



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

KETYLLEN DA COSTA SILVA

**ANÁLISE DE HANDOVER A PARTIR DO USO DE FEMTOCELLS
EM REDES LTE: ABORDAGEM BASEADA EM SIMULAÇÃO
DISCRETA**

DM: 12/2014

**UFPA/ITEC/PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2014**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA**

KETYLLEN DA COSTA SILVA

**ANÁLISE DE HANDOVER A PARTIR DO USO DE FEMTOCELLS
EM REDES LTE: ABORDAGEM BASEADA EM SIMULAÇÃO
DISCRETA**

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como quesito a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica, com ênfase em Computação Aplicada.

**UFPA/ITEC/PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2014**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA**

**ANÁLISE DE HANDOVER A PARTIR DO USO DE FEMTOCELLS
EM REDES LTE: ABORDAGEM BASEADA EM SIMULAÇÃO
DISCRETA**

AUTORA: KETYLLEN DA COSTA SILVA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA COM ÊNFASE EM COMPUTAÇÃO APLICADA.

APROVADA EM ____/____/____

Professor. Dr. Carlos Renato Lisboa Francês - UFPA

ORIENTADOR

Professor Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante

MEMBRO PPGEE/UFPA

Professor Dr. Diego Lisboa Cardoso - Membro Externo - FCT/UFPA

MEMBRO-EXTERNO FCT/UFPA

Visto:

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes

COORDENADOR DO PPGEE/ITEC/UFPA

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por ter concedido a mim uma vida maravilhosa e pela grande oportunidade em realizar este sonho. Obrigada por Sua força imensurável!

Aos meus pais Diana e Lobato, por serem a extensão da minha vida na terra, pelo amor e apoio incondicional, por sempre me indicarem os melhores caminhos a serem seguidos. Aos meus irmãos Kelly, Erick, Mariane e Keytson por juntamente com meus pais, me permitirem essa família de tanto amor. Eu amo vocês!

Aos meus avós paternos e maternos, por contribuírem para a minha formação como ser humano e pela graça de ter a presença de todos neste momento da minha vida.

Ao meu namorado Luis Augusto, por toda ajuda, por todas as noites de normatizações da ABNT, pelos elogios “corujas” e, principalmente pela intensidade do amor dedicado a mim.

Ao meu querido professor e orientador Carlos Renato Lisboa Francês por ter me acolhido durante minha trajetória no mestrado. Por ter apoiado e melhorado todas as ideias que tive, pela ajuda em todos os momentos, pelas oportunidades e sobretudo, pelo exemplo a ser seguido, muito obrigada.

Aos amigos queridos, Eulália, Jorge, Cindy, Priscila e Delsinho pela amizade e apoio incondicional de todos os dias compartilhados. Por serem sempre, a presença mais intensa e necessária ao longo dessa trajetória.

À todos os amigos integrantes do LPRAD (Laboratório de Redes de Alto desempenho) por cada dia de convivência e aprendizado. Em particular ao Patrick Alves, por toda a cooperação técnica, essenciais ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do PPGEE e aos demais que contribuíram com minha formação, não só com instrução técnica, mas com princípios que substancialmente se fizeram e fazem importantes para a minha formação.

Gostaria também de agradecer a pessoas que me motivaram a ingressar neste processo antes mesmo de entender a proporção dessa realização. O meu muito obrigada ao Carlos Nylander e aos professores Afonso Cardoso, Ananias Neto e Elisangela Aguiar.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

À Universidade Federal do Pará, pela oportunidade dada a mim para a realização desta dissertação.

“Se enxerguei mais longe foi porque me apoiei em ombros de gigantes.”

Isaac Newton

Sumário

Lista de Abreviaturas e Siglas.....	VIII
Lista de Figuras.....	XII
Lista de Tabelas.....	XIII
Resumo.....	XIV
Abstract.....	XV
Capítulo 1 – Introdução.....	16
1.1. Motivação.....	19
1.2. Objetivos.....	19
1.3. Organização da Dissertação.....	20
Capítulo 2 – Tecnologias de Rede sem fio.....	21
2.1. Considerações Iniciais.....	21
2.2. A evolução das Redes Móveis.....	21
2.3. LTE.....	22
2.3.1. Arquitetura LTE.....	23
2.3.2. Tecnologias de transmissão.....	26
2.3.2.1. OFDMA.....	26
2.3.2.2. SC-OFDMA.....	28
2.3.2.3. <i>Resource Blocks</i>	29
2.3.2.4. Modulação e Codificação adaptativa.....	31
2.3.2.5. MIMO.....	31
2.3.3. Características.....	33
2.3.3.1. Frequências.....	33
2.3.3.2. Flexibilidade de espectro.....	33
2.3.3.3. Capacidade e Mobilidade.....	34
2.3.4. <i>Handover</i>	34
2.3.4.1. O processo de <i>Handover</i>	36
2.4. 4G e o <i>LTE-Advanced</i>	37
2.5. <i>Femtocell</i>	39
2.5.1. Padronização.....	39
2.5.2. Principais características.....	41
2.5.3. Arquitetura da rede <i>femtocell</i>	42
2.5.4. Alocações de canais de frequência.....	43
2.5.5. Controle de acesso.....	44
2.5.6. Mobilidade.....	45
2.5.7. <i>Backhaul</i>	45
2.5.8. Interferência.....	46
2.6. Considerações Finais.....	47
Capítulo 3 – Trabalhos Relacionados.....	48
3.1. Considerações Iniciais.....	48
3.2. Desafios em <i>femtocells</i>	48
3.2.1. Técnicos.....	49
3.2.2. Não Técnicos.....	50
3.3. Considerações Finais.....	52
Capítulo 4 – Avaliações de Desempenho.....	53
4.1. Considerações Iniciais.....	53
4.2. Avaliação de Desempenho.....	53
4.3. Métricas.....	54
4.4. Aferição.....	55
4.5. O processo de Modelagem.....	56

4.7. Soluções por Modelagens Analíticas.....	57
4.8. Cadeias de Markov.....	57
4.9. Soluções de modelagem por simulação.....	59
4.10. Considerações Finais.....	60
Capítulo 5 – Uma abordagem para análise do impacto da utilização de femtocells em um cenário LTE - Estudo de Caso em simulação discreta.....	61
5.1. Considerações Iniciais.....	61
5.2. Simulação.....	61
5.3. Opnet Modeler.....	62
5.4. Metodologia de Simulação proposta.....	64
5.5. Topologia.....	67
5.6. Configurações dos Fluxos.....	68
5.7. Definição de Mobilidade.....	69
5.8. Indicadores de desempenho de <i>handover</i>	71
5.9. Análise dos Resultados.....	71
5.10. Considerações Finais.....	75
Capítulo 6 – Conclusão.....	77
6.1. Contribuições da Dissertação.....	78
6.2. Trabalhos Futuros.....	79
6.3. Dificuldades Encontradas.....	80
Referências.....	82

Lista de Abreviaturas e Siglas

3G	Terceira Geração de Telefonia Móvel
3GPP	Third Generation Partnership Project
4G	Quarta Geração de Telefonia Móvel
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AMC	Adaptative Modulation and Coding
AMPS	Advanced Mobile Phone Service
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
APIs	Application Programming Interface
BP	Blocking Probability
CDF	Função de Distribuição Cumulativa
CDMA	Code Division Multiple Access
CINR	Carrier to Interference plus Noise Ratio
CM	Cadeia de Markov
CMTC	Cadeia de Markov a Tempo Contínuo
CMTD	Cadeia de Markov a Tempo Discreto
CP	Cyclic Prefix
CQI	Channel Quality Indicator
CSFB	Circuit Switched Fallback
DE	Diagramas de Estados e Transições
DSCP	Differentiated Services Code Point
DSL	Digital Subscriber line
DVB	Digital video broadcasting
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
eNodeB	Enhanced NodeB
EPC	Evolved Packet Core
EUA	Estados Unidos da América
E-UTRAN	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access
FDD	Frequency Division Duplex
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System Mobile
GSM-FR	Global System Mobile Full Rate
GUI	Graphical User Interface

