivos móveis e da definição do perfil médio do usuário. O raio máximo de cobertura celular, por sua vez, assegura uma taxa de transmissão mínima para o assinante de borda de célula.

# **Quantitative Evaluation of Sites for the Deployment of an LTE Network in the Historic Center of Porto Alegre**

## **ABSTRACT**

The increased demand for voice and data traffic has driven the acceleration in the evolutionary process of cellular mobile telephony networks. The scarce frequency spectrum awakens studies addressed in the search for systems that present techniques for better spectral efficiency.

The LTE system presents itself as the technological successor to the existing 3G networks. Designed to provide high bit rates with low latency to the user, this technology has the ability to provide adequate bandwidth to meet the growing demand of users.

This paper proposes a methodology for estimating the minimum number of sites needed to deploy an LTE network in the Historic Center of Porto Alegre, considering criteria of traffic demand and cellular coverage.

The calculation of the traffic demand is carried out from the estimate of the number of mobile devices and definition of the average profile of the user. The maximum range of cellular coverage, in turn, ensures a minimum rate of transmission to the subscriber edge of the cell.

**Keywords:** LTE, Mobile Telephony, Traffic, Cellular Coverage.

## 1 INTRODUÇÃO

A telefonia móvel celular tem experimentado nos últimos anos uma elevada taxa de crescimento na demanda de tráfego em suas redes. Isto tem ocorrido pelo aumento na quantidade de usuários que estão aderindo ao uso da comunicação móvel, bem como pelo aumento na utilização dos serviços de voz, vídeos, dados, internet e aplicações multimídia oferecidos pelas operadoras aos usuários.

A acelerada ampliação da área de cobertura das redes celulares popularizou a oferta dos serviços de telefonia móvel. O recente acesso às redes sem fio em localidades com limitadas ofertas de serviços de comunicação e de banda larga contribuiu para este crescimento. A mobilidade estendeu a disponibilidade dos serviços oferecidos pela rede fixa a um maior número de assinantes. Os acessos móveis ultrapassaram a marca de 191 milhões de assinantes no Brasil em setembro de 2010, o que nos aproxima da densidade média de 1 linha telefônica móvel por habitante (ANATEL, 2010). No mundo totalizamos mais de 5 bilhões de linhas celulares habilitadas (GSA, 2010).

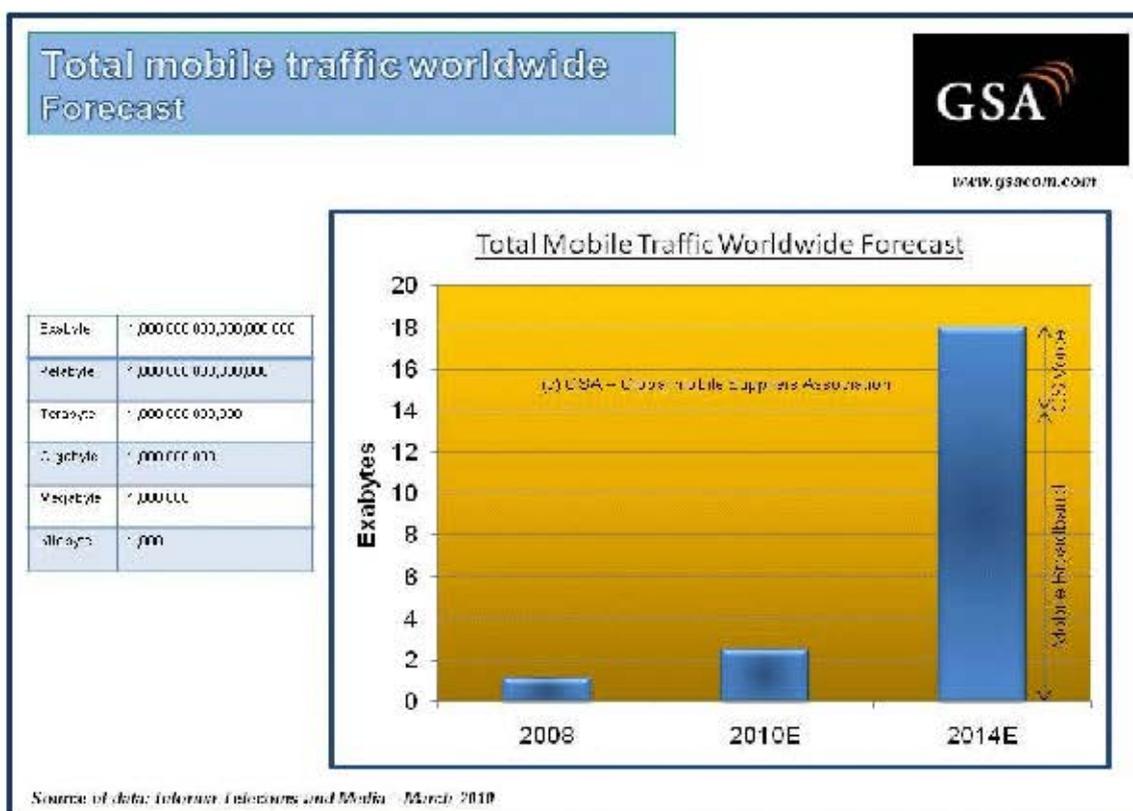


Figura 1.1: Previsão do tráfego móvel total em todo o Mundo

Atualmente a prestação dos serviços de voz ainda é a responsável pela maior parte das receitas geradas pelas redes telefônicas. No entanto, a maior taxa de crescimento de tráfego está relacionada à prestação de serviços de dados associados à rede de banda larga, tais como o acesso a internet, a transferência de arquivos e a transmissão de vídeo e áudio, entre outros. Na Figura 1.1 fica evidente a perspectiva da multiplicação do tráfego móvel para os próximos anos, com o crescimento exponencial da banda larga móvel dominando as projeções de tráfego em 2014.

A expansão das redes de comunicação sem fio e a crescente demanda pelos serviços de banda larga são tendências de mercado que motivam a indústria de telecomunicações na busca de tecnologias padronizadas que possam integrá-las em um único produto capaz de oferecer mobilidade com eficiência espectral e acesso a informação com taxas de banda larga aos usuários finais.

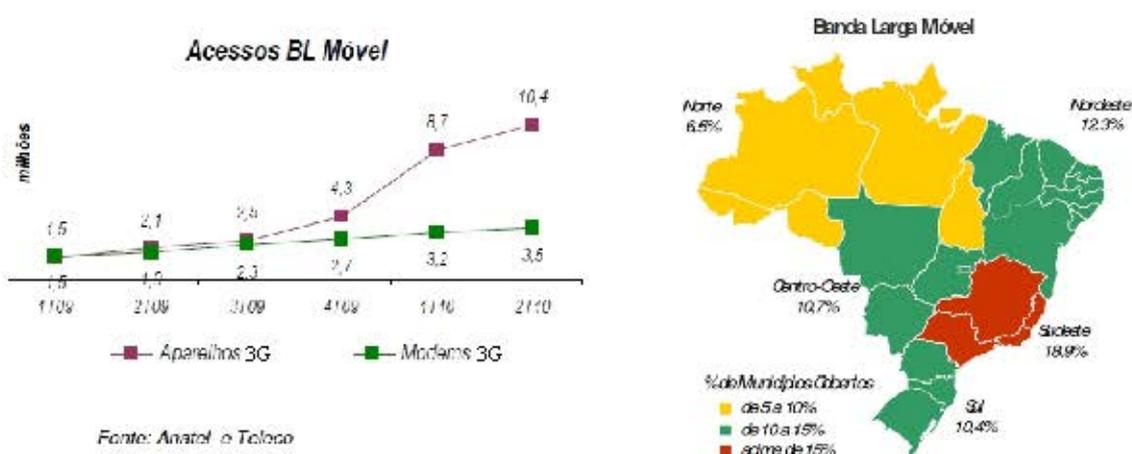


Figura 1.2: Acessos e municípios cobertos por banda larga móvel

## 1.1 Histórico da Telefonia Móvel Celular

Na primeira metade da década de 1990 predominava o tráfego móvel de voz na tecnologia analógica AMPS de primeira geração, caracterizada pelo baixo acesso dos usuários à internet por linha discada a taxas de 9,6 kbps e o alto custo das tarifas por conta do monopólio estatal das comunicações.

Na segunda metade da década de 1990 ocorreram privatizações nos serviços de telecomunicações no Brasil, e a livre concorrência estabelecida no setor contribuiu para a redução das tarifas e a ampliação no número de usuários da telefonia móvel. A Internet evoluiu bastante com o aumento de conteúdos de informação, serviço de emails, visualização em telas em modo gráfico e taxas de transferências de 56 kbps. O rápido crescimento do tráfego de rede trouxe a implantação de sistemas digitais móveis de maior capacidade, através das tecnologias GSM e CDMA de segunda geração.

A primeira metade da década de 2000 é marcada pela massificação dos serviços de telefonia móvel, que deixa de ser visto como um bem de luxo para integrar o cotidiano social e profissional das pessoas. A banda larga chega à telefonia fixa através do ADSL e pela TV através do Cable Modem, criando uma nova revolução no uso da Internet e acesso de dados. Inicia-se a tentativa de trafegar voz pela Internet (VoIP), estimulada pela substancial possibilidade de redução nas tarifas telefônicas. O crescimento do

tráfego móvel de dados impulsionou a implantação das redes overlay GPRS e EDGE (GSM) e 1XRTT (CDMA), com desempenho de transmissão de dados a uma velocidade semelhante ao modem analógico.

Nesta segunda metade da década de 2000 vemos a cobertura móvel celular se expandindo a todas as sedes municipais do Brasil, na tecnologia GSM/EDGE. Há no mercado uma grande variedade de aparelhos celulares e planos de serviços oferecidos pelas operadoras que contemplam as diversas camadas econômicas da sociedade. A popularização do acesso à banda larga determinou a implantação das tecnologias móveis de terceira geração 1XEV-DO e WCDMA.

## 1.2 Evolução das Redes 3G

As redes celulares existentes foram criadas primariamente para atender ao serviço de voz, e posteriormente adaptadas para a disponibilização do serviço de dados na medida do aumento de sua demanda. As futuras redes celulares serão desenvolvidas para o serviço de dados, sendo a transmissão de voz apenas um dos vários serviços a serem disponibilizados pelo novo ambiente de rede IP.

A tendência do setor de telecomunicações é tornar comum a utilização do Protocolo IP a todos os tipos de aplicações em qualquer tipo de rede, independente da tecnologia específica empregada pela mesma. As novas tecnologias de rede continuarão a evoluir visando oferecer melhor desempenho, tais como a velocidade cada vez mais elevada na transferência de dados.

Os documentos iniciais do padrão UMTS foram elaborados pelos grupos de trabalho do 3GPP a partir de 1999. No entanto, as primeiras redes comerciais de terceira geração surgiram apenas em 2004. No Brasil, as primeiras redes WCDMA foram implantadas em 2008 pelas operadoras de telefonia móvel celular.

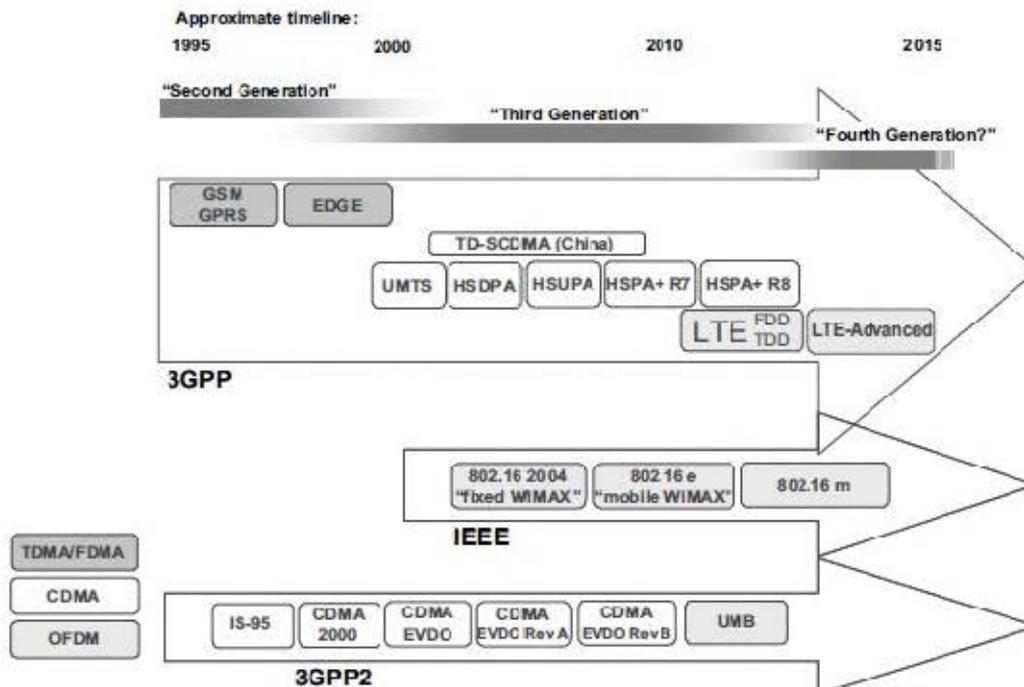


Figura 1.3: Evolução tecnológica dos sistemas celulares (SESIA, 2009)

Na prática a transmissão da taxa de dados da rede WCDMA ficou bem abaixo da promessa de desempenho descrita na primeira versão do padrão 3G. Houve um esforço dos grupos de trabalho do 3GPP para buscar uma melhor otimização na taxa de dados, que culminou com o desenvolvimento do sistema HSPA.

Enquanto o sistema HSPA estava sendo desenvolvido pelo 3GPP e implantado por alguns países, surgiu uma nova norma denominada IEEE 802.16e para acesso a banda larga móvel sem fio. Esta norma é conhecida como WiMAX e emprega a tecnologia de acesso OFDMA, que apresenta maiores taxas de dados, baixa latência e melhor eficiência espectral, em comparação à norma HSPA. Além das vantagens da tecnologia de rádio, o WiMAX empregou uma arquitetura de rede mais simples baseada em protocolos IP. Isto motivou o 3GPP a desenvolver seu próprio padrão de nova rede pós-3G baseado na tecnologia OFDMA e arquitetura de rede IP, denominado LTE (*Long Term Evolution*).

O grupo de trabalho 3GPP2, que trata da evolução das redes legadas baseadas no CDMA (2G), elaborou a norma CDMA2000 (3G), HRDP (3G+) e UMB (pós-3G).

O objetivo do LTE é fornecer uma alta taxa de dados, baixa latência e eficiência espectral com largura de banda flexível. A arquitetura de rede é projetada com o objetivo de apoiar a comutação de pacotes com total mobilidade, qualidade de serviço e latência mínima. A largura de banda flexível é suportada pelos esquemas de acessos OFDMA e SC-FDMA. FDD, TDD e *half-duplex* FDD permitem terminais móveis de baixo custo, com a não obrigatoriedade da transmissão e da recepção ao mesmo tempo. O sistema LTE oferece de duas a quatro vezes mais eficiência espectral que o HSPA, bem como fornece recursos para menos de 10 ms de latência na transmissão de um pacote da rede para um terminal móvel.

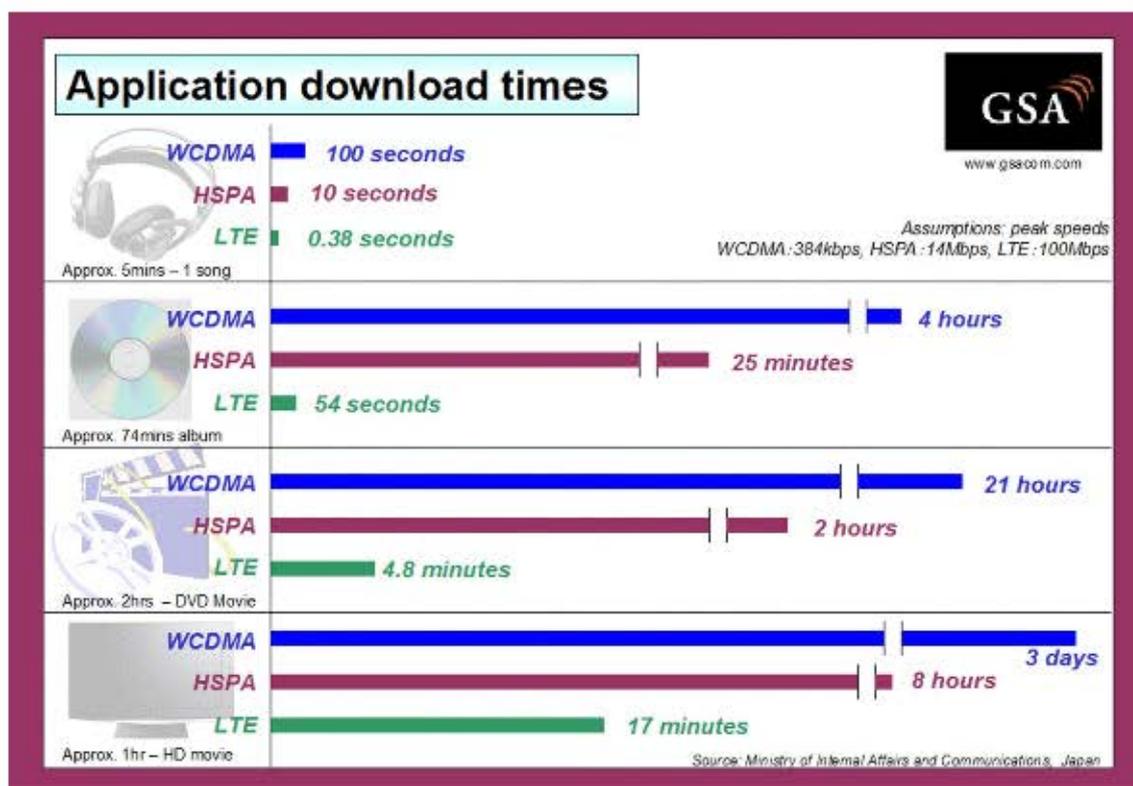


Figura 1.4: Tempo requerido pelas redes 3G para o download de arquivos

A figura 1.4 compara o desempenho entre as tecnologias 3G quanto à velocidade de transferência de dados em redes móveis. Percebe-se que o tempo requerido pelo sistema LTE para a transmissão de arquivos viabiliza a prestação de serviços *on demand* através das redes sem fio. Por exemplo, para assistir a um filme seria mais prático e rápido adquirir o conteúdo de vídeo pela rede móvel LTE do que utilizar os serviços tradicionais de uma videolocadora.

### 1.3 Expansão das Redes LTE

O LTE é uma das tecnologias disponíveis para suceder as redes WCDMA/HSPA das operadoras de telefonia móvel celular, e sua implantação vem sendo estimulada a partir dos resultados de crescimento das receitas oriundas dos serviços de dados.

O primeiro serviço comercial LTE do mundo foi lançado pela operadora TeliaSonera em 25 de agosto de 2010 na cidade de Goteborg (Suécia), utilizando equipamentos Nokia Siemens na banda de 2,6 GHz e com disponibilidade de 20 MHz por canal. A velocidade máxima teórica é de 100 Mbps.

O comprometimento de implantações, projetos e testes em redes LTE por parte de 80 operadoras em 33 países aponta uma forte tendência de expansão da banda larga móvel para os próximos anos. Até o final de 2010 a previsão é de que estarão em serviço 17 redes LTE em países como Suécia, Noruega, Finlândia, Estados Unidos, Canadá, Japão, Coreia o Sul, África do Sul e Armênia. No Brasil, a operadora Vivo prevê a realização de testes em redes LTE a partir de 2011 no Rio de Janeiro.

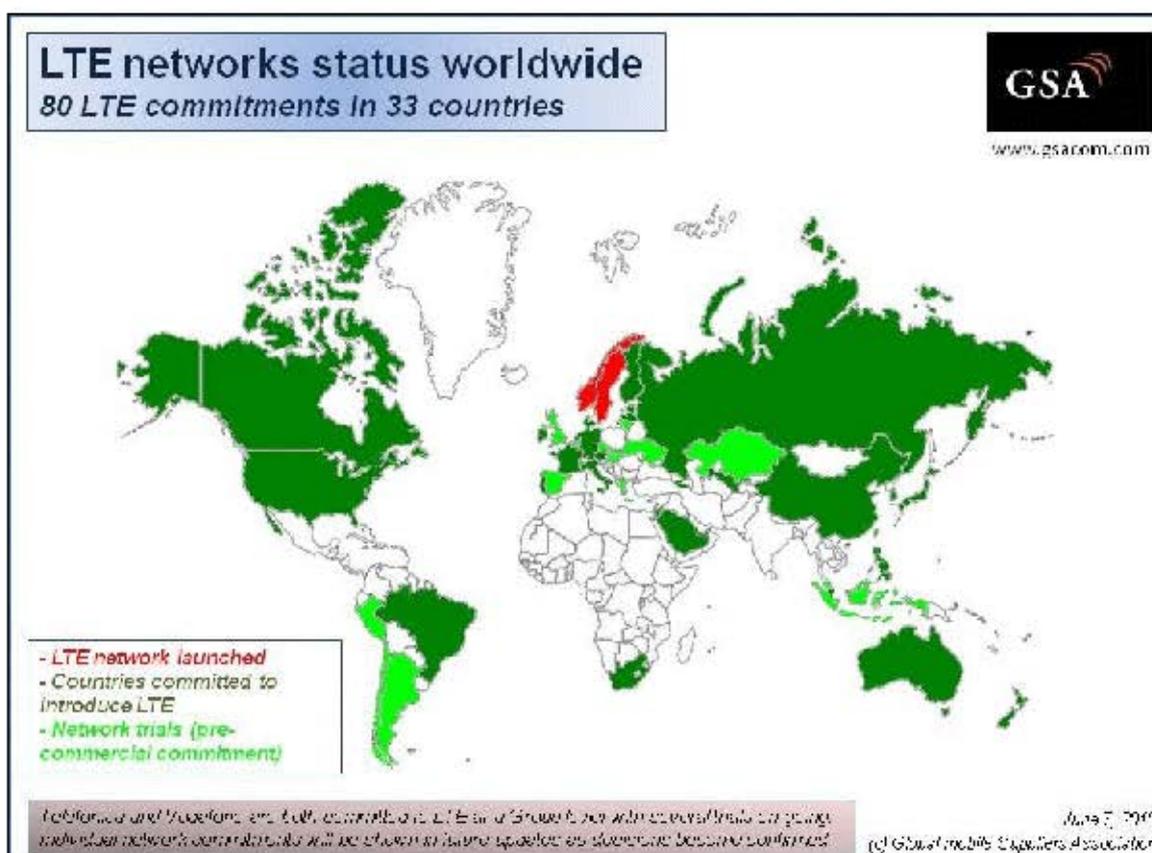


Figura 1.5: Expansão das redes LTE pelo Mundo

## 1.4 Objetivos do Trabalho

O presente trabalho tem por objetivo principal estimar a demanda de acessos à rede LTE no Centro Histórico do município de Porto Alegre (RS) e dimensionar a quantidade mínima de sites necessários para atender os requisitos de cobertura e capacidade.

Entre os objetivos gerais deste trabalho, destacam-se:

- O conhecimento das características da tecnologia LTE normatizada pelo 3GPP;
- O estudo do padrão e das vantagens de utilização do sistema OFDMA;
- O conhecimento das técnicas de múltiplas antenas e suas aplicações;
- Aprender a elaborar o *link budget* e a estimar a propagação do sinal para a determinação do raio de cobertura da célula;
- Calcular a demanda de tráfego a partir da estimativa da quantidade de terminais e do perfil médio de consumo de tráfego do usuário;
- Calcular a capacidade de tráfego de uma célula LTE;
- O conhecimento da legislação municipal sobre instalação de ERBs.

## 1.5 Estrutura do Trabalho

No capítulo dois são descritos as características que especificam o sistema LTE e suas vantagens tecnológicas. E mostrado como o sistema OFDMA, o sistema MIMO, a largura de banda e a modulação adaptativa auxiliam na otimização da taxa de transmissão de pico. São apresentados os elementos componentes da arquitetura de rede, da estação rádio base e os dispositivos móveis.

No capítulo três são apresentados os modelos de propagação e o *link budget* como ferramentas para a determinação do raio de cobertura da célula, bem como a frequência de operação do sistema e o plano de reuso de frequências.

No capítulo quatro é desenvolvido o estudo de caso visando à quantificação mínima de sites no Centro Histórico de Porto Alegre. Inicialmente é estimada a quantidade de terminais móveis e o perfil médio do usuário para a definição da demanda de tráfego. Em seguida é calculada a capacidade de tráfego do site e definido o número de sites pelo critério de tráfego. O número de sites também é definido a partir do critério de cobertura mínima de sinal. A quantidade mínima de sites é definida a partir da comparação de resultados dos critérios de tráfego e de cobertura celular.

Finalmente, no capítulo cinco, apresentam-se algumas conclusões sobre o trabalho desenvolvido, bem como sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros relacionados à implantação LTE.

## 2 SISTEMA LTE

O LTE (*Long Term Evolution*) é o sistema normatizado pelo 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) que representa a evolução tecnológica das redes móveis 3G, tendo sido adotado o acesso padrão OFDMA na rede de rádio e a comutação de pacotes, tanto na rede de rádio quanto na rede de núcleo. A nova tecnologia apresenta novidades, tais como a flexibilidade no espectro de frequências e a utilização de MIMO (*Multiple Input Multiple Output*).

Tabela 2.1: Resumo das principais características técnicas de desempenho oferecidas pelo LTE

		Absolute requirement	Comparison to Release 6	Comment
Downlink	Peak transmission rate	> 100 Mbps	$7 \times 14.4$ Mbps	LTE in 20 MHz FDD, $2 \times 2$ spatial multiplexing. Reference: HSDPA in 5 MHz FDD, single antenna transmission
	Peak spectral efficiency	> 5 bps/Hz	3 bps/Hz	LTE: $2 \times 2$ spatial multiplexing, Interference Rejection Combining (IRC) receiver [3]. Reference: HSDPA, Rake receiver [4], 2 receive antennas
	Average cell spectral efficiency	> 1.6 – 2.1 bps/Hz/cell	$3 - 4 \times 0.53$ bps/Hz/cell	As above, 10 users assumed per cell
	Cell edge spectral efficiency	> 0.04 – 0.06 bps/Hz/user	$2-3 \times 0.02$ bps/Hz	Dedicated carrier for broadcast mode
	Broadcast spectral efficiency	> 1 bps/Hz	N/A	
Uplink	Peak transmission rate	> 50 Mbps	$5 \times 11$ Mbps	LTE in 20 MHz FDD, single antenna transmission. Reference: HSUPA in 5 MHz FDD, single antenna transmission
	Peak spectral efficiency	> 2.5 bps/Hz	2 bps/Hz	LTE: single antenna transmission, IRC receiver [3]. Reference: HSUPA, Rake receiver [4], 2 receive antennas
	Average cell spectral efficiency	> 0.66 – 1.0 bps/Hz/cell	$2 - 3 \times 0.33$ bps/Hz	As above, 10 users assumed per cell
	Cell edge spectral efficiency	> 0.02 – 0.03 bps/Hz/user	$2 - 3 \times 0.01$ bps/Hz	
System	User plane latency (two way radio delay)	< 10 ms	One fifth	
	Connection set-up latency	< 100 ms		Idle state → active state
	Operating bandwidth	1.4 – 20 MHz	5 MHz	(initial requirement started at 1.25 MHz)
	VoIP capacity	NGMN preferred target expressed in [2] is > 60 sessions/MHz/cell		

Fonte: SESIA, 2009. p. 8.

O projeto do sistema LTE abrange tanto a interface de rádio quanto a arquitetura de rede de núcleo, tendo como vantagens fundamentais: redução nos atrasos de estabelecimento de conexão e latência de transmissão, aumento na taxa de dados do usuário, aumento da taxa de bit na borda da célula, redução do custo de bit pela eficiência espectral, maior flexibilidade de uso do espectro, arquitetura de rede simples e consumo moderado de energia do terminal móvel. A tabela 2.1 resume as principais características técnicas de desempenho oferecidas pela primeira versão do LTE.

O pico da taxa de dados que pode ser alcançado pelo usuário depende da quantidade de espectro utilizado pela portadora e, para sistemas MIMO, do número de antenas de transmissão e recepção. Para o sistema LTE, foram definidos 100 Mbps para taxa de pico de *downlink* e 50 Mbps para taxa de pico de *uplink*, para um sistema FDD com largura de banda de 20 MHz, com a utilização de uma antena de transmissão e duas antenas de recepção no terminal móvel e na estação rádio base. Na prática, estas taxas não são obtidas devido a diversos fatores, tais como a relação sinal/ruído percebida pelos terminais móveis, o compartilhamento de recursos entre os usuários de uma mesma célula e a distância entre usuários e a estação rádio base. Embora seja raro um usuário experimentar estas taxas de pico por um longo período, as aplicações móveis existentes não costumam exigir este tipo de desempenho.

O desempenho de uma célula está relacionado com a quantidade de sites necessários para operar uma rede e, em consequência, com o custo de implantação do sistema celular. As exigências ao nível de célula foram definidas pelas seguintes métricas (SESIA, 2009):

- Taxa média de transferência por célula (bps/célula) e eficiência espectral (bps/Hz/Célula);
- Taxa média de transferência por usuário (bps/usuário) e eficiência espectral (bps/Hz/usuário);
- Taxa de transferência para o usuário de borda de célula (bps/usuário) e taxa de transferência (bps/Hz/usuário).

As aplicações que envolvem tráfego em tempo real, como voz sobre IP (VoIP), exigem garantia de taxa de bits da rede de pacotes para a manutenção da percepção de satisfação do usuário, de forma que 98% dos pacotes que saem de um terminal móvel cheguem a outro terminal móvel em menos de 200 ms.

Em termos de mobilidade, o sistema LTE deve suportar a comunicação em movimento com velocidades de até 500 km/h, incluindo o *handover* entre células de raio de cobertura de até 5 km. As operações celulares devem ser possíveis em distâncias de até 100 km da ERB, para permitir implementações em áreas de ampla cobertura.

As tecnologias fundamentais que deram formato ao projeto de interface de rádio LTE foram: tecnologia multiportadora, tecnologia de antenas múltiplas e a aplicação de comutação de pacotes para a interface rádio.

## 2.1 Acesso Múltiplo por Múltiplas Portadoras OFDMA e SC-FDMA

Uma das primeiras escolhas para a normatização do LTE foi baseada na abordagem de portadora de múltiplo acesso. Foram escolhidas as tecnologias OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) para o regime de acesso *downlink* e a tecnologia SC-FDMA (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) para o acesso *uplink*.

O OFDMA é uma extensão da tecnologia de multiportadora OFDM e constitui um sistema de múltiplo acesso muito flexível. O OFDM divide a banda de frequências disponível para a transmissão do sinal em diversas subportadoras de banda estreita, ortogonais entre si, que individualmente ou em grupos de subportadoras podem conter informações independentes; em OFDMA, esta subdivisão de banda larga disponível é explorada na partilha das subportadoras entre os usuários. Esta flexibilidade pode ser usada de diversas maneiras (SESIA, 2009):

- Diferentes larguras de banda do espectro podem ser usadas sem alterar os parâmetros fundamentais do sistema ou a configuração dos equipamentos;
- Os recursos de largura da banda de transmissão variável podem ser atribuídos a diferentes usuários e programados livremente no domínio frequência;
- Facilidade no reuso de frequências e coordenação das interferências entre células.

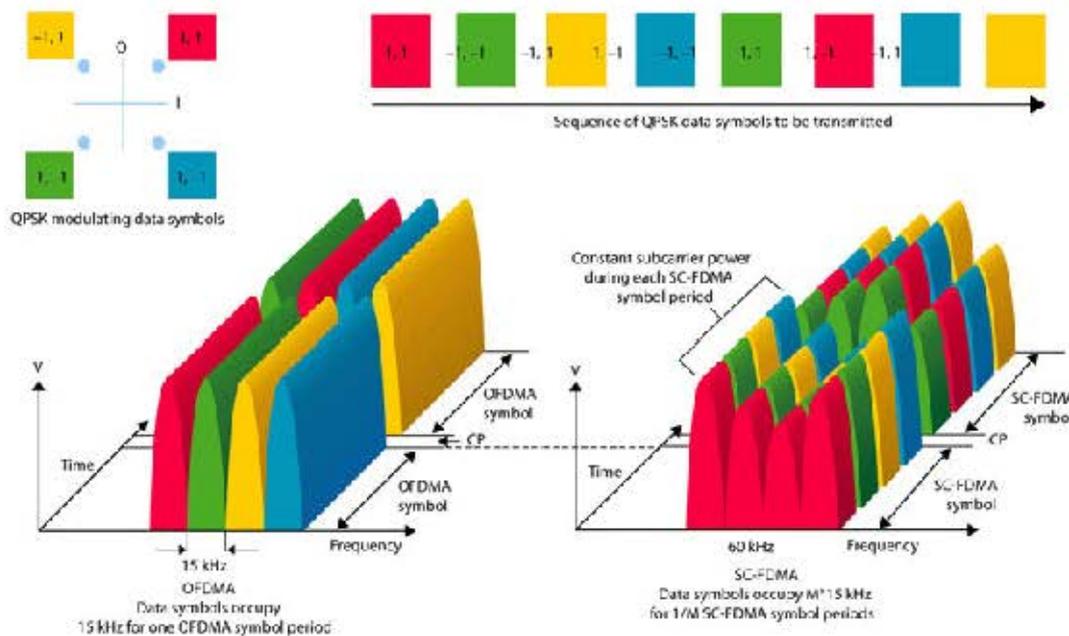


Figura 2.1: Tecnologias de múltiplo acesso OFDMA e SC-FDMA (AGILENT, 2008)

A ampla experiência adquirida com a tecnologia OFDM nos últimos anos, a partir da implantação da radiodifusão digital de áudio e vídeo, apresentou como destaque as seguintes vantagens (SESIA, 2009):

- Robustez contra a dispersão temporal dos canais de rádio, graças à subdivisão da banda larga do canal transmitido em várias subportadoras de banda estreita, permitindo a interferência intersimbólica em grande parte ficar restrita dentro do intervalo de guarda inicial de cada símbolo;
- Receptores de baixa complexidade, através da exploração de equalização no domínio da frequência;
- Simples combinação de sinais provenientes de múltiplos transmissores em redes de transmissão;

O projeto do transmissor OFDM é mais caro pela necessidade de um amplificador linear RF de alta potência, devido ao elevado PAPR (*Peak to Average Power Ratio*) do sinal.

No regime *downlink* o uso da tecnologia OFDM na estação rádio base é perfeitamente aceitável, apesar da complexidade do transmissor, uma vez que a implementação de baixo custo deve ser priorizada ao terminal móvel.