HeNB	Home Enhanced NodeB
HF	Handover Failure
HMS	Home NodeB Management System
HNB	Home NodeB
HNB-GW	Home NodeB Gateway
HO	Handover
HPI	Handover Performance Indicator
HSCSD	High Speed Circuit Switched Data
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
HSS	Home Subscriber Server
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IMT	Internet Mobile Telecommunication
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IP	Internet Protocol
IPSEC	Internet Protocol Security
ISP	Internet Service Provider
ITA	Instituto Tecnológico da Aeronáutica
ITU	International Telecommunications Union
Kbps	Kilobyte por segundo
KPI	Key Performance Indicator
LAN	Local Area Network
LAPS	Laboratório de processamento de sinais
LCT	Laboratório de Computação e telecomunicações
LEA	Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado
LPRAD	Laboratório de Redes de Alto desempenho
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution Advanced
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MME	Mobility Management Entity
MOS	Mean Opinion Score
MU-MIMO	MultiUser Multiple Input Multiple Output
NeNB	Neighboring <i>eNodeB</i>

OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PAPR	Peak to Average Power Ratio
PCC	Política e Controle de Carga
PCRF	Policy and Charging Rule Function
PCU	Pocket Control Unit
PDA	Personal Data Assistant
PDP	Packet Data Protocol
P-GW	Packet Data Network Gateway
PNAD	Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílio
POSIX	Portable operating system interface
PRB	Physical Resource Blocks
PSK	Phase Shift Keying
QAM	Quadrature amplitude modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature phase shift keying
RF	Radiofrequência
RF	Rede de Filas
RNC	Radio Network Controller
RP	Rede de Petri
RSRP	Reference Signal Received Power
SAE	System Architecture Evolution
SC	Statecharts
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SEGW	Security Gateway
SENB	Serving <i>eNodeB</i>
SFBC	Space Frequency Block Coded
S-GW	Serving Gateway
SIM	Simulação
SME	Serviço Móvel Especializado
SMP	Serviço Móvel Pessoal
SMS	Short Message Service
SU-MIMO	Single User Multiple Input Multiple Output
TACS	Total Access Communication System

TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TF	Teoria de Filas
TTT	Time To Trigger
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UTRAN	Universal Terrestrial Radio Access Network
VOIP	Voice over Internet Protocol
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WIFI	Wireless Fidelity
WIMAX	World wide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network

Lista de Figuras

Figura 1.1. Tendência de crescimento do tráfego mundial de dados móveis.....	17
Figura 2.1. Arquitetura LTE.....	24
Figura 2.2. OFDM com múltiplas subportadoras ortogonais.....	27
Figura 2.3. Subportadoras sendo moduladas independentemente.....	27
Figura 2.4. Comparação entre OFDM e OFDMA.....	28
Figura 2.5. Relação entre a potência média e a de pico.....	28
Figura 2.6. Comparação entre o OFDMA e SC-FDMA.....	29
Figura 2.7. Grade de tempo e frequência.....	29
Figura 2.8. <i>Physical Resource Blocks</i> do LTE.....	30
Figura 2.9. MIMO utilizando a configuração 2x3.....	32
Figura 2.10. Multiplexação Espacial.....	33
Figura 2.11. Etapas do <i>handover</i>	37
Figura 2.12. Relação entre coberturas de células de redes móveis.....	40
Figura 2.13. Arquitetura E-UTRAN com implantação de HeNB-GW.....	41
Figura 2.14. Esquema básico da rede <i>femtocell</i>	42
Figura 2.15. Modos de acesso em redes <i>femtocell</i>	44
Figura 2.16. Tipos de interferência.....	46
Figura 4.1. Técnicas de Avaliação de desempenho.....	54
Figura 4.2. Etapas do Processo de Modelagem.....	56
Figura 5.1. Fluxograma da metodologia proposta.....	64
Figura 5.2. Estimativa de Cobertura.....	65
Figura 5.3. Célula sem <i>femtocell</i>	66
Figura 5.4. Célula LTE com <i>femtocell</i>	67
Figura 5.5. Topologia da Simulação.....	67
Figura 5.6. Cenário modelado no simulador OPNET.....	70
Figura 5.7. <i>Associated eNodeB</i> e <i>handover delay</i>	72
Figura 5.8. Atraso da aplicação VoIP.....	73
Figura 5.9. MOS da aplicação VoIP.....	74
Figura 5.10. <i>Jitter</i> da aplicação VoIP.....	75

Lista de Tabelas

Tabela 2.1. Características das principais tecnologias celular.....	22
Tabela 2.2. Alguns parâmetros OFDMA utilizados na transmissão downlink.....	31
Tabela 5.1. Configurações das <i>eNodeB</i> LTE.....	68
Tabela 5.2. Configurações dos Usuários.....	68
Tabela 5.3. Parâmetros da Aplicação VoIP.....	69
Tabela 5.4. Configurações das <i>Femtocells</i>	69
Tabela 5.5. Indicadores de Desempenho de <i>Handover</i>	73
Tabela 5.6. Escala para Avaliação Subjetiva de Qualidade de Voz.....	74

Resumo

O volume de tráfego de dados em redes celulares está crescendo exponencialmente. A explosão do uso de dispositivos e aplicações móveis nos últimos anos, tem levado a uma sobrecarga da infraestrutura da rede responsável pelo escoamento desse tráfego, afetando tanto o desempenho da rede quanto a experiência do usuário. Um dos elementos-chave nas redes LTE (*Long Term Evolution*) é a possibilidade de implantação de múltiplas *femtocells* para a melhoria de cobertura e taxa de dados. No entanto, as sobreposições arbitrárias na cobertura dessas células tornam a gestão do mecanismo de *handover* complexo e desafiador. Nesse sentido, esta dissertação propõe uma metodologia para o estudo do impacto do *handover* em redes LTE com *femtocells*. A partir de uma abordagem de simulação discreta, os efeitos da implantação de *femtocells* foram avaliados. Objetivou-se com isso, mensurar os impactos e a correlação do uso de *femtocell* nos parâmetros de QoS (*Quality of Service*) e indicadores de desempenho de *handover*.

Palavras - Chaves: LTE, Handover, Femtocell, Metodologia, Simulação.

Abstract

The volume of data traffic in mobile networks is growing exponentially. The explosion of mobile devices and applications in recent years has led to an overload of the network infrastructure responsible for disposing of this traffic, thus affecting the performance of the network as the user experience. One of the key elements in the networks (LTE) Long Term Evolution is the possibility of deploying multiple femtocells for the improvement of coverage and data rate. However, arbitrary overlapping coverage of these cells makes the handover mechanism complex and challenging. Thus, this dissertation proposes a methodology to study the impact of handover in LTE networks with femtocells. From a discrete simulation approach, the effects of the deployment of femtocells were evaluated. This study aimed to measure the impact and correlation of the use of femtocell parameters of QoS (Quality of Service) and performance indicators handover.

Keywords: LTE, Handover, Femtocell, Methodology, Simulation.

Capítulo 1 – Introdução

Ao longo dos últimos anos, a Internet e as comunicações móveis vem convergindo para a definição de um novo paradigma: a Internet Móvel. A possibilidade de acessar informação e serviços a qualquer momento e em qualquer lugar vem moldando novos perfis de usuários e novas demandas de aplicações.

Neste contexto, o celular é o dispositivo móvel mais acessível a todas as classes sociais, tornando-se uma ferramenta com grande abrangência. Dados divulgados pela ANATEL (Agencia Nacional de Telecomunicações) indicam que o Brasil terminou o mês de março de 2014 com 273,58 milhões de linhas ativas na telefonia móvel, constituindo uma teledensidade de 135,30 acessos por 100 habitantes, ou seja, existem atualmente mais linhas ativas que habitantes no país [ANATEL, 2014].

Com a popularização das tecnologias da 3^a e 4^a gerações, os sistemas de comunicações móveis recebem adição de novos serviços e funcionalidades, que implicam também problemas críticos, tais como: interferência, cobertura limitada e restrições no uso de aplicações *triple play*.