No regime *uplink*, entretanto, o PAPR elevado do OFDM é inadequado ao transmissor da estação móvel, haja vista a dificuldade em manter o compromisso entre a potência necessária para uma boa cobertura outdoor, o consumo de energia e o custo do amplificador de potência.

O SC-FDMA é uma tecnologia de múltiplo acesso que tem muitas características em comum com o OFDMA, tais como a flexibilidade no domínio frequência e a incorporação do intervalo de guarda no início de cada símbolo transmitido, reduzindo a complexidade na equalização do domínio da frequência para o receptor. Ao mesmo tempo, o SC-FDMA tem um PAPR significativamente menor que o OFDM. Assim, o regime de *uplink* pode se beneficiar das vantagens da tecnologia de multiportadora evitando custos excessivos para o projeto do transmissor do terminal móvel e mantendo uma razoável comunicabilidade entre as tecnologias de *downlink* e *uplink*.

A adoção das tecnologias multiportadoras OFDMA e SC-FDMA pelo LTE ampliará a competitividade deste sistema por vários anos, beneficiando-se da flexibilidade da portadora, da baixa complexidade do receptor e do alto desempenho do tempo de dispersão nos canais.

## 2.2 Técnicas de Múltiplas Antenas

A utilização da tecnologia de múltiplas antenas permite a exploração do domínio espacial, o que é fundamental para a obtenção de uma melhor eficiência espectral.

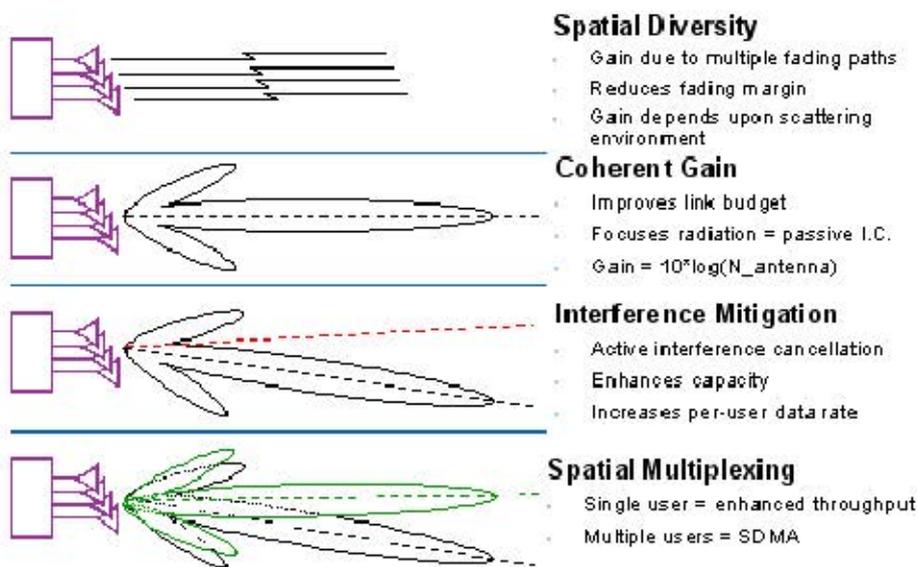


Figura 2.2: Princípios fundamentais das técnicas de múltiplas antenas

(ARRAYCOMM, 2010)

A eficiência espectral pelo uso de múltiplas antenas é baseada em três princípios fundamentais:

- Ganho de Diversidade. Utilização da diversidade espacial proporcionado pelas múltiplas antenas para melhorar a robustez da transmissão contra o desvanecimento (fading) multipercurso do sinal.

- Ganho de Ordem. Concentração de energia em uma ou mais direções, permitindo o serviço a vários usuários localizados em diferentes localidades ao mesmo tempo.

- Ganho de Multiplexação Espacial. Transmissão de múltiplos sinais de um único usuário em múltiplas camadas espaciais, criados a partir da combinação de múltiplas antenas disponíveis.

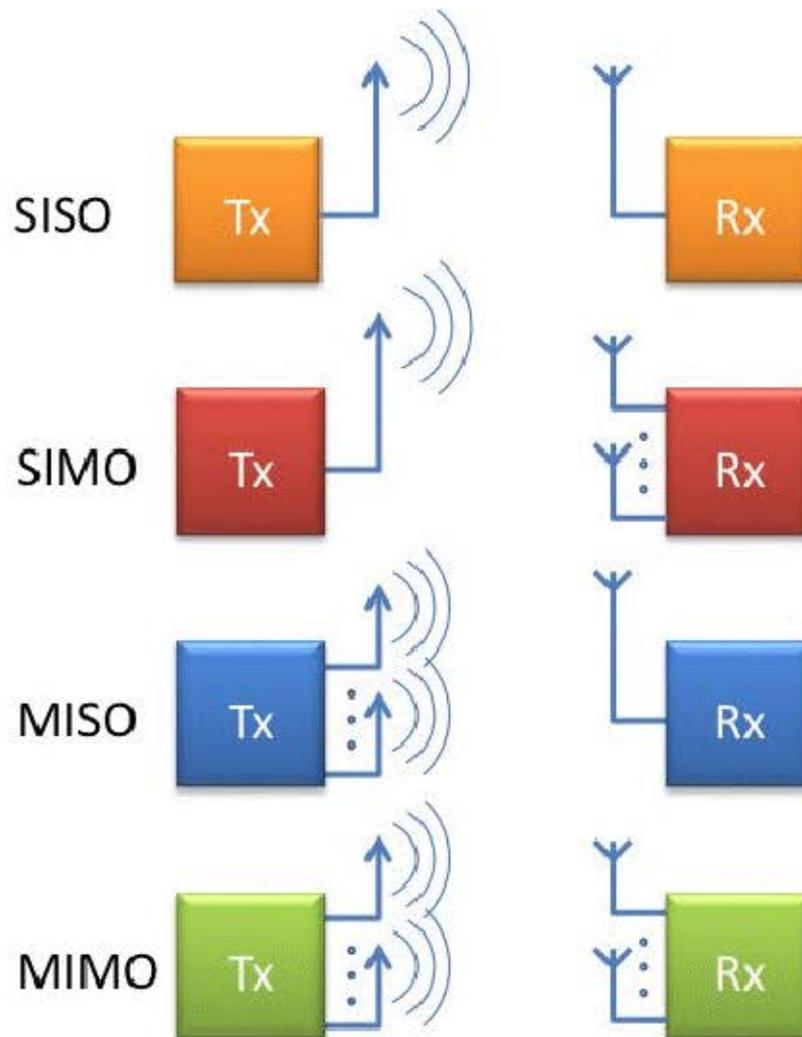


Figura 2.3: Evolução da tecnologia MIMO (LIN, 2009)

Enquanto a comunicação sem fio tradicional explora o pré-processamento e codificação dos dados transmitidos e recebidos a partir de sistemas de antenas SISO (*Single Input Single Output*), a utilização de elementos de antena adicional em cada eNodeB ou UE abre uma nova dimensão espacial para novos métodos de processamento de sinal, com o objetivo de melhorar o desempenho da interface ar, em

termos de uma ou mais métricas possíveis, tais como a taxa de erro, a taxa de comunicação de dados, área de cobertura e eficiência espectral (bps/Hz/célula).

Dependendo da disponibilidade de antenas no transmissor e/ou receptor, essas técnicas são classificadas como SIMO (*Single Input Multiple Output*), MISO (*Multiple Input Single Output*) e MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), conforme ilustra a figura 2.3.

O enlace ponto-a-ponto de múltipla antena entre uma estação rádio base e uma UE é conhecido como SU-MIMO (*Single User MIMO*). A comunicação simultânea de diversas UE com uma estação rádio base usando múltiplas antenas e mesma frequência é denominada MU-MIMO (*Multi User MIMO*).

### 2.3 Estrutura de Canal e Largura de Banda

Uma das metas importantes do sistema LTE é o suporte de banda flexível para implementações em regime de amplo espectro. A camada física do LTE foi projetada para suportar larguras de banda com incrementos de 180 kHz a partir de uma largura mínima de banda de transmissão de 1,08 MHz, oferecendo suporte a um conjunto de seis larguras de canal, conforme ilustra a figura 2.5 e a tabela 2.2.

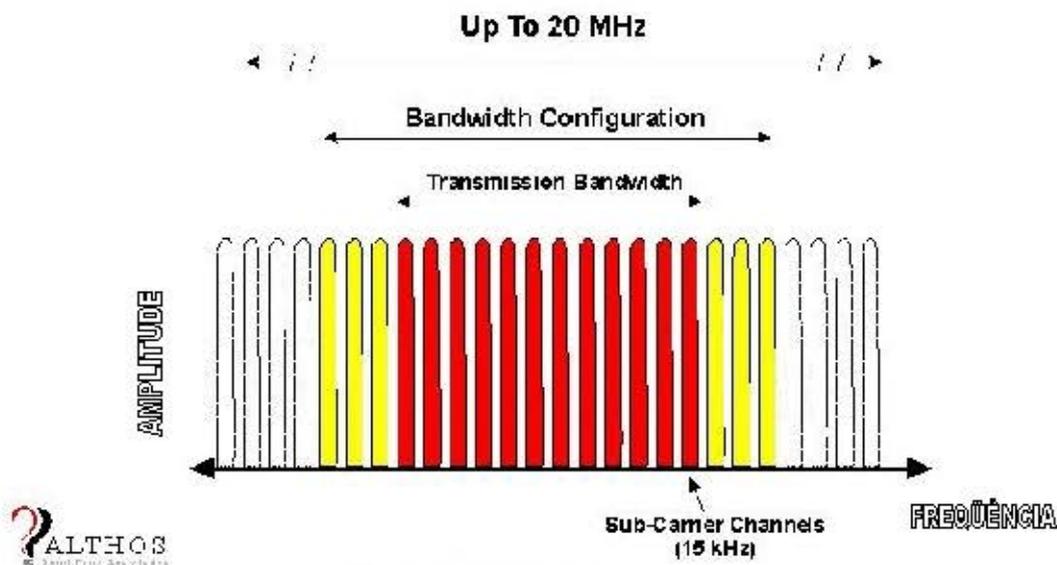


Figura 2.4: Largura de banda de canal *versus* largura de banda de transmissão

A implementação do LTE no pequeno canal de 1,4 MHz é menos eficiente que em maiores larguras de banda de canal. Para o canal de 1,4 MHz, a largura de banda de transmissão corresponde a 77% da largura de banda do canal. Para o canal de 20 MHz, a largura de banda de transmissão aumenta a eficiência para 90% da largura de banda do canal.

Tabela 2.2: Largura de banda de transmissão *versus* largura de banda de canal LTE

Channel Bandwidth Configuration [MHz]	Transmission Bandwidth [MHz]
1,4	1,08
3	2,7
5	4,5
10	9
15	13,5
20	18

Fonte: KHAN, 2009, p. 173.

As transmissões em *downlink* e *uplink* são organizadas em estruturas de quadro que suportam FDD (tipo 1) e TDD (tipo 2), com tempo de duração fixado em 10 milissegundos.

A estrutura de quadro tipo 1 é aplicada tanto em FDD *full-duplex* quanto em FDD *half-duplex*. Consiste de 20 *slots* de 0,5 milissegundos, numerados de 0 a 19. Um subquadro (*subframe*) é definido como 2 *slots* consecutivos.

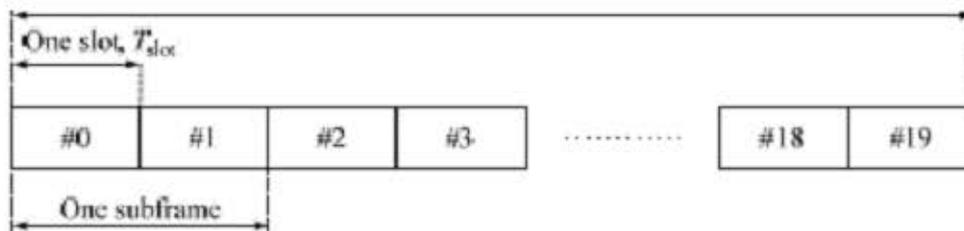


Figura 2.5: Estrutura de quadro FDD tipo 1 (3GPP, 2010)

Para FDD, a cada intervalo de 10 milissegundos estão disponíveis para transmissão 10 subquadros para o *downlink* e 10 subquadros para o *uplink*, separados no domínio frequência. No FDD *half-duplex* a estação móvel não pode transmitir e receber ao mesmo tempo, não existindo tais restrições no FDD *full-duplex*.

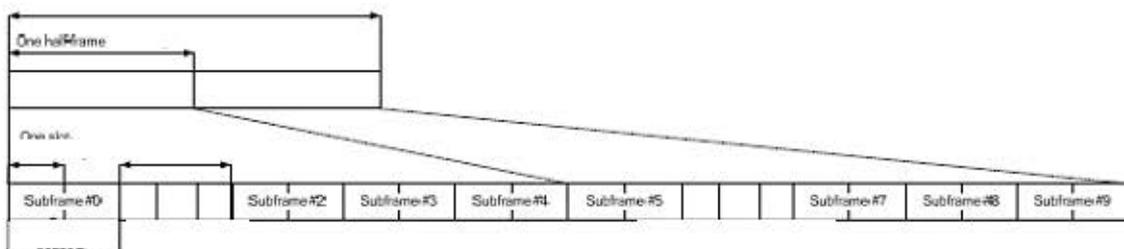


Figura 2.6: Estrutura de quadro TDD tipo 2 (3GPP, 2010)

A estrutura de quadro tipo 2 é aplicada ao TDD. Consiste de 2 semiquadros de 5 milissegundos cada. Cada semiquadro é composto por 5 subquadros de 1 milissegundo para a transmissão *downlink* ou *uplink*.

## 2.4 Modulação

Os sistemas LTE utilizam as modulações QPSK, 16QAM e 64QAM para a transmissão *downlink* e *uplink*, de acordo com o raio de alcance da célula, taxa de transmissão e robustez do sinal.

O QPSK é uma técnica de modulação na qual a informação é inserida nos parâmetros de fase e quadratura da onda portadora, fazendo com que a mesma sofra uma alteração de fase. A utilização de dois parâmetros (bits) possibilita a transmissão de 4 símbolos distintos, podendo a portadora assumir 4 valores de fases diferentes como, por exemplo,  $45^{\circ}$ ,  $135^{\circ}$ ,  $225^{\circ}$  e  $315^{\circ}$ .

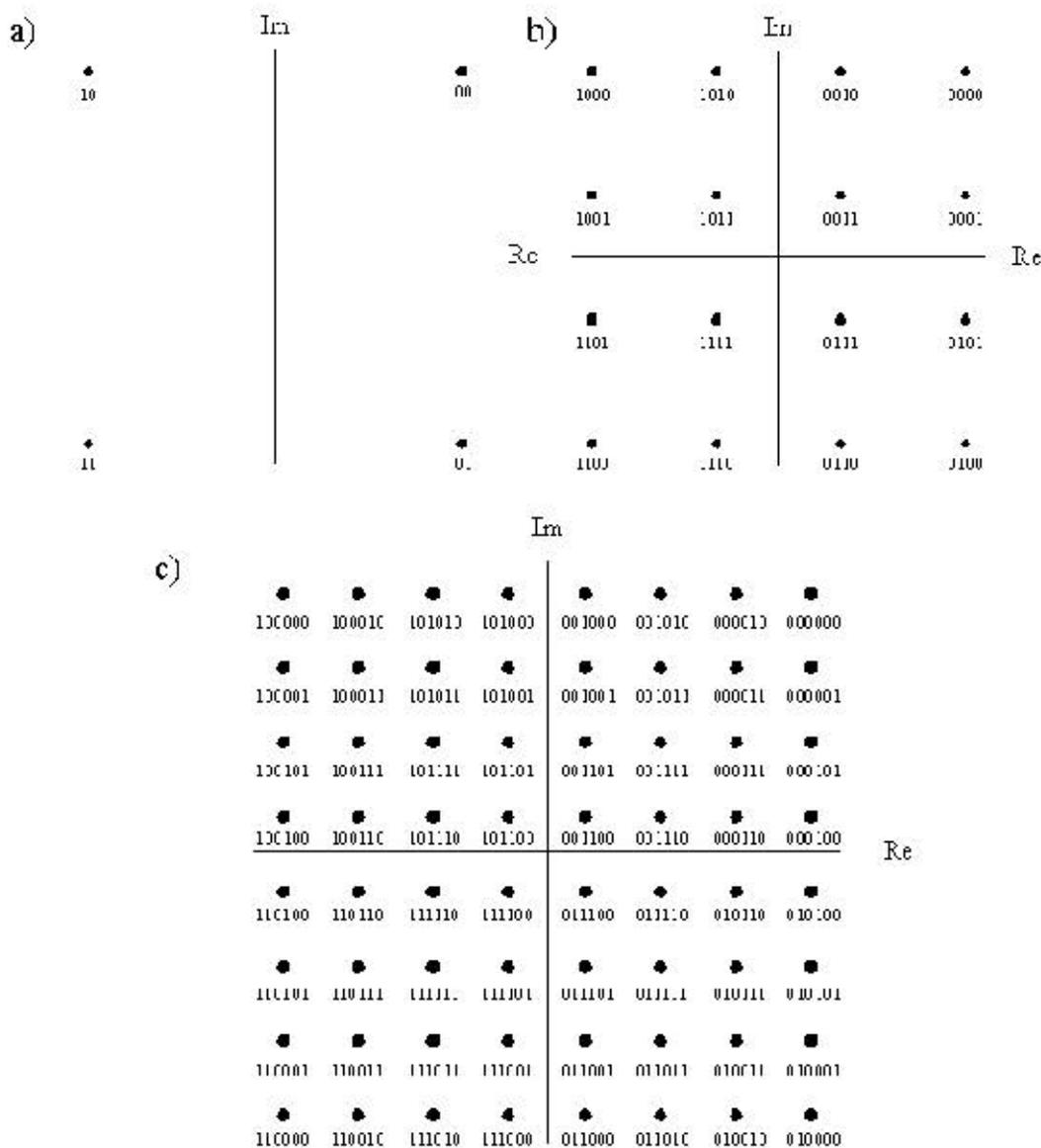


Figura 2.7: Constelação a) QPSK b) 16QAM c) 64QAM

O QAM é uma técnica de modulação na qual a informação é inserida nos parâmetros de amplitude e quadratura da onda portadora. Difere do QPSK que possui a mesma amplitude para todos os seus símbolos da constelação, ou seja, a mesma distância de cada símbolo até a origem, conforme representado na figura 2.7.