A crescente utilização de aplicações baseadas na mobilidade e em grandes transferências de dados leva, por sua vez, à crescente procura por serviços de dados móveis. A Figura 1.1 permite visualizar uma previsão de crescimento do tráfego de dados móveis nos próximos anos.

Ao analisar a tendência demonstrada na Figura 1.1, percebe-se que foi estimado um crescimento da ordem de 15,9 exabytes para o ano de 2018, ou seja, um aumento de 11 vezes mais em comparação ao ano de 2013. Uma taxa anual média de 61% de crescimento. Hoje, pode-se dizer que o mundo das comunicações, pelo menos para os usuários finais, como clientes domésticos, pequenas empresas e escritórios, é sem fio.

Mesmo que grande parte das conexões à internet ainda utilizem soluções cabeadas, praticamente toda rede possui um ponto de acesso sem fio, e o número de acessos de dados em redes celulares vem evoluindo constantemente.

Exabyte por mês

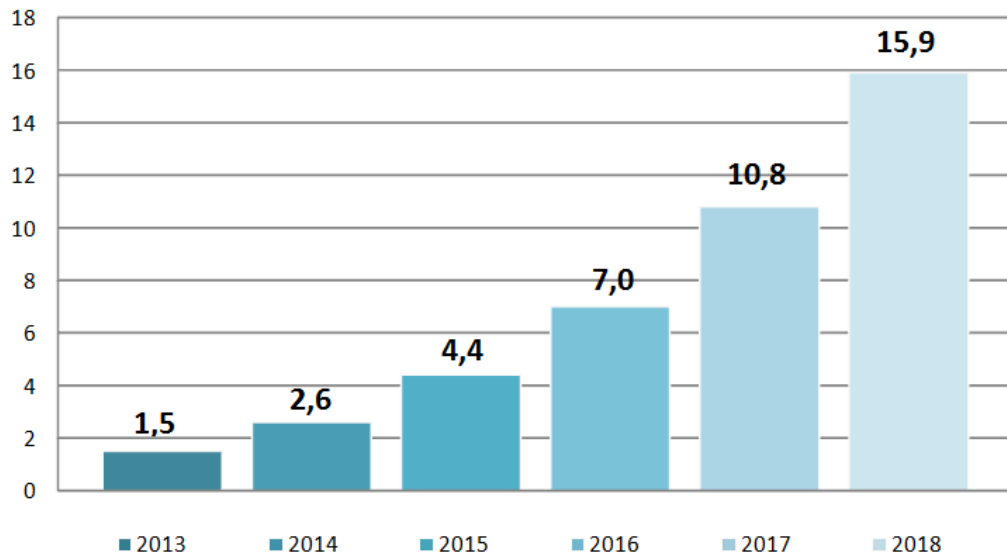


Figura. 1.1. Tendência de crescimento do tráfego mundial de dados móveis, adaptada de [CISCO, 2014]

O entendimento de tecnologias sem fio de 3ª e 4ª geração é importante devido ao planejamento de escalabilidade dos serviços, levando em conta sobretudo, a qualidade do serviço prestados e os requisitos mínimos que a aplicação necessita na rede [MARGALHO et al., 2007].

Hoje em dia, as redes móveis estão sendo utilizadas como uma saída para prover serviços de banda larga em locais que ainda não são atendidos pelas redes fixas, principalmente em países subdesenvolvidos como o Brasil. Dentre as tecnologias empregadas atualmente no Brasil, o GSM (*Global System for Mobile*) e o UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) não são tecnologias desenvolvidas para absorver a grande demanda que vem sendo observada no mercado de banda larga móvel.

Devido a essa demanda inesperada, acredita-se que o LTE, possui tecnologia desenvolvida com o objetivo de atender não somente as chamadas de voz, mas principalmente as conexões banda larga, e que apresente condições de suportar com maior eficiência esta crescente necessidade.

O sistema LTE adota a tendência para redes móveis de basear-se no padrão IP (*Internet Protocol*), o principal protocolo da Internet. Com isso, o tráfego de voz será suportado principalmente através da tecnologia VoIP (*Voice over Internet Protocol*), possibilitando melhores integrações com serviços de multimídia. A tecnologia LTE já se coloca em meio à transição do uso da comutação de circuito para a comutação de pacotes no tráfego de voz [UMTS FORUM, 2009] nas redes móveis.

Os serviços multimídia vêm se tornando cada vez mais populares. Esses serviços geram tráfegos intensos na rede, que demandam por altas taxas de transmissão e são sensíveis ao atraso, variação de atraso e perdas de pacotes. Em ambientes *indoor*, a qualidade do canal entre a estação base celular e o nó móvel podem ser prejudicados por paredes e obstáculos. Assim, a comunicação sem fio para ambientes internos requer mais recursos sem fio, incluindo tempo, largura de banda, potência de transmissão, para que se possa garantir a qualidade do serviço exigida pelos clientes. Existe uma grande demanda por um melhor nível de sinal em ambientes *indoor*, pois mais de 60% do tráfego de voz e 90% do tráfego de dados são gerados em nesses ambientes [MANSFIELD, 2008].

Dessa forma, faz-se necessário investigar exaustivamente tecnologias de acesso que garantam níveis satisfatórios de qualidade de serviço, levando-se em consideração à crescente demanda por serviços de dados. Nesse sentido, o uso de *femtocell*¹ é um dos principais tópicos relacionados à implantação de novas infraestruturas com relação custo/benefício favorável [CALIN et al., 2010].

Essa crescente demanda por multimídia sem fio *indoor* e as tendências em curso de convergência móvel, estão pavimentando o caminho para a implantação de toda a indústria de *femtocells*. Essas *femtocells* podem ser de acesso aberto ou acesso fechado. Acesso aberto permite que qualquer usuário arbitrário use a *femtocell*, já no acesso fechado restringe-se aos usuários previamente cadastrados e dentro da região de alcance da *femtocell* [XIA et al., 2010].

Embora o objetivo final da *femtocell* seja melhorar a eficiência, cobertura e serviços a um custo reduzido de operação, a possibilidade de *handovers* arbitrários entre uma *eNodeB* (Enhanced NodeB) e uma HeNB (Home *eNodeB*), levanta novos desafios significativos [ROY et al., 2012]. A mobilidade entre *eNodeB* e HeNB será fator fundamental, pois a falta de controle e gerência na instalação da HeNB, irão garantir um número cada vez maior de *handover* desnecessários, os quais causam forte degradação no desempenho da rede [ZHANG et al., 2011].

A integração de *femtocells* em uma rede LTE parece ser uma abordagem promissora devido à suas características complementares. No entanto, para que um dispositivo móvel forneça comunicação transparente sob mudança de recursos de rádio, torna-se necessária à capacidade de *handover* na rede. O *handover* é o processo que caracteriza uma rede celular e garante a ela sua característica de mobilidade.

¹ Femtocell: o termo foi originalmente usado para descrever produtos apenas residenciais, sendo picocell para empresas e o termo microcell para espaços públicos. Atualmente o termo smallcell permite englobar todos esses aspectos [LETOURNEUX et al., 2013],[ANDREWS et al., 2012]. Nesta dissertação o termo femtocell, portanto, assume mesmo sentido de smallcell.

Acontece que a utilização de pequenas células não têm apenas pontos positivos. Apesar da simplicidade conceitual das *femtocells*, nota-se que há ainda pontos cruciais em questionamento para se tornarem uma realidade, dentre os quais destacam-se: interferência, gerência de *handover*, segurança, escalabilidade, controle de acesso, entre outras [TELECO, 2009].

1.1. Motivação

Atualmente, um dos grandes desafios em redes móveis, recai sobre a necessidade de oferecer a melhor experiência possível em uma infinidade de aparelhos que se proliferam tão rapidamente. As *femtocells* são dispositivos instalados pelos próprios usuários, sendo assim, as operadora não tem controle de onde o usuário irá instalar a *femtocell*, nem quantas vão ser instaladas em uma determinada área. Diante disso, é necessário avaliar o impacto do crescimento do número de *femtocells*, tanto nos usuários, quanto na *macrocell*, sobretudo no que diz respeito a *handover*.