Na modulação 16QAM a constelação apresenta 16 símbolos, e cada símbolo representa 4 bits, que guardam as informações de fase e amplitude simultaneamente. No mapa de constelações é percebido que existem símbolos com amplitudes distintas e fases iguais, bem como símbolos com fases distintas e amplitudes iguais.

A modulação 64QAM é semelhante à modulação 16QAM, diferindo na composição da constelação com 64 símbolos de 6 bits.

A taxa de transmissão em modulação 16QAM é menor do que em modulação 64QAM, mas possui um afastamento maior entre seus símbolos, o que dificulta os erros de interpretação da informação no receptor e permite uma transmissão com melhor qualidade de serviço.

O padrão LTE permite alterar dinamicamente os vários esquemas de modulação, baseando a escolha da taxa de transferência pela relação sinal / ruído (SNR) percebido pelo receptor.

Na modulação adaptativa, quando o SNR for de valor elevado é escolhido um padrão de modulação menos robusto e com maior taxa de transferência de dados. Caso haja degradação do sinal por SNR baixo, o sistema utilizará um padrão de modulação mais robusto que oferecerá uma menor taxa de transferência a este usuário.

A modulação adaptativa permite ampliar as situações onde é possível utilizar uma modulação mais eficiente, com maior taxa de transferência, uma vez que considera as condições de degradação do sinal. Diferentemente dos sistemas tradicionais que trabalham com modulação fixa, o sistema LTE faz com que o usuário mais próximo ao centro da célula de cobertura possa usufruir de uma maior taxa de transferência, ao contrário do usuário da borda de célula que perceberá uma taxa de transferência menor, porém de maior robustez para a garantia de qualidade de serviço do enlace de rádio.

## 2.5 Interface de Rádio Comutada por Pacotes

O LTE foi concebido para ser um sistema integralmente orientado a pacotes, aplicado em todas as camadas da pilha de protocolos, diferentemente dos sistemas celulares anteriores onde predominavam os protocolos de conexão orientados por circuitos.

A redução do tempo de duração do quadro *downlink/uplink* para menos de 1 ms contribuiu para a melhoria da latência do sistema. O curto intervalo de transmissão de quadro, juntamente com as novas dimensões de frequência e espaço, melhorou a interação entre as camadas físicas e MAC, incluindo as seguintes técnicas no LTE (SESIA, 2009):

- escalonamento adaptativo nas dimensões de frequência e de espaço;
- adaptação da configuração MIMO, incluindo a seleção do número de camadas espaciais transmitidas simultaneamente;
- adaptação do enlace de modulação e taxa de códigos, incluindo o número de códigos transmitidos;

- diversos modos de comunicação por canais velozes.

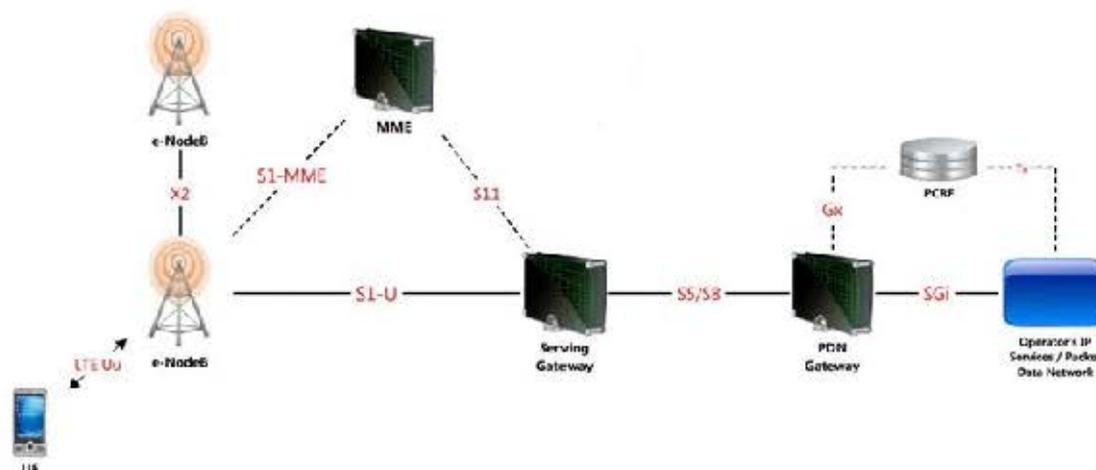
A combinação de diferentes níveis de otimização com uma sinalização de controle muito sofisticada é um dos grandes desafios para a transformação do LTE em um sistema de trabalho.

## 2.6 Arquitetura de Rede EPS (*Evolved Packet System*)

O LTE foi projetado para suportar somente serviços de comutação de pacotes, fornecendo conectividade IP com mobilidade entre terminais móveis (UE - *user equipment*) e a rede de pacote de dados (PDN - *packet data network*).

O sistema LTE abrange a evolução do acesso via rádio, por intermédio do E\_UTRAN (*Evolved UTRAN*). A evolução dos aspectos que não envolvem o acesso via rádio são tratados pelo sistema SAE (*System Architecture Evolution*), que inclui o EPC (*Evolved Packet Core*) da rede. Juntos, LTE e SAE compõem o EPS (*Evolved Packet System*), que é responsável pelo roteamento do tráfego IP de um gateway da rede de pacotes de dados até o terminal móvel do usuário.

Um portador EPS (*bearer*) é normalmente associado a um QoS (*quality of service*) que se relaciona ao serviço de dados ou voz estabelecido pela conectividade IP de um usuário a um PDN. Múltiplos portadores podem ser estabelecidos por um usuário, a fim de fornecer QoS diferentes ou estabelecer conectividade para PDNs diferentes.



Legenda:

PCRF: Policy Control and Charging Rules Function.

PDN: Packet Data Network

MME: Mobility Management Entity

eNodeB: Evolved Node B

UE: User Equipment

Figura 2.8: Arquitetura da rede EPS (3GLTEINFO, 2009)

O núcleo da rede é responsável pelo controle global dos terminais móveis e o estabelecimento dos portadores. Os principais nós lógicos do EPC são (SESIA, 2009):

- Policy Control and Charging Rules Function (PCRF): é responsável pela política de controle de tomada de decisão, bem como pelo controle das funcionalidades de fluxo de tarifação baseados no PCEF (*Policy Control Enforcement Function*), que reside na PDN Gateway. O PCRF prevê a autorização de QoS, que decide como um determinado fluxo de dados será tratado pelo PCEF, garantindo que está de acordo com o perfil de assinatura do usuário.

- Home Location Register (HLR): O HLR contém as informações de assinaturas dos usuários, tais como o perfil de assinatura QoS e quaisquer restrições de acesso a *roaming*. Nele também estão contidas as informações sobre os PDNs ao qual o usuário pode se conectar. O HLR armazena informações dinâmicas, como a identidade do MME onde o usuário está registrado. O HLR pode integrar o Centro de Autenticação (AUC) que gera os vetores de autenticação e as chaves de segurança.

- PDN Gateway (P-GW): o P-GW é responsável pela atribuição de endereços IP para a UE, bem como a aplicação de QoS e tarifação baseada em fluxo de acordo com as regras do PCRF. O P-GW é responsável pela filtragem de pacotes IP de *downlink* do usuário baseado em portadores de diferentes QoS. Também serve como âncora para a mobilidade na interoperabilidade com outras tecnologias não-3GPP, tais como CDMA2000 e WiMAX.

- Serving Gateway (S-GW): Todos os pacotes IP do usuário são transferidos através da S-GW, que serve como âncora de mobilidade local para os portadores de dados quando a UE se move entre eNodeBs. Além disso, mantém as informações sobre os portadores quando a UE está em estado inativo e, temporariamente, buffers de dados *downlink*, enquanto a MME inicia a paginação da UE para o restabelecimento dos portadores. Também desempenha algumas funções administrativas na rede visitada, tais como coleta de informações de cobrança e de interceptação legal. O S-GW serve como âncora para a mobilidade na interoperabilidade com outras tecnologias 3GPP, tais como GPRS e UMTS.

- Mobility Management Entity (MME): O MME é o nó de controle que processa a sinalização entre o terminal móvel e o núcleo da rede, através dos protocolos de execução NAS (*Non-Access Stratum*). As funções relacionadas com a gestão dos portadores incluem o estabelecimento, manutenção e liberação dos portadores, e é tratado pela camada de gerenciamento de sessão do protocolo NAS. As funções relacionadas com a gestão de conexão incluem o estabelecimento da conexão e segurança entre a rede e a UE, e é tratada pela conexão ou pela camada de gestão de mobilidade do protocolo NAS.

A rede de acesso (E-UTRAN) é composta por apenas um nó lógico, o eNodeB (*Evolved Node B*) que se conecta aos terminais móveis através dos protocolos AS (*Access Stratum*). A E-UTRAN é responsável por todas as funções relacionadas com o rádio, como as que seguem (SESIA, 2009):

- Gestão de Recursos de Rádio. Isso abrange todas as funções relacionadas aos portadores de rádio, como controle de rádio ao portador, controle de admissão de rádio, o controle da mobilidade de rádio, programação e alocação dinâmica de recursos para os terminais móveis, tanto no *uplink* como no *downlink*.

- Compressão de Cabeçalho. Isso ajuda a assegurar uma utilização eficiente na interface de rádio através da compressão dos cabeçalhos dos pacotes IP's que poderiam representar uma sobrecarga significativa, especialmente para pequenos pacotes como o VoIP.

- Segurança. Todos os dados enviados através da interface de rádio são criptografados.

- Conectividade à EPC. Consiste na sinalização para o MME e o caminho S-GW para o portador.

No LTE, ao contrário de algumas tecnologias 3G antecessoras, todas as funções relacionadas ao rádio residem no eNodeB, que pode ser responsável pela gestão de várias células. Isto permite a interação perfeita entre as diferentes camadas de protocolos da rede de acesso de rádio, reduzindo assim a latência e melhorando a eficiência.

Cada um dos elementos de redes LTE/SAE utiliza interfaces padronizadas, permitindo a interoperabilidade de vários fornecedores distintos de equipamentos.

## 2.7 Estação Rádio Base LTE

A estação rádio base LTE é denominada eNodeB, e é composta por:

- *Base Band Controller Unit* (BCU)
- *Remote Radio Unit* (RRU)
- Antenas e Cabos



Figura 2.9: Equipamentos eNodeB (a) RRU (b) BCU (MOTOROLA, 2009)

A BCU possui um subsistema de transmissão para a interligação do eNodeB com a *Gateway* (SAE GW) por fibra ótica, bem como um subsistema de banda base que é responsável pela codificação/decodificação e da modulação/demodulação do sinal de transmissão. Pode ser instalado em gabinetes próximos à base da torre ou em *rack* de 19 polegadas em ambiente fechado.

A RRU gera o sinal de radiofrequência para as antenas de transmissão e recebe o sinal captado pelas antenas de recepção. Este equipamento é interligado com a BCU por fibra ótica. Em geral fica instalado próximo às antenas para evitar perdas no comprimento dos cabos.

As antenas estão interligadas à RRU por cabos corrugados de ½ polegada de diâmetro e conectores. Podem ser instaladas em topo de torre ou poste, em topo de prédios ou em interiores de áreas cobertas.

## 2.8 Estações Móveis LTE

O LTE definiu 5 categorias diferentes de estações móveis, contemplando desde os terminais de baixo custo que não suportam a multiplexação espacial até os terminais que suportam o conjunto completo de funcionalidades especificadas para a camada física.



Figura 2.10: Dispositivos móveis LTE

As categorias das estações móveis LTE estão resumidas na tabela 2.2, onde um conjunto de capacidades da camada física está agrupado para formar uma categoria.

Tabela 2.3: Categorias das estações móveis LTE

Category	1	2	3	4	5
Downlink peak rate (Mbit/s)	10	50	100	150	300
Uplink peak rate (Mbit/s)	5	25	50	50	75
Soft buffer size (Msoft bit)	0.25	1.2	1.2	1.8	3.7
Maximum downlink modulation		64QAM			
Maximum uplink modulation		16QAM			64QAM
Max layers for spatial multiplexing	1		2		4

Fonte: DAHLMAN, 2008, p. 495.

### 3 PLANEJAMENTO DA REDE DE RÁDIO CELULAR

A decisão de implantar um sistema celular requer, antes do início do projeto, a definição de algumas premissas comerciais e regulatórias, tais como as populações e as regiões que serão atendidas pela prestação do serviço de telefonia móvel, a avaliação de mercado através da estimativa de faturamento, informações de como os serviços locais de comunicação são prestados pelos demais competidores, a disponibilidade das bandas de frequências necessárias para o funcionamento do serviço e as restrições legislativas para a implantação do projeto.

Ao projetista cabe definir um sistema celular que contenha uma quantidade mínima de estações rádio base que atendam aos requisitos de área de cobertura e demanda de tráfego com um grau de eficiência compatível com os padrões de serviços desejados.

O projeto deve priorizar a cobertura de áreas definidas pelo seu grau de importância. O dimensionamento da quantidade de canais deve considerar a demanda de tráfego nos horários de pico. Os problemas relacionados a interferências pelo reuso de canais devem ser resolvidos para não afetar a qualidade dos serviços prestados. Por fim, o projeto deve possibilitar a expansão futura dos sistemas celulares, de forma gradual e contínua.

O método mais utilizado para a realização do projeto de um sistema celular é dividido nas seguintes etapas (CELTEC, 1996):

- definição da área de serviço;
- definição da distribuição de tráfego;
- escolha do plano de reuso de canais;
- localização e definição do raio de cobertura das estações rádio base;
- predição de cobertura e de interferências;
- vistorias nos locais pré-definidos para a implantação dos sites;
- reavaliação do posicionamento e raios de cobertura das estações rádio base;
- implantação do site.

#### 3.1 Propagação do Sinal

Em situações onde existe visada direta entre a estação rádio base e a estação móvel do usuário, sem obstáculos, podemos considerar a propagação do sinal em condições bem próximas à do espaço livre, onde a potência média do sinal entre o transmissor e o receptor varia de forma inversamente proporcional ao quadrado da distância e inversamente proporcional ao quadrado da frequência.

A estação móvel recebe uma composição de sinais provenientes de múltiplos caminhos percorridos pela onda eletromagnética emitida pela estação rádio base. Além da propagação direta pelo espaço livre, a estação móvel recebe o mesmo sinal em propagações por meios não homogêneos e por obstáculos como morros, edificações e vegetação.

A propagação indireta é causada pelos fenômenos físicos da reflexão, refração, difração e espalhamento do sinal emitido. Pelo fato do sinal percorrer uma distância maior em relação à propagação direta, o sinal proveniente da propagação indireta sofre atrasos em relação ao sinal propagado diretamente ao receptor. O multipercurso e a mobilidade podem fazer com que o sinal sofra distorção e dispersão.