Assim, um usuário pode ter acesso aos serviços e informações em qualquer lugar e a qualquer momento sem a necessidade de estar conectado fisicamente a uma rede. Porém, um grande desafio que envolve a mobilidade oferecida aos usuários, é o *handover* ou *handoff*.

Nesse cenário, torna-se importante analisar as propostas em desenvolvimento, como a tecnologia LTE que vem sendo considerada como o padrão para a 4ª geração das redes de telefonia móvel, com o projeto LTE-Advanced. Sobretudo fomentar a discussão sobre a integração de *femtocell* em redes LTE como solução para problemas de cobertura e capacidade em ambientes *indoor*.

1.2. Objetivos

Nesta dissertação, uma metodologia para avaliação dos impactos da utilização de *femtocells* em um cenário LTE é proposta. Essa metodologia comporta não só a avaliação do estudo de caso aqui apresentado, mas também contribui para diversos outros problemas que possam ser modelados e resolvidos por simulação.

A partir disso, o estudo de caso proposto realiza uma análise do procedimento de *handover* a partir do uso de *femtocells* em redes LTE. A avaliação traz sobretudo uma correlação entre os indicadores de *handover* e de QoS, possibilitando também um estudo quanto a efetividade, impactos, ganhos e desvantagens que essa combinação de tecnologias oferece.

Para o estudo, várias métricas de desempenho que são relacionados à implantação de redes *femtocell* de acesso aberto, são apresentadas por intermédio de simulações. Para tanto,

realiza-se uma adaptação no módulo LTE no simulador OPNET Modeler, de tal forma que as características de uma *femtocell* possam ser representadas.

A partir do levantamento do estado da arte descrito nos próximos capítulos, observa-se que a integração dessas tecnologias é temática recorrente na comunidade acadêmico-científica. *Femtocells* ganharam muita atenção recentemente devido a suas vantagens em termos de economia de custos na infraestrutura e melhoria da experiência em ambientes *indoor*. No entanto, há grandes divergências quanto à plena eficácia de sua utilização.

Diante de tal paradoxo, são discutidas possíveis limitações dessa relação. Será a integração de LTE com *femtocell* uma panacéia? Apesar de estimativas promissoras essa alternativa está repleta de incertezas. Os resultados obtidos para cenários específicos mostram que a utilização de *femtocell* degrada os indicadores de *handover*, impactando negativamente nos indicadores de QoS. A intenção não se alicerça em esgotar o assunto ou apresentar resultados definitivos para o tema, mas sim apresentar contrapontos importantes, qualificando e contribuindo para o aprimoramento da discussão acerca do tema.

1.3. Organização da Dissertação

Este documento está dividido como segue:

- Capítulo 2: Neste capítulo são introduzidos os conceitos, as tecnologias e apresentação do estado da arte necessários para a compreensão do estudo realizado. O capítulo inicia com um breve histórico da evolução das redes móveis, onde destacam-se as características das redes LTE e os principais conceitos que norteiam *femtocells*.
- Capítulo 3: Apresentam-se os trabalhos relacionados ao estudo de caso desta dissertação, abordando-se principalmente os desafios técnicos associados à utilização de *femtocells*.
- Capítulo 4: Apresentam-se as técnicas de modelagem para avaliação de desempenho, explicando de forma mais detalhada, as etapas e principais técnicas de especificação e solução do modelo.
- Capítulo 5: Este capítulo expõe a metodologia proposta e o estudo de caso realizado, detalhando o ambiente de simulação, no qual demonstram-se os parâmetros e configurações utilizados, assim como os resultados obtidos.
- Capítulo 6: Neste capítulo, demonstram-se as considerações finais sobre os temas abordados na proposta do trabalho, apontando as dificuldades encontradas e os possíveis desdobramentos em trabalhos futuros.

Capítulo 2 – Tecnologias de redes sem fio

2.1. Considerações Iniciais

Neste capítulo faz-se uma descrição das tecnologias que serão estudadas ao longo do trabalho. Inicia-se com uma breve descrição da evolução das redes móveis. Em seguida aborda-se o sistema de comunicações móveis LTE, assinalando suas principais características e as alterações dos elementos que compõem esta nova rede. Por fim apresenta-se a arquitetura e os principais conceitos de *femtocells*.

2.2. A Evolução das Redes Móveis

As primeiras gerações de tecnologia móvel transmitiam somente a voz, sendo as principais a TACS (*Total Access Communication System*) na Europa e AMPS (*Advanced Mobile Phone Service*) nos EUA. A segunda geração foi dividida em duas tecnologias CDMA (*Code Division Multiple Access*) nos EUA e GSM na Europa. O CDMA utilizava a tecnologia de espalhamento espectral e multiplexação por divisão de código e foi criada inicialmente para voz e permitia a transmissão de dados a baixas velocidades. O GSM utilizava comutação por circuito com TDM (*Time Division Multiple Access*) para transmissão de voz e o HSCSD (*High-Speed Circuit-Switched Data*) para transmissão de SMS [KOROWAJCZUK, 2011].

O Primeiro padrão a considerar transmissão de pacotes foi o GPRS (*General Packet Radio Service*), implantado em 2001 com taxas teóricas de 57 a 114 kbps, sendo 14.4 a 28.8 kbps valores mais realísticos. Ele foi seguido pelo EDGE (*Enhanced Data Rates for GSM Evolution*) em 2002 com taxas teóricas de 384 kbps, sendo 56 kbps um valor mais real. Ambas as tecnologias ainda trabalhavam em canais desenvolvidos para transmissão de voz. A partir disso, ficou claro que era necessário um novo padrão que pudesse prover canais apropriados para transmissão de dados.

Então, surgiu a 3ª Geração para atender essa demanda. Nessa nova geração, o GSM mudou sua tecnologia para CDMA utilizando a tecnologia de transmissão WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) e utiliza o padrão UMTS [KOROWAJCZUK, 2011]. Inicialmente, o UMTS foi definido para voz, porém tinha potencial para adicionar canais otimizados para dados. Diante disso surgiu o HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) para tráfego de *downlink* e o HSUPA para tráfego de *uplink*. Ambas as tecnologias foram consolidadas no HSPA (*High Speed Packet Data*) e HSPA+ (*Release 7*).

Em dezembro de 2008, o 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), anunciou o que seria a 4ª Geração de redes móveis chamada LTE que utilizaria a tecnologia OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) para transmissão, a mesma utilizada em alguns padrões 802.11 e WiMAX. Em testes de laboratório, uma rede experimental de LTE, com 20 MHz de espectro, alcançou, aproximadamente, 300 Mbps de *download* e 75 Mbps de *upload*. Entretanto, a velocidade real de navegação beira aos 100 Mbps de *download* e 50 Mbps de *upload*. A Tabela 2.1 resume todas as tecnologias com suas respectivas características de transmissão.

Tabela 2.1 – Características das principais tecnologias celular, adaptado de [ALI-YAHIYA, 2011]

Geração	2G			3G				4G
Tecnologia	GSM	GPRS	EDGE	WCDMA	HSPA	HSPA+	LTE (Rel. 8)	LTE- <i>Advanced</i>
Vazão teórica (downlink)	14,4 kbps	114 kbps	384 kbps	2 Mbps	7,2/14,4 Mbps	21/42 Mbps	100 Mbps	1 Gbps
Vazão teórica (uplink)	-	-	473,6 kbps	474 kbps	5,76 Mbps	7,2/11,5 Mbps	50 Mbps	0,5 Gbps
Tamanho do canal (MHz)	0,2	0,2	0,2	5	5	5	20	100
Latência (ms)	500	500	300	250	~ 70	~ 30	~ 10	< 5

2.3. LTE

Alguns serviços que há poucos anos eram praticamente inacessíveis à maioria da população e de empresas, hoje são considerados essenciais e se tornaram amplamente difundidos. Serviços como videoconferência, download de vídeos, jogos interativos e Voz sobre IP, que já são considerados por muitos como necessários, devem aumentar cada vez mais a demanda por largura de banda. É com foco neste cenário que o grupo que padroniza o desenvolvimento dos sistemas celulares, o 3GPP vem trabalhando para desenvolver padrões que atendam às necessidades das pessoas [ALI-YAHIYA, 2011].

Buscando-se soluções para tornar a transmissão de dados mais eficiente, ao mesmo tempo em que o volume desse tráfego encontra-se em ascensão, o padrão LTE foi proposto como o próximo passo rumo ao sistema móvel de 4G, precedido pelas redes 2G e 3G. Seu desenvolvimento visa fornecer melhorias de desempenho, além de reduzir o custo por bit, o

que possibilita uma maior disseminação de serviços móveis. Sua padronização está a cargo do 3GPP [AZIZ; SIGLE, 2009].

A constante necessidade de serviços móveis de maior qualidade impulsiona o desenvolvimento de tecnologias com objetivos cada vez mais centrados nas necessidades dos usuários. De forma a cumprir este objetivo, o LTE surge como a tecnologia para redes móveis mais recente. Nesta seção, serão descritas as principais características do sistema de comunicações móveis LTE [KOROWAJCZUK, 2011].

Os principais objetivos especificados para tecnologia LTE são [KOROWAJCZUK, 2011]:

- Coexistência com os padrões legados (2G e 3G) enquanto evolui para uma rede totalmente IP.
- Largura de banda variando de 1,4 a 20 MHz.
- Eficiência espectral três ou quatro vezes melhor que o HSPA (Rel. 6).
- Latência menor que 10 milissegundos para pacotes pequenos (ex.: voz).
- Alta mobilidade (até 120 km/h).
- Raio de cobertura de 5, 30 e 100 km.
- *Downlink* baseado no OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*).
- *Uplink* baseado no SC-FDMA (*Single Carrier - Frequency Division Multiple Access*).
- Suportar os modos FDD e TDD para multiplexação.
- Arquitetura simplificada e gerenciamento de mobilidade.

O padrão LTE foi proposto como o próximo passo rumo ao sistema móvel de 4ª Geração (4G). Porém o padrão LTE possui vários *Releases*, onde o *Release 8* é a versão comercial utilizada atualmente, sendo o *Release 10*, também chamado *LTE-Advanced* (LTE-A), considerado o verdadeiro 4G com taxas de 1 Gbps no *downlink* e 100 Mbps no *uplink*.

2.3.1. Arquitetura LTE

A arquitetura LTE é uma evolução da arquitetura utilizada no UMTS, porém no LTE a arquitetura é totalmente baseada no padrão IP, o protocolo principal da Internet. Com isso,

o tráfego de voz será suportado principalmente através da tecnologia VoIP, possibilitando melhores integrações com serviços de multimídia. Atualmente, o LTE ainda não é utilizado para ligações telefônicas, quando o usuário realiza uma ligação a mesma é realizada sobre uma tecnologia 3G (UMTS) através do CSFB (*Circuit Switched Fallback*), sendo o LTE utilizado somente para tráfego de dados [VARGAS et al, 2013]. A migração para o padrão IP também permite a integração com outras tecnologias de comunicação baseadas no protocolo IP, como WiMAX e WLAN, por exemplo.

O objetivo principal da arquitetura é ser o mais simplificada possível de modo a diminuir a quantidade de equipamentos que possam apresentar falhas e também o custo associado à implementação. De acordo com [HOLMA; TOSKALA, 2009] e [3GPP, 2010c], a arquitetura LTE está dividida em quatro principais domínios de alto nível: UE (*user equipment*), E-UTRAN (*Evolved UMTS Terrestrial Radio Access*), EPC (*Evolved Packet Core*) e *Services*.

No LTE tem-se uma nova arquitetura, totalmente diferente do que vinha sendo utilizado nas tecnologias anteriores, e um exemplo disto é a estação rádio base, denominada de *eNodeB*, que no LTE passa a realizar tarefas de processamento antes realizadas na RNC (*Radio Network Controller*). As *Enhanced NodeB* do LTE são denominadas desta forma (*eNodeB* ou eNB), para se diferenciar da nomenclatura utilizada no UMTS (NodeB). A figura 2.1 mostra os principais componentes de uma rede LTE (*Core e Acesso*).

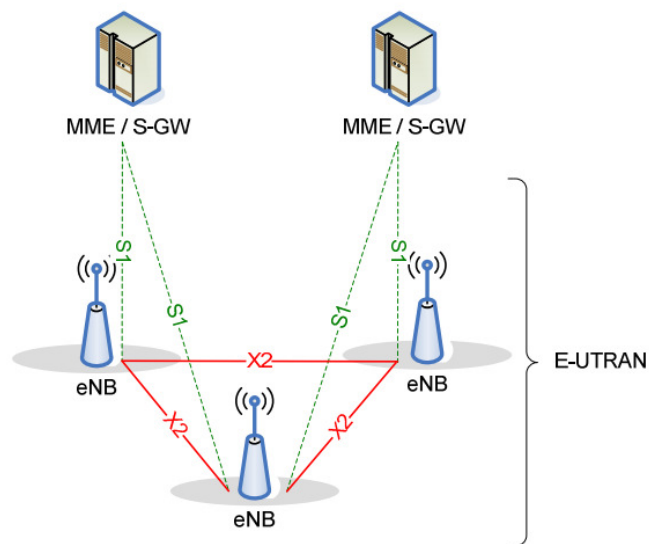


Figura 2.1. Arquitetura LTE [3GPP, 2010a]

No LTE a rede é menos complexa do que no UMTS. Por exemplo, não existe no LTE a topologia da RNC existente no UMTS, onde parte de suas funcionalidades foram

transferidas para a *eNodeB* e parte para o *Core Network Gateway*. No LTE também não teremos a central controlando os elementos na rede de acesso. A *eNodeB* irá realizar o controle de tráfego na interface área assegurando QoS para os serviços oferecidos.

A arquitetura chamada de EPS (*Evolved Packet System*) é dividida em rede núcleo (*core network*) e rede de acesso (*access network*). A rede núcleo é conhecida como SAE (*System Architecture Evolution*) e é baseada no EPC. A rede de acesso implementa o padrão de acesso à rádio E-UTRAN que é baseado no LTE. Os termos SAE e LTE têm sido substituídos por EPC e E-UTRAN, respectivamente. O termo LTE tem sido usado como nome comercial do EPS. Esta arquitetura permite uma drástica redução de custos referentes a operação e aquisição de equipamentos, uma vez que o E-UTRAN pode ser compartilhado por várias operadoras enquanto no EPC cada uma possui equipamentos próprios e define a sua própria topologia [KOROWAJCZUK, 2011].

O UE é o dispositivo que o usuário utiliza para comunicação, com um smartphone ou modem 4G. A E-UTRAN consiste no novo padrão que substitui a interface de acesso por rádio das tecnologias UMTS, HSPA e HSPA+, provendo maiores taxas de *downlink* e *uplink*, menor latência, além de ser otimizada para trabalhar com pacotes. É composta de *eNodeB* que agregam todas as funções antes exercidas pela *NodeBs* e RNCs na antiga UTRAN, ou seja, realizam funções de gerenciamento de recursos, controle de admissão, escalonamento, compressão de cabeçalho, criptografia, negociação de QoS no *uplink* e *broadcasts* contendo informações da célula. Além disso, as *eNodeB* podem comunicar-se diretamente através da interface X2, além de se comunicarem com o EPC através da interface S1 [KOROWAJCZUK, 2011][TELECO, 2012].

O SAE é a arquitetura do núcleo da rede definida pelo 3GPP para o LTE. O SAE é a evolução do núcleo da rede GPRS, com algumas diferenças: arquitetura simplificada, conceito de redes *All-IP*, suporte a redes de acesso de altas taxas de velocidade e baixa latência, suporte a mobilidade entre redes de acesso heterogêneas, como E-UTRAN e LTE-*Advanced*, redes de acesso legadas, como GERAN e UTRAN, bem como redes não-3GPP, como WiMAX e cdma2000, por exemplo [KOROWAJCZUK, 2011][OLSSON et al, 2010].