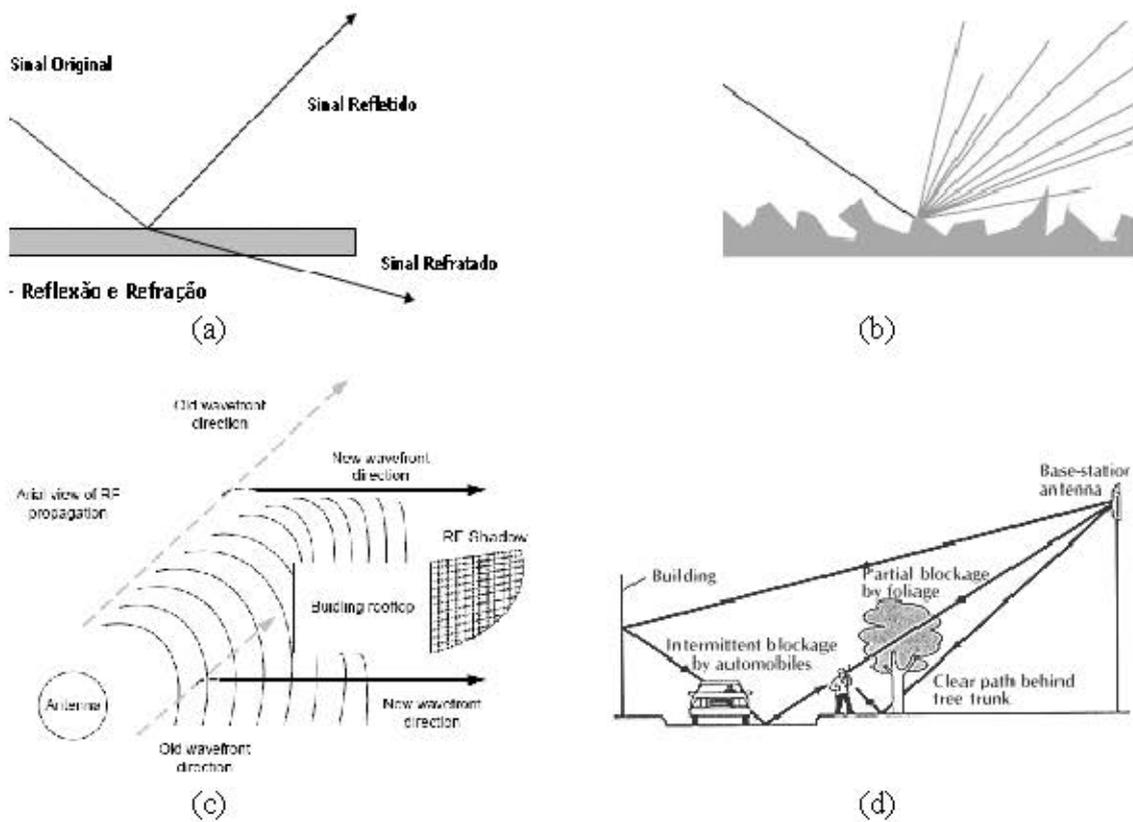


Figura 3.1: Mecanismos de propagação do sinal (a) reflexão e refração (b) espalhamento (c) difração (d) multipercurso (FARIAS, 2006)

A variabilidade no tempo das características do meio onde se propagam as ondas eletromagnéticas ocasiona o desvanecimento (fading) que gera a flutuação nos níveis de sinal recebidos, embora a intensidade da potência emitida permaneça constante, o que perturba a qualidade de serviço nas telecomunicações.

O desvanecimento lento tem origem na variação em larga escala da atmosfera e do meio de propagação, causado principalmente pelas variações climáticas. O desvanecimento é provocado pela variação dinâmica no tempo dos multipercursos, e

tem como fatores dominantes a frequência do sinal e a localização das antenas do transmissor e do receptor durante o deslocamento do terminal móvel.

A técnica da diversidade espacial constitui na utilização de redundância com duas antenas para a recepção do sinal, e é empregada essencialmente para minimizar os efeitos do desvanecimento rápido. As amostras temporais do sinal são coletadas por cada uma das antenas de recepção e é selecionada a amostra que apresenta a melhor qualidade quanto à integridade da informação original. A reconstituição das melhores amostras através da combinação resulta na melhoria da qualidade do sinal recebido.

### **3.2 Modelos de Propagação**

O planejamento celular requer a estimativa do nível de intensidade de sinal ao longo de uma determinada área de cobertura, a partir de um conjunto de estações rádio bases que operam nesta região.

Torna-se essencial prever as zonas limites do alcance de uma célula onde o nível de sinal atinge o valor mínimo suficiente para prover os serviços móveis, bem como estimar as zonas onde possa haver interferências entre canais de rádio.

Os modelos de propagação de sinal são modelos matemáticos desenvolvidos para fornecer o valor médio estimado da intensidade do sinal que melhor se aproxima da realidade de uma propagação de sinal medida em campo, podendo ser definido para qualquer ponto do interior da área de cobertura de uma célula.

Os modelos empíricos são baseados em medidas e se relacionam de forma simples a atenuação e a distância, contabilizando todos os fatores que afetam a propagação. Os modelos teóricos utilizam bases de dados topográficas, não considerando os fatores do ambiente de mobilidade.

Os modelos utilizados são híbridos, contemplando as perspectivas empíricas e teóricas. Apresentam flexibilidade ao permitir a aferição do resultado do modelo com as medidas realizadas em ambientes reais de propagação, minimizando os erros de predição de sinal.

Não existe um modelo genérico que se aplique em todos os tipos de ambientes e para todas as faixas de frequências.

A componente empírica do modelo de propagação requer a definição do ambiente, classificado em três grandes categorias: urbano, suburbano e rural.

A classificação do ambiente considera alguns parâmetros como a ondulação do terreno, a densidade da vegetação, a densidade da altura dos edifícios, a existência de áreas abertas e a existência de superfícies aquáticas.

O ambiente urbano se torna o mais complexo para aferir o modelo de propagação, geralmente apresentando grandes desvios entre os valores estimados e os valores medidos. Isto ocorre pelas características do meio de propagação, tais como a reflexão da onda nos edifícios que acarretam em atenuação e desvanecimento do sinal, a proximidade entre os edifícios e a propagação guiada pelas ruas radiais.

### 3.2.1 Modelo de Propagação no Espaço Livre

O modelo de propagação no Espaço Livre é aplicável em ambientes isotrópicos. Formulado teoricamente para propagações de rádio no vácuo, seus efeitos físicos se assemelham aos ocorridos no ar livre. A perda no espaço livre ( $L_o$ [dB]), expressa em dB, é dada pela seguinte equação:

$$L_o[\text{dB}] = 32,4 + 20 \log_{10} (d_{[\text{km}]}) + 20 \log_{10} (f_{[\text{MHz}]}) \quad (3.1)$$

Onde:

$d_{[\text{km}]}$ : Distância entre o transmissor e o receptor [km];

$f_{[\text{MHz}]}$ : Frequência de rádio [MHz].

### 3.2.2 Modelo de Egli

O modelo de Egli é baseado em medidas realizadas na banda de frequência de 50 a 910 MHz. Como resultado observou-se que o comportamento de rádio para distâncias inferiores a 60 km, o valor médio da intensidade de sinal segue aproximadamente o modelo da “terra plana”, ou seja, um modelo que desconsidera a influência do raio de curvatura do planeta para determinado limite de distância, bem como desconsidera a variação topográfica da cota de altura do terreno. Conhecido como modelo de propagação de Terra Plana, define a perda de percurso (*path loss*) pela equação:

$$L_p[\text{dB}] = 120 - 20 \log (h_b) - 20 \log (h_m) + 40 \log (d_{[\text{km}]}) + 20 \log (f_{[\text{MHz}]} / 40) \quad (3.2)$$

Onde:

$L_p$ [dB]: Perda de potência no caminho [dB];

$h_b$ : Altura das antenas da estação rádio base [m];

$h_m$ : Altura das antenas da estação móvel [m];

$d_{[\text{km}]}$ : Distância entre o transmissor e o receptor [km]  $\{d \leq 60\}$ ;

$f_{[\text{MHz}]}$ : Frequência de rádio [MHz]  $\{50 \leq f \leq 900\}$ .

Conclui-se pela equação do modelo que, se a altura da estação rádio base for dobrada em tamanho, teoricamente a perda do percurso será compensada em aproximadamente 6 dB.

A perda de percurso do modelo de Egli segue uma distribuição log-normal, com um desvio padrão dependente da frequência.

### 3.2.3 Modelo de Okumura-Hata

O modelo Okumura-Hata foi estabelecido a partir de medidas em campo por variados ambientes de propagação, com morfologias diversificadas, na busca dos fatores fundamentais que influenciam na propagação de sinal.

As curvas de sinais levantadas em campo resultaram em expressões que aproximam o comportamento do sinal em diversas situações propostas, tornando muito prático a sua

utilização para a predição da cobertura celular, onde a antena da estação rádio base é mais alta que os edifícios circunvizinhos.

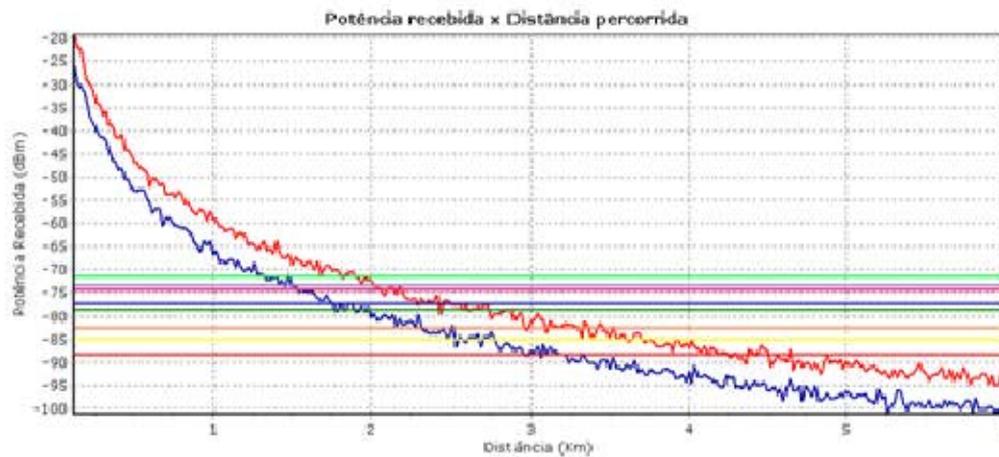


Figura 3.2: Curvas de *path loss* do modelo Okumura-Hata (GOES, 2008)  
(azul = urbano, vermelho = rural)

A expressão Okumura-Hata para ambientes urbanos é dada por:

$$L_{U[\text{dB}]} = 69,55 - 26,16 \log (f_{[\text{MHz}]}) - 13,82 \log (h_b) - a(h_m)_{[\text{dB}]} \\ + [44,90 - 6,55 \log (h_b)] \log (d_{[\text{km}]}) \quad (3.3)$$

Onde:

$L_{U[\text{dB}]}$ : Perda de potência em ambiente urbano [dB];

$h_b$ : Altura das antenas da estação rádio base [m]  $\{30 \leq h_b \leq 200\}$ ;

$h_m$ : Altura das antenas da estação móvel [m]  $\{1 \leq h_m \leq 10\}$ ;

$d_{[\text{km}]}$ : Distância entre o transmissor e o receptor [km]  $\{1 \leq d \leq 20\}$ ;

$f_{[\text{MHz}]}$ : Frequência de rádio [MHz]  $\{150 \leq f \leq 1500\}$ .

O termo  $a(h_m)_{[\text{dB}]}$  da equação é uma relação entre as alturas da estação rádio base e estação móvel, expresso como segue:

- cidades grandes e frequência  $f \leq 200$  MHz:

$$a(h_m)_{[\text{dB}]} = 8,29 (\log 1,54 / h_m)^2 - 1,1 \quad (3.4)$$

- cidades grandes e frequência  $f \geq 400$  MHz:

$$a(h_m)_{[\text{dB}]} = 3,2 (\log 11,75 / h_m)^2 - 4,97 \quad (3.5)$$

- cidades pequenas e médias:

$$a(h_m)_{[dB]} = (1,1 \log f - 0,7) h_m - (1,56 \log f - 0,8) \quad (3.6)$$

A expressão Okumura-Hata para perdas em ambientes suburbanos ( $L_{SU[AB]}$ ) é dada por:

$$L_{SU[AB]} = L_{U[AB]} - 2 (\log f_{[MHz]} / 28)^2 - 5,4 \quad (3.7)$$

A expressão Okumura-Hata para perdas em áreas rurais abertas ( $L_{RO[AB]}$ ) é dada por:

$$L_{RO[AB]} = L_{U[AB]} - 4,78 (\log f_{[MHz]})^2 + 18,33 \log (f_{[MHz]}) - 40,94 \quad (3.8)$$

### 3.2.4 Modelo COST 231

O modelo COST 231 (Walfish-Ikegami) foi desenvolvido para ser aplicado somente em situações onde há perdas de propagação de sinal relacionadas à ambientes urbanos.

Este modelo se diferencia da propagação no espaço livre por considerar os fenômenos de propagação guiada, existindo ou não uma linha de visada direta entre a estação rádio base e a estação móvel, em uma rua cercada por edificações. Para isto foram incluídos quatro fatores: altura dos edifícios ( $h_{Roof[m]}$ ), largura das ruas ( $w_{[m]}$ ), separação entre edifícios ( $b_{[m]}$ ) e orientação das ruas em relação à direção de percurso ( $\varphi$ ). Neste modelo também foi considerado o fato da estação móvel estar abaixo do topo dos edifícios, usando uma função empírica baseada em medidas.

Quando há linha de visada entre o transmissor e o receptor, a equação é dada por:

$$L_{WI[AB]} = 42,6 + 26 \log (d_{[km]}) + 20 \log (f_{[MHz]}) \quad (3.9)$$

Onde:

$L_{WI[AB]}$ : Perda de potência em ambiente urbano [dB];

$d_{[km]}$ : Distância entre o transmissor e o receptor [km]  $\{0,02 \leq d \leq 5\}$ ;

$f_{[MHz]}$ : Frequência de rádio [MHz]  $\{800 \leq f \leq 2000\}$ .

Para  $d < 20$  metros,  $L_{WI[AB]}$  é igual a atenuação no espaço livre ( $L_o[AB]$ ).

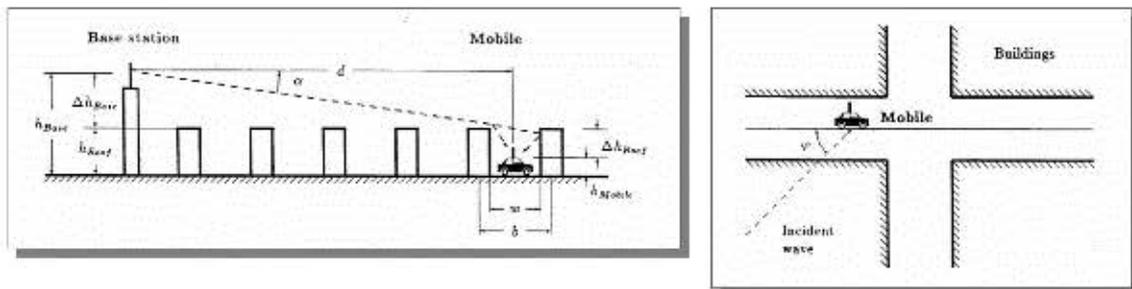


Figura 3.3: Definição gráfica dos parâmetros das equações Walfish-Ikegami

Quando não há linha de visada entre o transmissor e o receptor, é considerada a perda por difração múltipla do sinal ( $L_{msd}$ ) e a difração no topo dos edifícios ( $L_{rts}$ ), conforme segue:

- para  $L_{rts[dB]} + L_{msd[dB]} > 0$ :

$$L_{WI[dB]} = L_o[dB] + L_{rts[dB]} + L_{msd[dB]} \quad (3.10)$$

- para  $L_{rts[dB]} + L_{msd[dB]} \leq 0$ :

$$L_{WI[dB]} = L_o[dB] \quad (3.11)$$

$$L_o[dB] = 32,4 + 20 \log_{10} (d_{[km]}) + 20 \log_{10} (f_{[MHz]}) \quad (3.12)$$

A perda por difração no topo dos edifícios ( $L_{rts[dB]}$ ) é dado por:

$$L_{rts[dB]} = 16,9 - 10 \log (\omega_{[m]}) + 10 \log (f_{[MHz]}) + 20 \log (\Delta h_{Mobile[m]}) + L_{ori[dB]} \quad (3.13)$$

Onde:

$\omega_{[m]}$ : Largura das ruas [m];

$\Delta h_{Mobile[m]}$ : Altura da antena da estação móvel [m].

$L_{ori[dB]}$  é a perda devido à orientação da rua em relação à direção de percurso da estação móvel:

- para  $0^{\circ} \leq \varphi < 35^{\circ}$ :

$$L_{ori[dB]} = -10 + 0,354 \varphi \quad (3.14)$$

- para  $35^{\circ} \leq \varphi < 55^{\circ}$ :

$$L_{ori[dB]} = 2,5 + 0,075 (\varphi - 35^{\circ}) \quad (3.15)$$

- para  $55^{\circ} \leq \varphi < 90^{\circ}$ :

$$L_{ori[dB]} = 4 - 0,114 (\varphi - 55^{\circ}) \quad (3.16)$$

Variação da altura da antena da estação móvel:

$$\Delta h_{Mobile[m]} = h_{Roof[m]} - h_{Mobile[m]} \quad (3.17)$$

Variação da altura da antena da estação rádio base:

$$\Delta h_{Base[m]} = h_{Base[m]} - h_{Roof[m]} \quad (3.18)$$

A perda por difração múltipla do sinal ( $L_{msd[dB]}$ ) é dado por:

$$L_{msd[dB]} = L_{bsh[dB]} + k_a[dB] + k_d[dB] \log(d_{[km]}) + k_f[dB] \log(f_{[MHz]}) - 9 \log(b_{[m]}) \quad (3.19)$$

A perda  $L_{bsh[dB]}$  está relacionada com a diferença de alturas entre a antena da estação rádio base e o topo do prédio vizinho:

- para  $h_{Base[m]} > h_{Roof[m]}$ :

$$L_{bsh[dB]} = -18 \log(1 + \Delta h_{Base[m]}) \quad (3.20)$$

- para  $h_{Base[m]} \leq h_{Roof[m]}$ :

$$L_{bsh[dB]} = 0 \quad (3.21)$$

A perda  $k_a[dB]$  está relacionada com o aumento da atenuação sofrida pela estação rádio base situada abaixo do nível médio dos prédios vizinhos:

- para  $h_{Base[m]} > h_{Roof[m]}$ :

$$k_a[dB] = 54 \quad (3.22)$$

- para  $h_{Base[m]} \leq h_{Roof[m]}$  e  $d_{[km]} > 0,5$  km:

$$k_a[dB] = 54 - 0,8 \Delta h_{Base[m]} \quad (3.23)$$

- para  $h_{Base[m]} \leq h_{Roof[m]}$  e  $d_{[km]} < 0,5$  km:

$$k_a[dB] = 54 - 0,8 \Delta h_{Base[m]} (d_{[km]} / 0,5) \quad (3.24)$$

A perda  $k_d[dB]$  está relacionada com a distância entre o transmissor e o receptor:

- para  $h_{Base[m]} > h_{Roof[m]}$ :

$$k_d[dB] = 18 \quad (3.25)$$

- para  $h_{Base[m]} \leq h_{Roof[m]}$ :

$$k_d[dB] = 18 - 15 (\Delta h_{Base[m]} / h_{Roof[m]}) \quad (3.26)$$

A perda  $k_f[dB]$  está relacionada com a frequência de transmissão:

- para cidade de tamanho médio e suburbano:

$$k_f[dB] = -4 + 0,7 (f_{[MHz]} / 925 - 1) \quad (3.27)$$

- para centros metropolitanos:

$$k_f[dB] = -4 + 1,5 (f_{[MHz]} / 925 - 1) \quad (3.28)$$

O modelo COST 231 Walfish-Ikegami é válido dentro dos seguintes limites: frequência da portadora entre 800 e 2000 MHz, altura da estação rádio base entre 4 e 50 metros, altura da estação móvel entre 1 e 3 metros, distância entre transmissor e receptor entre 20 e 5000 metros.