O principal subsistema do SAE é o EPC. No EPC estão contidos os principais elementos da rede. As funções desempenhadas por cada elemento são descritas abaixo:

- **MME (*Mobility Management Entity*)**: é o elemento de controle principal no EPC. Entre as suas funções estão autenticação, segurança, gerenciamento de

mobilidade, gerenciamento de perfil do usuário, conexão e autorização de serviços.

- **S-GW (*Serving Gateway*)** : faz o roteamento dos pacotes de dados dos usuários entre a rede LTE e outras tecnologias como o 2G e 3G utilizando a interface S4. Gerencia e armazena informações do UE como parâmetros de serviços IP suportados e informações sobre o roteamento interno dos pacotes na rede [KOROWAJCZUK, 2011].
- **P-GW (*PDN Gateway*)**: é o roteador de borda entre o EPS e redes de pacotes externas. Realiza a alocação endereços IP para o UE, filtragem de pacotes e auxilia o PCRF na aplicação de políticas de QoS [KOROWAJCZUK, 2011].
- **PCRF (*Policy and Charging Rule Function*)**: se refere ao elemento de rede LTE que é responsável pelo PCC – Política e Controle de Carga. O PCRF decide quando e como se deve gerenciar os serviços em termos de QoS e dá informações a respeito para o P-GW e se é aplicável para o S-GW. Desta forma, provê o QoS adequado para que os serviços solicitados possam utilizar os recursos apropriados.
- **HSS (*Home Subscriber Server*)**: se refere ao elemento LTE que é o banco de dados de registro do usuário.

2.3.2. Tecnologias de Transmissão

Para acessos múltiplos na camada física o LTE usa o OFDMA para *downlink* enquanto que para o *uplink* é utilizado o DFT-S-OFDMA, também conhecido como SC-FDMA.

2.3.2.1. OFDMA

O OFDMA é uma extensão da tecnologia OFDM [KOROWAJCZUK, 2011], que além de se utilizar de múltiplas subportadoras ortogonais, permite a comunicação com múltiplos usuários simultaneamente. Na técnica OFDM, os dados são transmitidos através de um grande número de canais ortogonais (subportadoras) usadas em uma transmissão em paralelo (Figura 2.2), com os dados de cada subportadora sendo modulados independentemente (Figura 2.3) de acordo com o nível de sinal da mesma. Dentre as as

vantagens do OFDM tem-se alta eficiência espectral, filtragem de ruído simples, imunidade contra multi-percursos, entre outras.

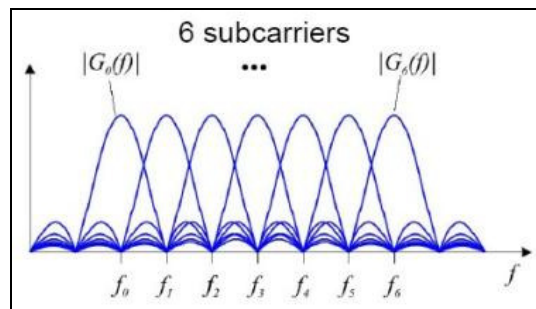


Figura 2.2. OFDM com múltiplas subportadoras ortogonais [ROHDE & SCHWARZ, 2009]

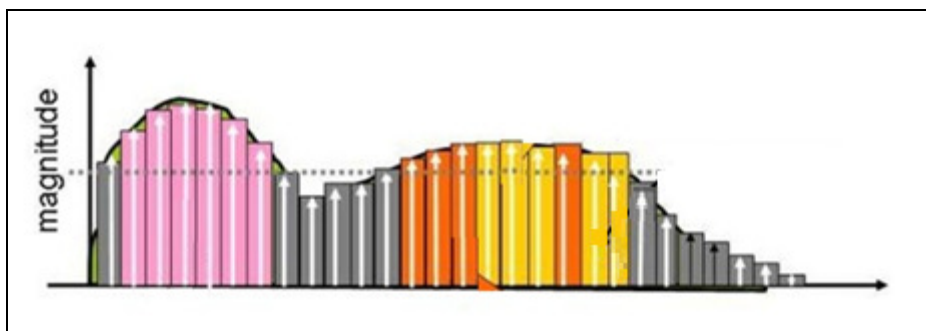


Figura 2.3. Subportadoras sendo moduladas independentemente [ROHDE & SCHWARZ, 2009]

No OFDM, os usuários são alocados somente no domínio do tempo, então cada usuário transmite em um tempo t , da mesma forma que no TDM. No OFDMA os usuários são alocados tanto no tempo quanto na frequência, conforme visto na Figura 2.4. Com isso, têm-se uma enorme flexibilidade de alocação de banda para usuários, permitindo um melhor provimento de QoS. No OFDM, no intervalo de transmissão de cada símbolo é introduzido um Prefixo Cíclico (CP - *Cyclic Prefix*). Um CP corresponde a uma cópia do final do símbolo anterior. O CP funciona como um tempo de guarda entre cada símbolo de modo a compensar o atraso da propagação do canal, diminuindo a interferência inter-simbólica.

O valor do prefixo cíclico depende do ambiente onde a *eNodeB* é instalada, em ambientes urbanos é utilizado o CP curto (4,7 μ s) e em ambientes rurais é utilizado o CP longo (16,7 μ s)[SESIA; TOUFIK; BAKER, 2009].

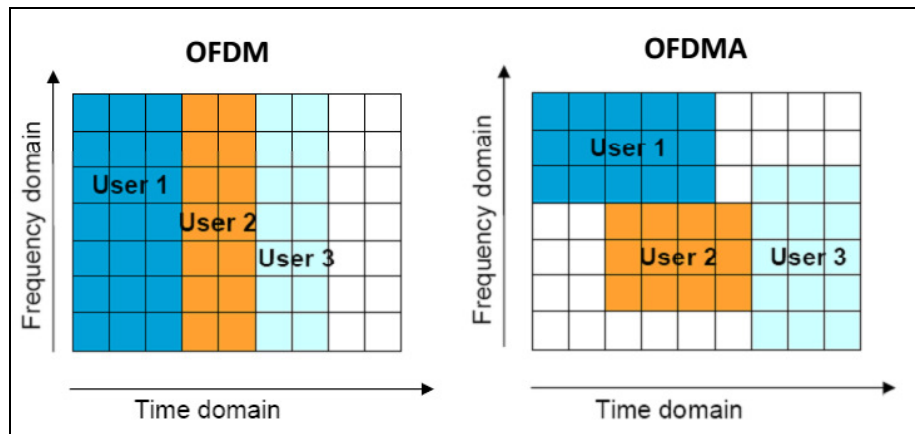


Figura 2.4. Comparação entre OFDM e OFDMA [ROHDE & SCHWARZ, 2009]

2.3.2.2. SC-OFDMA

O sinal OFDM é composto da soma de várias subportadoras e o resultado é um sinal que pode apresentar altos picos de potência. A razão entre a potência média e a de pico é chamada de PAPR (*Peak to Average Power Ratio*) conforme visto na Figura 2.5. A PAPR elevada requer amplificadores de potência caros e ineficientes, com elevadas exigências na linearidade, o que aumenta o custo do terminal móvel e acaba com a bateria rapidamente [TELECO, 2012].

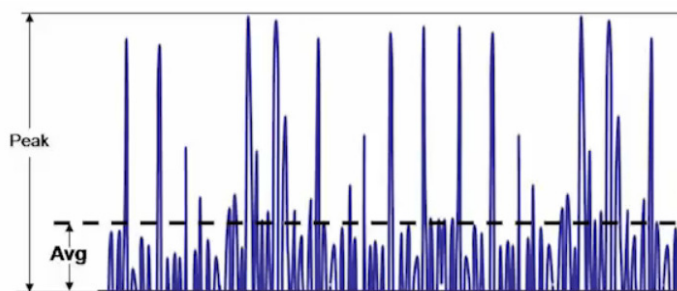


Figura 2.5. Relação entre a potência média e a de pico [EXPLORE GATE, 2013]

O SC-FDMA resolve esse problema fazendo com que um símbolo seja transmitido por todas as subportadoras, o que reduz o consumo de potência em até quatro vezes [KOROWAJCZUK, 2011]. Uma baixa PAPR também melhora a cobertura e o desempenho na borda da célula, porém leva a uma menor vazão no *uplink*. A Figura 2.6 mostra uma comparação entre o OFDMA e o SC-OFDMA.

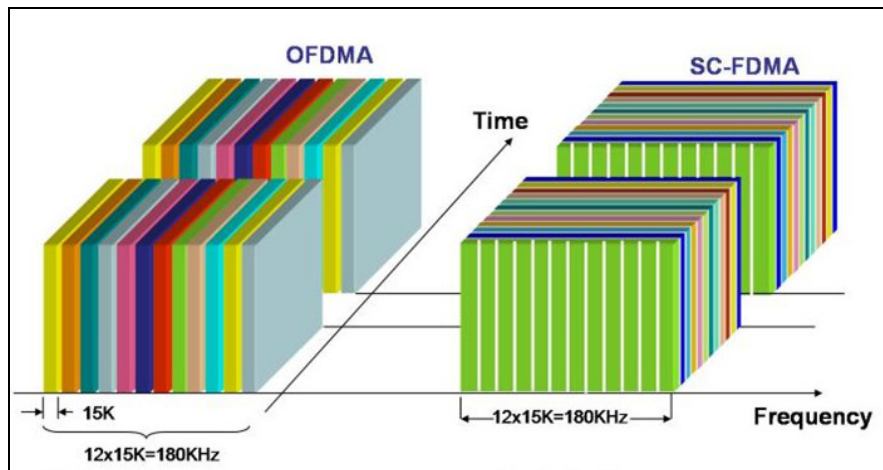


Figura 2.6. Comparação entre o OFDMA e SC-OFDMA [EXPLORE GATE, 2013]

2.3.2.3. Resource Blocks

Como visto anteriormente, no OFDMA, usuários são alocados em sub-portadoras por um período de tempo t . Sendo assim, os usuários são multiplexados na frequência e no tempo ao mesmo tempo. Considerando uma grade de tempo e frequência, de acordo com a Figura 2.7, é definido como elemento de recurso (*resource element*) o equivalente a uma subportadora OFDM espaçada de 15 kHz durante o intervalo de tempo do símbolo OFDM [CARVALHO, 2011].

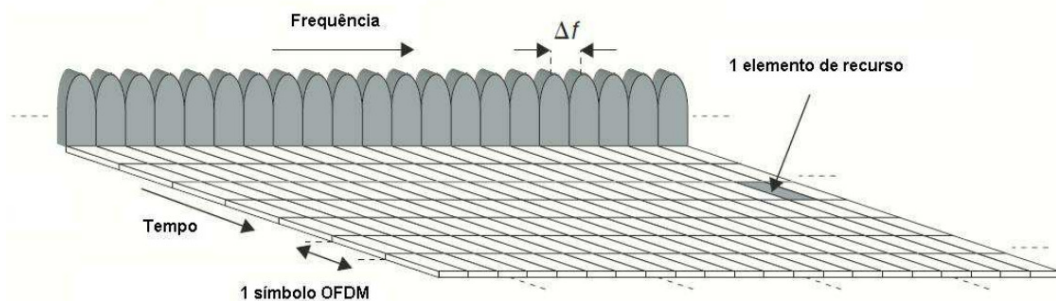


Figura2.7. Grade de tempo e frequência [DAHLMAN et al, 2007]

Agora, considerando somente o domínio da frequência, é definido como bloco de recurso físico (*physical resource blocks - PRB*) 12 subportadoras OFDM consecutivas, resultando em uma largura de banda de 180 kHz . No *downlink* o número de PRBs pode variar de 6 até mais de 100, dependendo da largura do canal, variando de 1,4 a 20 MHz.

A multiplexação dos usuários é realizada pela alocação de uma certa quantidade de PRBs por usuários. Um PRB é a menor quantidade de dados que um usuário pode transmitir. Conforme visto na Figura 2.8, cada PRB possui 180 kHz no domínio da frequência e 0,5 ms no domínio do tempo, que por sua vez corresponde a um *time slot*. Um

quadro LTE possui 10 ms de duração, e é dividido em 10 subquadros de 1 ms, onde 1 ms correspondem a 2 *time slots*. Cada *time slot* pode transportar 6 ou 7 símbolos OFDM dependendo do prefixo cíclico utilizado (curto ou longo). Por último, o PRB é formado de diversos *resource elements* (RE) que são modulados independentemente. Então, resumidamente tem-se: [DAHLMAN et al, 2007]

- 1 quadro LTE = 10ms → 10 subquadros → que duram 1ms cada → 2 slots
- 1 slots = 0,5 ms → suporta 6 ou 7 símbolos OFDM.
- 1 PRB contém:
 - 12 subportadoras * 7 símbolos = 84 RE (CP curto)
 - 12 subportadoras * 6 símbolos = 72 RE (CP longo)

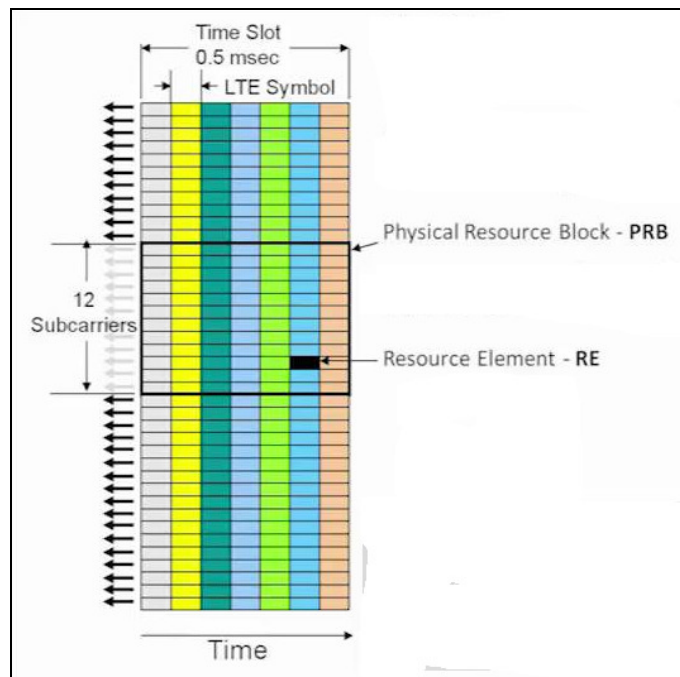


Figura 2.8. *Physical Resource Block* do LTE [EXPLORE GATE, 2013]

A partir da Tabela 2.2, que mostra diversos parâmetros utilizados nas transmissões LTE, é possível estimar a taxa de dados trafegados em 1 PRB. Para isso, será considerado que o sistema possui as seguintes características:

- 14 símbolos OFDM por subframe de 1 ms (2 slots);
- Modulação de 64 QAM com 6 bits por símbolo em todos os RE;

Então:

- 6 bits x 14 símbolos = 84 bits por subframe de 1ms;
- Convertendo para bits/s = 84 bits/ 1ms = 84kbps por subportadora;
- 12 subportadoras x 84kbps = 1.008 Mbps por PRB;
- Utilizado a banda de 20 MHz temos 100 PRBs disponíveis, desta forma: 100 x 1.008 Mbps = 100.8 Mbps por antena;

Tabela 2.2. Alguns parâmetros OFDMA utilizados na transmissão *dowlink* [SÁ, 2010], [KOROWAJCZUK, 2011]

Largura do Canal (MHz)	1,4	3	5	10	15	20
Qtd de PRBs	6	15	25	50	75	100
Qtd de subportadoras	84	180	300	600	900	1200
Vazão Máxima (Mbps)	7	15	25	50	75	100

2.3.2.4. Modulação e codificação Adaptativa

Nas comunicações móveis é usual existirem variações significativas nas condições do canal, condicionando a capacidade das ligações. Por este motivo, é necessário lidar com essas variações, realizando adaptações nos parâmetros de transmissão [SÁ, 2010]. Essas adaptações são feitas através da técnica AMC (*Adaptive Modulation and Coding*) [KOROWAJCZUK, 2011], onde é possível modificar o esquema de modulação ou a taxa de codificação de acordo com o nível de sinal.