### 3.2.5 Modelo de Erceg

O modelo de Erceg é um modelo experimental apropriado para as aplicações de banda larga sem fio, além de contemplar as faixas de frequências de até 3,5 GHz. Possui três variantes, conforme o ambiente de propagação do sinal:

- Modelo A: para terrenos montanhosos e forte densidade urbana;
- Modelo B: para terrenos com poucas elevações e densidade urbana moderada;
- Modelo C: para terrenos planos e baixa densidade urbana.

O *path loss* para a versão estendida do modelo de Erceg é dado por:

$$PL_{[dB]} = 20 \log (4\pi d_o f_{[MHz]} / 300) + 10 \gamma \log (d_{[km]} / d_o) + \Delta PL_f + \Delta PL_{h_m} + \Delta PL_{\theta_m} \quad (3.29)$$

$$\gamma = A - B * h_b + C / h_b \quad (3.30)$$

$$\Delta PL_f = 6 \log (f_{[MHz]} / 1900) \quad (3.31)$$

$$\Delta PL_{h_m} = -K \log (h_m / 2) \quad (3.32)$$

$$\Delta PL_{\theta_m} = 0,64 \ln (\theta / 360) + 0,54 [\ln (\theta / 360)]^2 \quad (3.33)$$

Tabela 3.1: Parâmetros dos Modelos da Equação de Erceg (3.29, 3.30 e 3.32)

Parâmetros	Modelo A	Modelo B	Modelo C
A	4,6	4,0	3,6
B	0,0075	0,0065	0,0050
C	12,6	17,1	20,0
$d_o$ [km]	0,1	0,1	0,1
K	10,8	10,8	20,0

Fonte: GOES, 2008, p. 3.

Onde:

$PL_{[dB]}$ : Perda de potência [dB];

$d_{[km]}$ : Distância entre o transmissor e o receptor [km]  $\{0,1 \leq d \leq 8\}$ ;

$f_{[MHz]}$ : Frequência de rádio [MHz]  $\{1900 \leq f \leq 3500\}$ ;

$h_b$ : Altura das antenas da estação rádio base [m]  $\{10 \leq h_b \leq 80\}$ ;

$h_m$ : Altura das antenas da estação móvel [m]  $\{2 \leq h_m \leq 10\}$ ;

$\theta$ : Ângulo de espalhamento [graus].

### 3.3 Raio de Cobertura da Célula

O *link budget* (orçamento de enlace) permite estimar a máxima atenuação do sinal pelo cálculo de ganhos e perdas de potência existentes entre o transmissor e o receptor. O valor obtido para as perdas no caminho de *uplink* e *downlink* pode ser inserido ao modelo de propagação para estimar o raio de cobertura de uma estação rádio base. A partir do intervalo de distanciamento entre células podemos estimar a quantidade mínima de sites para a cobertura adequada de uma determinada área geográfica.

As tabelas 3.2 e 3.3 apresentam o cálculo de *link budget* para *uplink* e *downlink*, respectivamente.

Tabela 3.2: LTE *uplink link budgets*

<b>Transmissor – estação móvel</b>	
Máxima potência de transmissão (dBm)	23,0
Ganho da antena de Tx (dBi)	0,0
<i>Body loss</i> (dB)	0,0
EiRP (dBm)	23,0
<b>Receptor – estação rádio base</b>	
Figura de ruído do node B (dB)	2,0
Ruído térmico (dB)	-118,5
Ruído do receptor (dBm)	-116,5
Relação sinal / ruído (dB)	-7,0
Sensibilidade do receptor (dB)	-123,5
Margem de interferência (dB)	1,0
Perda dos cabos (dB)	0,0
Ganho da antena de Rx (dBi)	-18,0
Margem de desvanecimento rápido (dB)	0,0
Ganho de <i>soft handover</i> (dB)	0,0
<b>Máxima perda do caminho (dB)</b>	<b>163,5</b>

Fonte: HOLMA, 2009, p. 224.

Tabela 3.3: LTE *downlink link budgets*

<b>Transmissor – estação rádio base</b>	
Potência de transmissão (dBm)	46,0
Ganho da antena de Tx (dBi)	18,0
Perda dos cabos (dB)	-2,0
EiRP (dBm)	62,0
<b>Receptor – estação móvel</b>	
Figura de ruído da estação móvel (dB)	7,0
Ruído térmico (dB)	-104,5
Ruído de piso do receptor (dBm)	-97,5
Relação sinal / ruído (dB)	-9,0
Sensibilidade do receptor (dBm)	-106,5
Margem de interferência (dB)	4,0
Ganho da antena de Rx (dBi)	0,0
Sobrecarga do canal de controle (dB)	1,0
<i>Body loss</i> (dB)	0,0
<b>Máxima perda do caminho (dB)</b>	<b>163,5</b>

Fonte: HOLMA, 2009, p. 226.

O raio de cobertura da célula é o mesmo para *uplink* e *downlink*, com máxima perda do caminho (*path loss*) igual a 163,5 dB nos dois casos. Isto permite concluir que a estação móvel do usuário que estiver dentro do raio de cobertura da célula tem a garantia de estabelecimento de comunicação entre transmissor e receptor e vice-versa.

O intervalo de distância entre as células que atende ao balanço de potência pode ser estimado a partir de cálculos utilizando um modelo de propagação. A figura 3.4 apresenta os intervalos entre células calculado a partir do modelo Okumura-Hata para diversos cenários, e sugere um intervalo de até 700 metros de distância entre células para garantir intensidade de sinal adequado para cobertura urbana indoor LTE com frequência de 2,5 GHz.

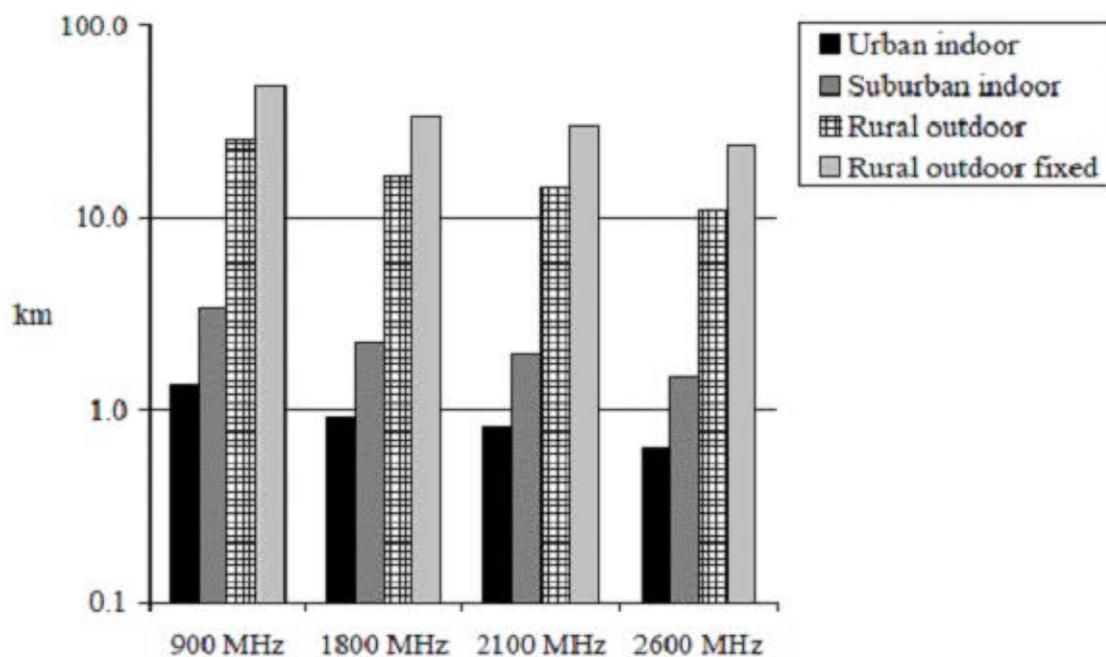


Figura 3.4: Intervalo entre células no modelo Okumura-Hata (HOLMA, 2009)

### 3.4 Plano de Frequência

A implantação de uma rede LTE no Brasil depende da autorização da Anatel às operadoras interessadas em prestar esta modalidade de serviço. Segundo a conselheira da Anatel Emília Ribeiro, a agência planeja antecipar a licitação das licenças de operação do LTE na faixa de 2,5 GHz para 2011. A previsão é de que as primeiras redes LTE estejam em operação em 2013, motivadas pelo atendimento durante a realização da próxima Copa do Mundo no Brasil.

O LTE na modalidade FDD (*Frequency Division Duplex*) possui duas bandas, cada uma com até 20 MHz de largura de banda, ocupando duas faixas de frequências distintas: no *uplink* opera em frequências entre 2500 e 2570 MHz e no *downlink* opera em frequências entre 2620 e 2690 MHz.

Tabela 3.4: Faixa de frequências 2,5 GHz para o LTE

Banda	<i>Uplink</i> (MHz)	BW <sub>UL</sub> (MHz)	<i>Downlink</i> (MHz)	BW <sub>DL</sub> (MHz)
P	2500 a 2510	10	2620 a 2630	10
W	2510 a 2530	20	2630 a 2650	20
V	2530 a 2550	20	2650 a 2670	20
X	2550 a 2570	20	2670 a 2690	20

Fonte: TELETIME, 2010.

A tecnologia OFDMA possui um sistema de reutilização bastante agressivo, onde todas as células operam com frequência única com fator de reuso  $K=1$ . Esta abordagem

tem a vantagem de utilizar a menor quantidade de espectro. A interferência entre canais na borda da célula pode ser controlada devido à natureza ortogonal das subportadoras do sistema OFDMA. A setorização das estações rádio base também contribui para a redução da interferência entre canais.

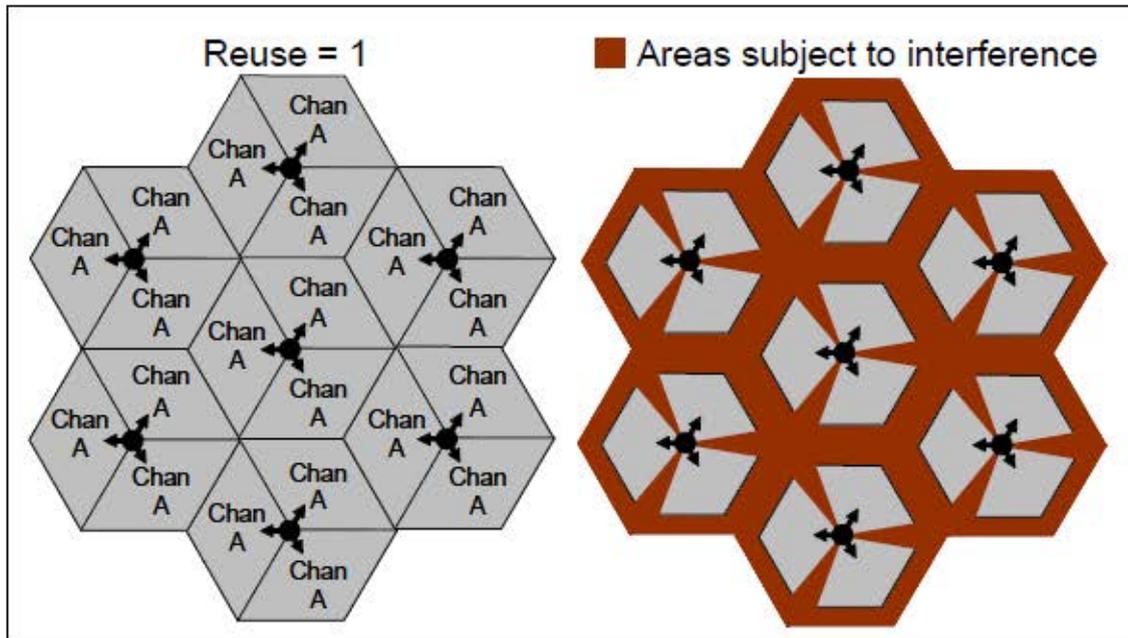


Figura 3.5: Rede de frequência única com fator de reuso  $K=1$  em estação rádio base com 3 Setores (GRAY, 2007)

## 4 ESTUDO DE CASO: QUANTIFICAÇÃO DE SITES LTE NO CENTRO HISTÓRICO DE PORTO ALEGRE



Figura 4.1: Mapa do Centro Histórico de Porto Alegre

Porto Alegre é uma cidade situada ao sul do Brasil e a capital do estado do Rio Grande do Sul, com área aproximada de 497 km<sup>2</sup> e uma população estimada em 1.436.123 habitantes. Seu território possui 79 bairros oficiais e 4 áreas sem denominação oficial (PORTO ALEGRE, 2010).

O Centro Histórico de Porto Alegre possui área aproximada de 2,3 km<sup>2</sup> e população estimada em 36.862 habitantes (IBGE, 2010). Os limites do bairro são: Av. Loureiro da Silva, Av. João Goulart, Av. Mauá, Largo Vespasiano Julio Veppo, Complexo Viário Conceição, Rua Sarmento Leite, Rua Eng. Luiz Englert e Av. Perimetral, conforme mostra a figura 4.1.

A área do Centro é urbana e densamente povoada, caracterizada pela ocupação predominante de prédios e pela intensa circulação de pessoas vindas de outros bairros e municípios, motivadas por questões profissionais, compras, lazer, cultura e turismo.

A importância econômica, política e social do Centro Histórico para a cidade de Porto Alegre faz com que este bairro seja uma das áreas prioritárias para o início da implantação de uma rede de rádio móvel baseada na tecnologia LTE.

#### 4.1 Quantidade de Terminais Móveis LTE

A estimativa da quantidade de pessoas com potencial de se tornarem clientes da prestadora de serviços LTE deve partir de algumas premissas relacionadas com a população, público alvo, mobilidade no horário de pico e penetração de mercado da operadora.

O acesso ao serviço de banda larga tem alcance em diversas faixas etárias. As crianças iniciam muito cedo seu interesse pela navegação na internet. No entanto, o público idoso se mostra resistente e encontra dificuldades em absorver as mudanças tecnológicas.

O público alvo a ser considerado são as pessoas que se encontram na faixa etária compreendida entre 10 e 69 anos de idade que, segundo o IBGE, representa 80,55% da população de Porto Alegre. No Centro Histórico, portanto, o público alvo estimado é de aproximadamente 29.691 possíveis usuários.

A penetração de mercado no momento inicial das operações deve considerar as alternativas de acesso à banda larga existentes, bem como o diferencial da mobilidade. É razoável considerar que até 30% dos possíveis usuários venham a se tornar assinantes da rede LTE nos primeiros anos de operação, o equivalente a cerca de 8.900 assinantes.

O Rio Grande do Sul possui 1,06 terminais móveis por habitante. Deste modo, o dimensionamento da rede LTE deve considerar uma demanda inicial de 9.440 terminais móveis de residentes no Centro Histórico de Porto Alegre.

Além da população residente no Centro Histórico, devemos considerar a parcela da população que se desloca de outras regiões. O impacto da mobilidade ocasiona o aumento de tráfego na rede e deve ser considerado no momento do dimensionamento. A quantidade de terminais adicionais na região de cobertura é variável e imprecisa. No entanto, para fins de projeto, consideraremos uma mobilidade que acarreta em aumento de 60% na quantidade de usuários, o que eleva para até 15.100 terminais móveis LTE presentes na região de cobertura.

$$N_T = P * P_A * P_O * T_H * F_M \quad (4.1)$$

Tabela 4.1: Estimativa da quantidade de terminais móveis

População residente da área (P)	36.862 hab.
Público Alvo (P <sub>A</sub> )	80,55%
Penetração da Operadora (P <sub>O</sub> )	30%
Terminais por habitante (T <sub>H</sub> )	1,06
Fator de Mobilidade (F <sub>M</sub> )	60%
Número de Terminais Móveis LTE (N <sub>T</sub> )	15.100

## 4.2 Demanda de Tráfego dos Usuários

Os usuários de banda larga móvel podem ser agrupados em três perfis distintos de consumo de recursos da rede, conforme a quantidade e o tempo de uso dos serviços disponibilizados: usuário profissional, usuário tecnológico e usuário casual (GRAY, 2007).

O usuário profissional necessita ter alta disponibilidade de acesso a recursos para fins comerciais e pessoais, tais como serviços de correio eletrônico, vídeo-conferência, transferências de arquivos e serviços de acesso em tempo real. A taxa necessária para o usuário profissional é de 600 kbps. Representa 50% dos usuários da rede.

O usuário tecnológico necessita ter boa disponibilidade de acesso constante aos recursos para uso pessoal e, eventualmente, acesso aos recursos para uso profissional. Utilizam a rede para navegação na internet, jogos em rede e transferências de arquivos multimídia. A taxa necessária para o usuário tecnológico é de 480 kbps. Representa 35% dos usuários da rede.

O usuário casual acessa periodicamente a rede para a navegação na internet e consulta ao correio eletrônico. A taxa necessária para o usuário casual é de 240 kbps. Representa 15% dos usuários da rede.

O horário de pico é aquele em que há o maior consumo de recursos da rede, e seu comportamento deve ser considerado no dimensionamento da capacidade da rede LTE.

Por não contar com um histórico de uso anterior de serviços móveis LTE, a estimativa da demanda de tráfego se torna um desafio quanto à previsão do tráfego a ser cursado, com certo grau de precisão.

Os cálculos da demanda de tráfego serão baseados no tráfego de download, visto ser este geralmente maior que o tráfego de *upload*.

Os intervalos de tempo de *download*, *upload* e ociosidade durante a conexão com a rede são utilizadas para a estimativa dos recursos de rede necessários para o atendimento ao usuário. Os serviços de voz se caracterizam pela divisão do tempo em cerca de 50% *upload* e 50% *download*, com pouco tempo de ociosidade. O tráfego de dados é disperso entre usuários ociosos e usuários que efetivamente fazem uso da rede, em um determinado momento. O usual é que 25% dos usuários se encontrem ativos durante o horário de pico.

A tabela 4.2 resume o desempenho médio do usuário da rede LTE no horário de pico, onde 15,65% de todos os usuários se conectam no horário de pico com taxa média de 504 kbps, utilizando a rede em 25% do horário de pico para *download*.

Tabela 4.2: Estimativa da taxa de dados requerida no horário de pico

Perfil do Usuário	% Usuários da Rede	% Usuários Conectados no Horário de Pico	% Tempo de <i>Download</i> na Rede	Taxa de Download durante o Horário de Pico
Profissional	50%	20%	25%	600 kbps
Tecnológico	35%	14%	25%	480 kbps
Casual	15%	5%	25%	240 kbps
<b>Média</b>	<b>100%</b>	<b>15,65%</b>	<b>25%</b>	<b>504 kbps</b>

A taxa disponível para download baseada na percentagem de assinantes ativos e no nível de atividade da rede, para ambientes urbanos, é apresentado na figura 4.2. Podemos perceber que, se houvesse redução no nível de atividade da rede ou a redução do número de usuários conectados à rede, haveria um aumento da taxa disponível para download.



Figura 4.2: Taxa de download por usuário *versus* % usuários conectados na rede

A quantidade estimada de terminais móveis mostrada na tabela 4.1 combinado com a estimativa de tráfego no horário de pico da tabela 4.2 possibilita o cálculo da demanda de tráfego mostrado na tabela 4.3.

Tabela 4.3: Demanda de tráfego do Centro Histórico

Número de Terminais Móveis	% Usuários Conectados no Horário de Pico	% Tempo de Download na Rede	Taxa de Download do Usuário durante o Horário de Pico	Demanda de Tráfego no Horário de Pico
15.100	15,65%	25%	504 kbps	297,76 Mbps

O número de terminais móveis LTE no Centro Histórico de Porto Alegre foi estimado em 15.100, sendo que 15,65% dos terminais estão conectados no horário de pico com 25% do tempo de conexão em atividade de download na rede. A taxa média de download por usuário é de 504 kbps, logo, a demanda de tráfego na região considerada é de 297,76 Mbps.

### 4.3 Capacidade da Estação Rádio Base LTE

O LTE proporciona altas taxas de pico usando largura de banda de até 20 MHz, modulação 64QAM de alta ordem e configuração de antenas MIMO. A tabela 4.4 mostra, a partir do tipo de modulação e configuração das antenas, a máxima taxa de pico realizável no *downlink*, já considerando o tamanho do bloco de transporte.

Tabela 4.4: Máxima taxa de pico realizável no *downlink* (Mbps) considerando o tamanho do bloco de transporte

Modulação	Antenas	1,4 MHz	3,0 MHz	5,0 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
QPSK	SISO	0,9	2,3	4,0	8,0	11,8	15,8
16QAM	SISO	1,8	4,3	7,7	15,3	22,9	30,6
64QAM	SISO	4,4	6,5	18,3	36,7	55,1	75,4
64QAM	MIMO 2X2	8,8	8,6	36,7	73,7	110,1	149,8

Fonte: HOLMA, 2009. p. 215.

Assim sendo, para uma célula com configuração de antenas MIMO 2 x 2 e modulação 64QAM, a máxima taxa de pico realizável (teórica) é de 149,8 Mbps.

A taxa de pico da célula, na prática, depende da relação sinal/ruído (SNR) percebido pelo terminal móvel. A figura 4.3 mostra a relação entre a eficiência espectral e o SNR, para os tipos de antenas.

O afastamento da estação móvel do centro da célula em direção à sua borda faz com que haja a redução do SNR pela redução do sinal e aumento do ruído. Por exemplo, se o SNR for de apenas 12 dB a eficiência espectral será de 5bps/Hz, resultando em uma taxa de pico máxima de 100 Mbps para uma banda de 20 MHz.



Figura 4.3: Eficiência espectral versus relação sinal/ruído por tipo de antena

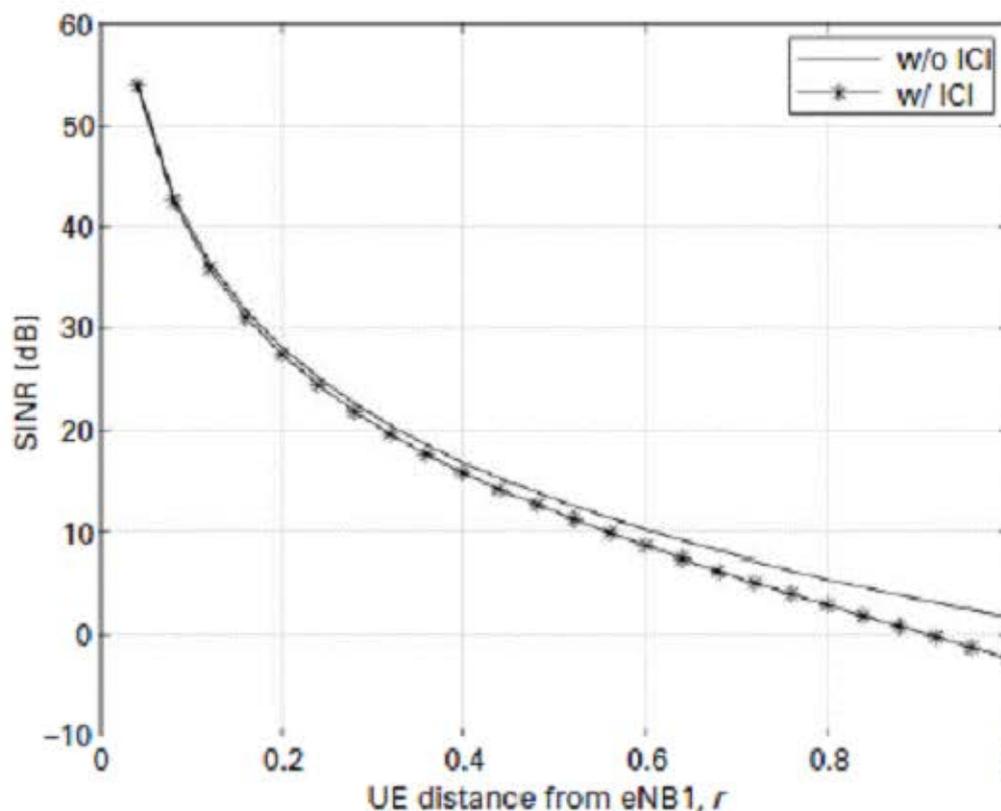


Figura 4.4: SINR em Função da Distância do Centro da Célula (KHAN, 2009)

A taxa máxima de pico da célula, sob o ponto de vista do terminal móvel, dependerá da distância que a mesma se encontra do centro da célula. Na situação limite, quando o usuário se encontra na borda da célula, a uma distância de 600 metros do centro da célula, conforme mostra na figura 4.4, o SINR é de 10 dB. Neste caso, conforme a figura 4.3, a eficiência espectral MIMO é de 4 bps/Hz, ou 80 Mbps para 20 MHz.

Para uma célula MIMO 2x2 64QAM com raio de 600 metros, a taxa de pico máxima para download pode variar entre 80 Mbps e 149,8 Mbps para o usuário, resultando em uma taxa de pico média de 114,9 Mbps para o conjunto de usuários dispersos na célula.

A tabela 4.3 indica uma demanda de tráfego de 297,76 Mbps para o atendimento ao Centro Histórico de Porto Alegre. Como cada célula possui a capacidade de entregar uma taxa de pico média de 114,9 Mbps conclui-se que, sob o ponto de vista do tráfego, são necessárias 3 células para atender a região analisada.

Tabela 4.5: Quantidade mínima de células em função do tráfego de rede

Número de Terminais Móveis	Demanda de Tráfego no Horário de Pico	Taxa Média de Pico no Download	Quantidade Mínima de Células
15.100	297,76 Mbps	114,9 Mbps	3

#### 4.4 Quantidade de Sites

A determinação da quantidade de sites leva em consideração os aspectos relacionados à área de cobertura e a demanda de tráfego da Rede.

No capítulo anterior foi definido que o raio de cobertura para atendimento dos serviços móveis LTE não deveria ser superior a 700 metros. No cálculo da capacidade de rede foi considerado o raio de 600 metros devido ao SNR de borda de célula. A tabela 4.6 indica que seriam necessárias no mínimo 10 células para cobrir o Centro Histórico mantendo o usuário a menos de 600 metros do centro da célula.

Tabela 4.6: Quantidade mínima de células em função do raio de cobertura

Área do Centro Histórico	Raio de Cobertura da Célula	Área da Célula	Quantidade Mínima de Células
2,3 km <sup>2</sup>	0,6 km	0,23 km <sup>2</sup>	10

A configuração inicial de cada site prevê 3 setores com antenas MIMO 2x2. Pelo critério do Raio de Cobertura, seriam necessários 4 sites com 3 setores cada para cobrir a área de interesse, totalizando 12 células. A figura 4.5 mostra a disposição dos sites, com polígono de posicionamento do site representado pelo círculo pontilhado em vermelho com raio correspondente a ¼ do raio do site. Nota-se que a configuração sugerida atende quase a totalidade da área do Centro Histórico.

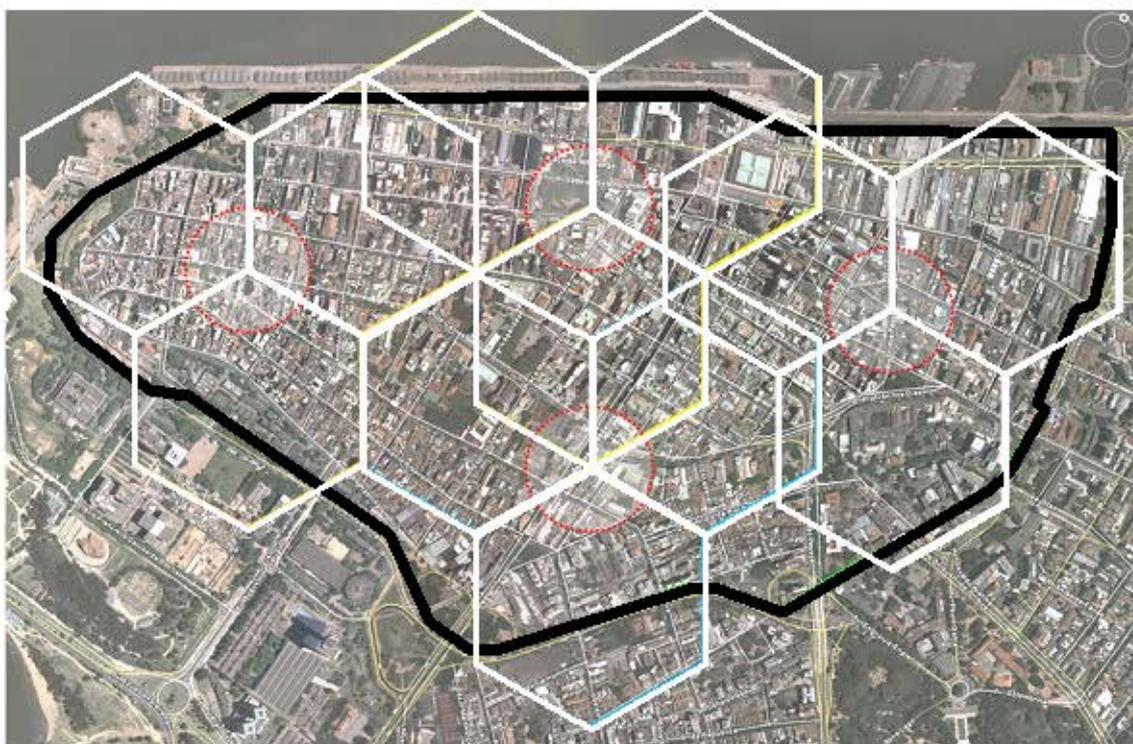


Figura 4.5: Quantidade de sites considerando raio da célula de 600 metros

Os polígonos de posicionamento dos sites LTE sugerem 4 localidades: Rua Duque de Caxias esquina Rua General Portinho, Duque de Caxias esquina Borges de Medeiros, Imediações da Praça da Alfândega e imediações da Praça Dom Feliciano.

A quantidade mínima de 4 sites para atendimento ao critério do raio de cobertura máximo da célula atende com sobra as necessidades de demanda de tráfego estimado. No momento da implantação poderia ser suprimida a implantação de antenas MIMO e substituídas por antenas SISO, conforme mostra a tabela 4.7.

Tabela 4.7: Capacidade da rede para 12 células com modulação 64QAM.

Tipo de Antena	Taxa Média de Pico	Número de Terminais Móveis
MIMO (2x2)	1378,8 Mbps	69.922
SISO (1x1)	632,4 Mbps	32.070



Figura 4.6: Quantidade mínima de sites no Centro Histórico de Porto Alegre

#### **4.5 Legislação Municipal**

O município de Porto Alegre possui legislação que sistematiza o regramento de padrões urbanísticos, sanitários e ambientais para a instalação de estações rádio base, através da lei 8.896 de 26 de abril de 2002, do decreto 13.927 de 18 de outubro de 2002 e do decreto 15.095 de 16 de fevereiro de 2006.

A potência irradiada pelas estações rádio base deve obedecer aos valores limites de exposição humana a campos eletromagnéticos definidos em lei, que podem chegar a valores limites de 3,0 Volts / metro. Laudos teóricos e medições periódicas deverão ser apresentados para a renovação da licença de operação da ERB.

O eixo da torre a ser implantada no site deverá estar afastado em, pelo menos, 5 metros da divisa do imóvel onde se localiza. A distância mínima entre torres que possuam ERB deve ser de 500 metros, sendo permitido o compartilhamento de uma única torre com diversas ERBs. Não há limite de distanciamento mínimo entre ERBs implantadas em prédios.

O eixo da torre ou do suporte das antenas de transmissão e recepção de radiofrequência deve obedecer a uma distância mínima de 50 metros da divisa de imóveis onde se situem hospitais, escolas de ensino fundamental, médio e pré-escola, creches, clínicas cirúrgicas, clínicas geriátricas e centros de saúde.

Nas instalações de equipamentos em topo de prédios, as antenas devem estar preferencialmente no centro geométrico da laje superior. As antenas e containers não poderão estar junto ao perímetro externo da edificação.

Há outras restrições à implantação de ERB previstas em lei municipal, como a proibição de construção em topo de morros, acima da curva de nível topográfico correspondente a 1/3 da altura total do morro. Também não é permitida a instalação de ERB a menos de 100 metros do leito dos rios.

## 5 CONCLUSÕES

A demanda de tráfego dos últimos anos tem experimentado um crescimento exponencial pelo aumento da quantidade de usuários, pelo aumento na quantidade de dispositivos móveis por usuário e pelo aumento de consumo de recursos das redes de telefonia por cada dispositivo móvel.

A penetração da telefonia móvel se aproxima da média de 1 terminal móvel por usuário no Brasil. A ampliação da área de cobertura nacional pelas operadoras faz com que a telefonia móvel esteja presente em quase todas as sedes municipais brasileiras, assim como em diversos distritos e nas rodovias que interligam as cidades. A popularização da telefonia celular pela presença de dispositivos móveis em todas as camadas sociais e faixas etárias faz com que a quantidade de usuários aumente a cada ano.

A diversidade de dispositivos móveis no mercado das telecomunicações e a possibilidade de vários equipamentos eletro-eletrônicos se conectarem na rede de telefonia móvel muitas vezes faz com que o usuário seja assinante de mais de uma linha, o que aumenta a densidade média de terminais por usuários. Inicialmente adquirindo o primeiro terminal para a comunicação de voz, no momento seguinte o usuário adquire pelo menos outra linha dedicada ao serviço de dados, tais como modem, laptop e PDA. Este fenômeno já vem ocorrendo em algumas regiões do Brasil e em algumas partes do Mundo.

O terminal móvel vem evoluindo e agregando serviços que requerem cada vez mais recursos de uma rede de telefonia celular. Concebido para a prestação dos serviços de voz, com o passar do tempo foram incrementados serviços de dados, tais como serviços de mensagem de textos, serviços de mensagem multimídia, chamadas de vídeo, acesso a internet, VoIP, PTT, navegação por GPS, IPTV e vídeo-conferência. A quantidade de serviços por dispositivo móvel e o consumo de rede de cada serviço faz com que haja um aumento significativo na taxa de transmissão necessária para o atendimento do assinante.

O elevado aumento na demanda de tráfego se contrapõe ao escasso espectro de frequências, bem como às tecnologias celulares vigentes que proporcionam baixa capacidade instalada nas redes celulares. O resultado é um grande aumento na quantidade de implantações de sites, embora se continue mantendo uma limitação na qualidade dos serviços que necessitam de maiores taxas de transmissão. Como o espectro de frequências disponível em telecomunicações é um recurso escasso, todo o esforço deve ser voltado a soluções tecnológicas que contemplem uma melhor eficiência espectral.

O sistema LTE é a tecnologia concebida pelo 3GPP para a evolução da rede de telefonia móvel de terceira geração. É uma rede integralmente comutada por pacotes tanto na interface de rádio como no núcleo da rede, diferenciando-se das tecnologias anteriores que mesclavam comutação de circuitos com comutação de pacotes. A meta na taxa de transmissão é atingir pico superior a 100 Mbps no *downlink* e 50 Mbps no *uplink*, com latência de transmissão inferior a 10 milissegundos.

O acesso múltiplo por multiportadoras OFDMA possui elevada eficiência espectral, permitindo maiores taxas de transmissão de pico com menor consumo de banda. Sem alterar parâmetros significativos do sistema nem alterar a configuração dos equipamentos, o OFDMA permite flexibilidade na largura de banda, podendo oferecer largura de banda variável em faixas menores para cada tipo de usuário. Também facilita a coordenação de interferências e o reuso de frequências. Os receptores utilizam a portadora SC-FDMA, que possui características semelhantes ao OFDMA, porém permite a utilização de circuitos de baixa complexidade pela potência de pico significativamente mais baixa, reduzindo o custo dos terminais móveis.

O aumento da eficiência espectral pode ser potencializado pelo uso de múltiplas antenas de transmissão e recepção, proporcionando ganhos de diversidade espacial, ganhos de multiplexação espacial e ganho na intensidade do sinal. O resultado é uma melhora de desempenho com o aumento na taxa de transmissão pela redução na taxa de erros do sinal.

A modulação adaptativa contribui para o aumento médio da taxa de transmissão pela escolha dinâmica do padrão de modulação que entrega a maior taxa de transmissão mantendo a robustez adequada às condições de enlace do usuário. Em condições adversas, com degradação do sinal, utiliza a modulação QPSK, podendo modificar para a modulação 16QAM ou 64QAM em condições mais favoráveis de SNR.

Podemos concluir que os elementos que contribuem para a elevação das taxas de transmissão na rede LTE são: portadora de múltiplo acesso OFDMA, sistema de múltiplas antenas de transmissão e recepção (MIMO) e modulação adaptativa.

O sistema LTE deverá operar na faixa de 2,5 GHz na modalidade FDD, em duas faixas com largura de banda de 20 MHz cada. Isto permitirá aproveitar todo o potencial da tecnologia, com a possibilidade de alcance das taxas de transmissão normatizadas pela 3GPP.

A capacidade de transmissão da rede LTE depende da relação sinal / ruído percebido pelo dispositivo móvel do usuário, dada pelas condições de enlace de rádio. Quando o receptor está muito próximo à antena transmissora, em condições de visada direta, a taxa de transmissão fica próxima ao valor máximo teórico mas, com o afastamento do usuário para a borda da célula, a taxa de transmissão reduz para o mínimo estipulado em projeto.

A demanda de tráfego do usuário é dada pelo seu perfil de consumo dos recursos da rede. Considerando o perfil de comportamento médio de consumo, podemos estimar a demanda de tráfego necessária para atender a população de determinada região. A tendência é de que o perfil médio do usuário se torne mais arrojado, demandando cada vez mais recursos da rede pelo aumento do uso de seus serviços. Há também uma tendência de aumento no tempo em que o usuário fica conectado à rede, para uma mesma taxa de transmissão, devido à sofisticação dos serviços oferecidos pela rede.

A cobertura de uma célula tende a reduzir o seu raio de atuação, visto que a demanda é por maiores taxas de transmissão por usuário, obtida por um melhor SNR através da aproximação do usuário do centro da célula. Em ambientes de atendimento com morfologia urbana, haverá um aumento na quantidade de sites pela redução de distância entre sites, para a manutenção de uma taxa de transmissão mínima na região de cobertura. Em ambientes de cobertura de morfologia rural, caracterizado pela baixa densidade de assinantes em uma vasta área de atendimento, não será possível manter taxas de transmissão elevadas para todos os clientes.

Na análise de quantificação de sites, quando é necessário aumentar o número de sites pelo critério de cobertura em relação ao critério de tráfego, o tráfego projetado por site pode diminuir a ponto de podermos promover a troca de antenas MIMO por antenas SISO nos sites, reduzindo o custo de implantação.

A quantidade mínima de 4 eNodeB para atendimento ao Centro Histórico de Porto Alegre, estimada pelo estudo de caso, faz com que as operadoras de telefonia móvel possam aproveitar os sites existentes que operam com outras tecnologias para implantar a tecnologia LTE. Segundo a consulta na base de dados SITAR da Anatel, nesta região da cidade a Claro e a Oi possuem 17 sites cada, a Vivo possui 16 sites e a Tim possui 12 sites, conforme mostra o gráfico da figura 5.1.

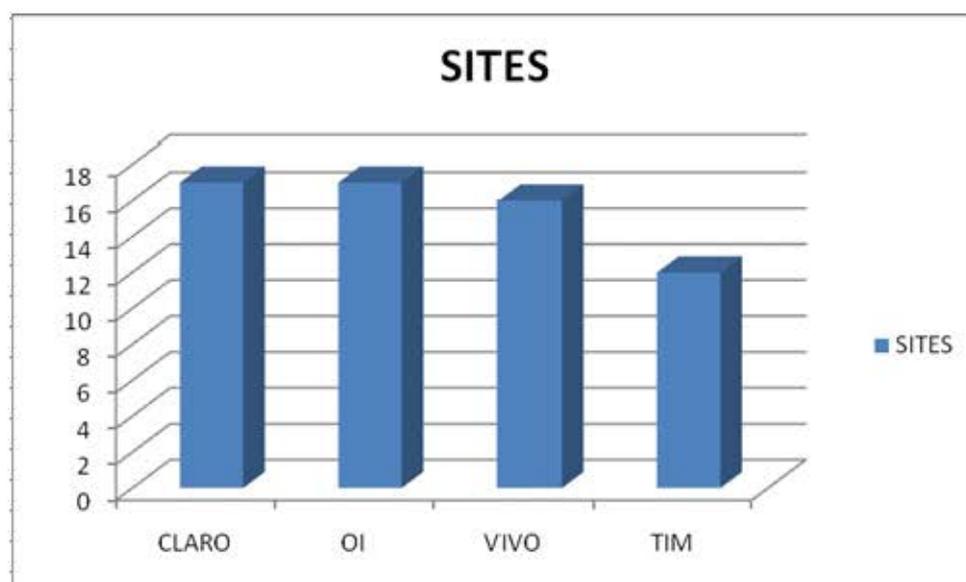


Figura 5.1: Quantidade de sites existentes, por operadora, no Centro Histórico

Alguns aspectos da legislação municipal podem afetar o desempenho técnico da ERB e de toda a planta de telefonia móvel das operadoras de Porto Alegre. Descreveremos a seguir algumas restrições e obrigações técnicas previstas em lei.

A limitação da soma de potências das ERBs que ocupam a mesma infra-estrutura restringe o posicionamento e altura das antenas e da estrutura vertical, visto que as mesmas devem manter um afastamento das áreas de circulação de pessoas para que a densidade de potência a quais elas estão submetidas se mantenha abaixo do nível estabelecido em lei.

Além disso, tal limitação inibe o compartilhamento de sites, visto que a observação do limite de potência se refere à soma de todas as ERBs do site e, em determinados casos, pode haver dificuldade de atendimento da lei com a inclusão de nova ERB ao site.

Outro aspecto a ser considerado é que a redução da potência da ERB acarreta a redução da área de cobertura proporcionada pela mesma, sendo necessária uma quantidade maior de ERBs para restabelecer o nível de sinal de cobertura celular de uma região pela imposição de limite de potência em uma ERB.

O afastamento em pelo menos 5 metros do eixo da torre com o limite do terreno restringe os locais de implantações de torres, visto que obriga a locação de terreno com pelo menos 10 metros de comprimento de frente.

O aumento na demanda dos serviços de dados exige um elevado nível de intensidade de sinal para uma boa taxa de transferência de dados. Isto reduz o raio médio de cobertura da célula, acarretando o aumento na quantidade de ERBs. A limitação de potência pode restringir o desempenho dos serviços móveis, bem como o distanciamento mínimo de 500 metros entre torres que possuem ERBs restringe a ampliação na quantidade de ERBs, de acordo com a lei.

O posicionamento das antenas no centro geométrico da laje superior, quando a área da laje for suficientemente grande para obstruir parcialmente o sinal transmitido pela ERB, pode reduzir a área de cobertura. O deslocamento da antena para o perímetro da laje superior melhora a propagação de sinal pela ausência de obstrução frontal próximo à antena.

Como proposta de estudo para trabalhos futuros, recomenda-se:

- No detalhamento do perfil do usuário a inclusão de um número maior de serviços, tais como aplicações *peer-to-peer*;
- Incluir a configuração da ERB para cada site, com a lista de material especificando os equipamentos, a configuração do site, a configuração do sistema irradiante com as informações da quantidade e modelo de antenas, *azimuth*, *downtilt*, etc.;
- Levantamento do orçamento da rede com o custo estimado para a sua implantação;
- Comparativo de custos de site utilizando antenas MIMO e antenas SISO;
- Impacto do aumento do número de antenas na capacidade da estrutura vertical em suportar o aumento da área de exposição ao vento (AEV);
- Comparativo de custos de site utilizando torre ou topo de prédios para a implantação de site;
- Implantação da rede considerando um sistema de hierarquia com células macro e micro células.

## 6 REFERÊNCIAS

3G AMERICAS. **HSPA to LTE-Advanced: 3GPP Broadband Evolution to IMT Advanced (4G)**. September, 2009.

3G AMERICAS. **MIMO and Smart Antennas for 3G and 4G Wireless Systems**. May, 2010.

3G AMERICAS. **Release 9, Release 10 and Beyond: HSPA+, LTE/SAE and LTE-Advanced**. February, 2010.

3GLTEINFO. **Introduction to LTE**. Disponível em

<<http://www.3glteinfo.com/introduction-to-lte>> Acesso em: out. 2010.

3GPP. **ETSI TR 136.942 V9.0.1 LTE E-UTRA Radio Frequency (RF) system scenarios**. [S.l.], 2010.

3GPP. **ETSI TS 136.104 V9.4.0 LTE E-UTRA Base Station (BS) radio transmission and reception**. [S.l.], 2010.

3GPP. **ETSI TS 136.211 V9.1.0 LTE E-UTRA Physical channels and modulation**. [S.l.], 2010.

AGILENT. **3GPP Long Term Evolution: System Overview, Product Development, and Test Challenges**. [S.l.], 2009.

ALTHOS. **UMTS LTE Tutorial**. Disponível em

<<http://www.althos.com/tutorial/UMTS-LTE-tutorial-RF-Channel-Bandwidth.html>>

Acesso em: out. 2010.

ANATEL. **Brasil ultrapassa 191 milhões de celulares em setembro**. Disponível em

<<http://www.anatel.gov.br/Portal/exibirPortalInternet.do>> Acesso em: out. 2010.

ANATEL. **Estações Rádio Base**. Disponível em

< <http://sistemas.anatel.gov.br/stel/consultas/SMP>> Acesso em: out. 2010.

ARRAYCOMM. **An Overview of MAS Principles**. Disponível em

<<http://www.arraycomm.com/serve.php?page=principles>> Acesso em: out. 2010.

BREWER, J. ET al. **Wireless Everywhere? Not Quite Yet...** Mobile Dev & Design, [S.l.], September 2008. Disponível em

<[http://www.mobiledevdesign.com/tutorials/Wireless\\_Everywhere\\_Not\\_Quite\\_Yet](http://www.mobiledevdesign.com/tutorials/Wireless_Everywhere_Not_Quite_Yet)>

Acesso em: out. 2010.

CELTEC. **Planejamento e Projeto de Sistemas Celulares**. Campinas, 1996.

- CHEVALLIER, C. et al. **WCDMA (UMTS) Deployment Handbook**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2006.
- DAHLMAN, E. et al. **3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband**. 2<sup>nd</sup> ed. Oxford: Academic Press, 2008.
- ERGEN, M. **Mobile Broadband**. New York: Spring Science+Business Media, 2009.
- FARIAS, P. **Redes Wireless – Parte III**. Disponível em  
<<http://www.juliobattisti.com.br/tutoriais/paulocfarias/redeswireless003.asp>> Acesso em: out. 2010.
- FAZEL, K.; KAISER, S. **Multi-Carrier and Spread Spectrum Systems**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2008.
- GARG, V. **Wireless Communications and Networking**. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2007.
- GOES, A. **Redes 4G: Modelos de Propagação**. Teleco, 2008. Disponível em  
<[http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialredes4g/pagina\\_3.asp](http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialredes4g/pagina_3.asp)> Acesso em: out. 2010.
- GÓMEZ, G.; SÁNCHEZ, R. **End-to-End Quality of Service over Cellular Networks**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2005.
- GRAY, D. **A comparative Analysis of Mobile WiMAX Deployment Alternatives in the Access Network**. WiMAX Forum, [S.l.], May, 2007.
- GSACOM. **GSM/3G Stats**. Disponível em  
<<http://www.gsacom.com/news/statistics.php4>>. Acesso em: out. 2010.
- HOLMA, H.; TOSKALA, A. **LTE for UMTS**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2009.
- HORAK, R. **Websters New World Telecom Dictionary**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2008.
- HUAWEI TECHNOLOGIES. **WCDMA Radio Network Design and Planning Training**. Campinas, 2009.
- IBGE. Porto Alegre – RS. Disponível em  
<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/painel/painel.php?codmun=431490>. Acesso em: out. 2010.
- IG TECNOLOGIA. **Banda larga móvel já reúne 14 milhões de usuários no Brasil, diz estudo**. Disponível em  
<<http://tecnologia.ig.com.br/noticia/2010/08/24/banda+larga+movel+ja+reune+14+milhoes+de+usuarios+no+brasil+diz+estudo+9572468.html>>. Acesso em: set. 2010.
- KHAN, F. **LTE for 4G Mobile Broadband**. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- KREHER, R. **UMTS Performance Measurement**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2006.
- KUHN, V. **Wireless Communications over MIMO Channels**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2006.

LAIHO, J.; WACKER, A.; NOVOSAD, T. **Radio Network Planning and Optimisation for UMTS**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2006.

LEE, W. C. Y. **Wireless and Cellular Communications**. 3<sup>rd</sup> ed. New York: McGraw-Hill Companies, inc., 2006.

LESCUYER, P.; LUCIDARME, T. **Evolved Packet System**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2008.

LIN, L. **Choosing between open and closed loop MIMO in BTS systems**. [S.l.], May, 2009. Disponível em <<http://www.embedded-computing.com/choosing-open-closed-loop-mimo-bts-systems>> Acesso em: out. 2010.

MISHRA, A. R. **Advanced Cellular Network Planning and Optimisation**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2007.

NAWROCKI, M. J.; DOHLER, M. AGHVAMI, A. H. **Understanding UMTS Radio Network**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2006.

PÉREZ-ROMERO, J. et al. **Radio Resource Management Strategies in UMTS**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2005.

PORTO ALEGRE. **Os bairros pelos Censos de 1980, 1991 e 2000**. Disponível em <<http://portoalegre.rs.gov.br/spm>> Acesso em: out. 2010.

SAUTER, M. **Beyond 3G: Bringing Networks, Terminals and the Web Together**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2009.

SEZIA, S.; TOUFIK, I.; BAKER, M. **LTE – The UMTS Long Term Evolution**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2009.

TELETIME. **Anatel quer iniciar a licitação do 2,5 GHz em 2011**. Disponível em <http://www.teletime.com.br/05/08/2010/espectro-anatel-quer-iniciar-licitacao-do-2-5-ghz-em-2011/tt/193905/news.aspx>. Acesso em: out. 2010.

VIEIRA, P. **Planejamento de Redes Móveis**. 2007. 343 slides. Folhas de Apoio. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, ISEL, Lisboa. Disponível em <<http://www.deetc.isel.ipl.pt/sistemastele/PORCM>> Acesso em: out. 2010.

VIEIRA, P. **Propagação II**. 2004. 308 slides. Folhas de Apoio. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, ISEL, Lisboa. Disponível em <<http://www.deetc.isel.ipl.pt/sistemastele/Pr2>> Acesso em: out. 2010.

WANG, J. **High-Speed Wireless Communications**. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.

ZANG, Y.; CHEN, H. H. **Mobile WiMAX**. Boca Raton: Auerbach Publications, 2008.