De tempos em tempos os termináís móveis devem reporta as *eNodeB* a qualidade do canal para uma determinada subportadora. A qualidade do canal é definida pelo Indicador de Qualidade de Canal (*Channel Quality Indicator - CQI*), que é basicamente o valor de SINR com erros e atrasados acrescentados. Baseado nessas informações, os símbolos OFDM de um PRB podem ser modulados e codificados de maneira adaptativa [CARVALHO, 2011].

2.3.2.5. MIMO

O LTE utiliza o conceito de múltiplas antenas, uma vez que estas são utilizadas para aumentar a cobertura, capacidade da camada física e eficiência espectral. A adição de mais antenas a um sistema rádio permite o aumento do desempenho do mesmo devido ao fato de os diversos sinais transmitidos percorrerem caminhos diferentes [SÁ, 2010]. Esta técnica associada a outras, como modulação de alta ordem (64QAM, por exemplo), antenas adaptativas e poderosos DSPs (*Digital Signal Processor*) garantem as altas taxas exigidas pelo padrão LTE. Este conceito vem sendo padronizado

pelo 3GPP, e agora vem se tornando um fator determinante para as novas tecnologias móveis devido as altas taxas de *downlink* e *uplink* exigidas [TELECO, 2012].

O LTE suporta as configurações 2x2, 4x2 e 4x4, onde o primeiro número é referente ao número de antenas na *eNodeB* e o segundo ao número de antenas no UE. A Figura 2.9 apresenta um típico sistema MIMO utilizando a configuração 2x2.

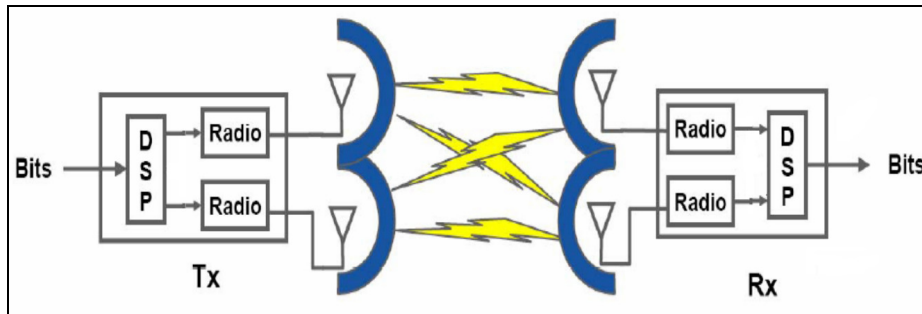


Figura 2.9. MIMO utilizando a configuração 2x2 [3G AMERICAS, 2014]

O 3GPP padroniza as técnicas de transmissão para o LTE utilizando a tecnologia MIMO, dentre essas tecnologias, as que se destacam são [KOROWAJCZUK, 2011]:

- **Space-Time Coding:** fornece ganho de diversidade para combater o desvanecimento do sinal causado por multi-percurso. Neste sistema, é realizada uma cópia do sinal, porém eles são codificados de formas diferentes e são enviados simultaneamente por diferentes antenas.
- **Space Frequency Block Coded (SFBC):** proporciona ganho de diversidade, porém necessita apenas de uma antena na recepção. Isto ocorre, pois além de realizar a cópia do sinal e codificá-los de forma diferente, eles são transmitidos em frequências distintas.
- **Spacial Multiplexing:** fluxo de dados de entrada do transmissor é dividido em feixes independentes entre si, ocupando menor banda. Na sequência, transmissores enviam esses feixes aos receptores através de antenas distintas, aumentando a vazão (Figura 2.10). Esses feixes são enviados na mesma frequência, e serão recuperados pelos receptores, que ficarão responsáveis por reagrupá-los em um único sinal. As mudanças de percurso podem gerar atrasos e distorções em partes do sinal, que são compensados por algoritmos sofisticados utilizados nas antenas receptoras.

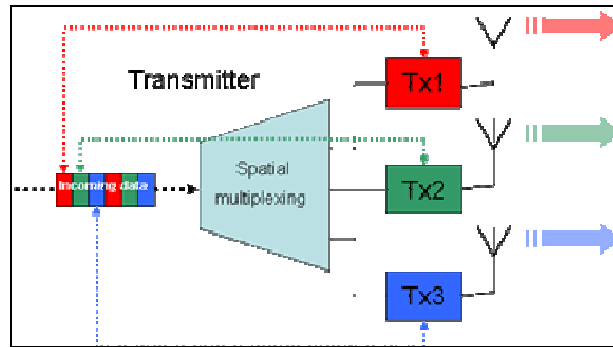


Figura 2.10. Multiplexação Espacial [GUEDES; VASCONCELO, 2009]

O MIMO ainda pode ser classificado como Multi-User MIMO (MU-MIMO) ou Single User MIMO (SU-MIMO). A principal diferença entre eles é que no SU-MIMO um único usuário transmite os dados para o receptor enquanto no MU-MIMO vários usuários transmitem os dados para o receptor simultaneamente. Estes recursos estão disponíveis tanto no *downlink* quanto para o *uplink* [KOROWAJCZUK, 2011].

2.3.3. Características

2.3.3.1. Frequências

Os sistemas LTE podem ser implantados em diversas frequências. De acordo com [4G AMERICAS, 2014], que lista todos os países que possuem redes LTE ativas, em setembro de 2013 as seguintes frequências estavam sendo utilizadas 700, 850, 1500, 1700, 1800, 1900, 2100, 2300, 2500, 2600 MHz, sendo a faixa de 700 MHz a mais vantajosa, dentre outras, por questões de cobertura.

No Brasil, até o momento, as redes LTE trabalham nas frequências 2100/2500/2600 [4G AMERICAS, 2014], espera-se que seja liberada a banda de 700MHz com o fim da transição da TV Aberta analógica para a TV aberta digital que deve ocorrer em 2016 [ANATEL, 2014]. Como existe essa diferença nas frequências utilizadas nos regiões, telefones de um país podem não funcionar em outros países, ou seja, os usuários precisarão de telefones com capacidade multi-banda para *roaming* internacional.

2.3.3.2. Flexibilidade do espectro

A eficiência no uso do espectro faz do sistema LTE um cenário apropriado para suportar um grande número de usuários dentro do espectro disponível. Uma das grandes vantagens do LTE é permitir flexibilidade da alocação dos canais, uma vez que este

pode operar com canais de : 1,4, 3, 5, 10, 15, 20 MHz. [CORNELIO, 2011], [KOROWAJCZUK, 2011].

O LTE possui dois esquemas de alocação espectral, podendo operar nos modos FDD e TDD para transmissão dos sinais de uplink e downlink. O FDD faz uso de duas faixas de frequências distintas, onde é possível enviar dados por uma frequência e recebê-los através de outra. Por sua vez, o TDD só utiliza uma única faixa de frequência, transmitindo e enviando em tempos diferentes.

2.3.3.3. Capacidade e Mobilidade

A tecnologia LTE apresenta ótimo desempenho para células de até 5 km, podendo suportar até 200 usuários quando se utiliza canais de 5 MHz e 400 utilizadores considerando uma largura de banda de 20 MHz [SÁ, 2010], [KOROWAJCZUK, 2011].

Além disso, é possível demonstrar um serviço eficaz em células com raio de até 30 km e um desempenho limitado fica disponível em células com tamanho de raio de até 100 km.

2.3.4. Handover

O *handover* (HO) é uns dos principais procedimentos em qualquer rede móvel, uma vez que garante a liberdade de movimento dos usuários enquanto ainda se presta serviços de alta qualidade. A satisfação do usuário está diretamente ligada à taxa de sucesso deste procedimento.

Recentemente, o conceito de *handover* não tem sido mais apenas ligado a continuidade de uma chamada telefônica, mas também a continuidade de sessões de streaming, a manutenção de QoS e do acesso a Internet. Um dos desafios da pesquisa para sistemas celulares é a melhoria do sistema de admissão de chamadas que controla e reduz a probabilidade de bloqueio e melhora a qualidade do serviço.

Essa extensão do conceito de *handover* ocorre devido à popularização de *tablets* e *smartphones*, os quais têm permitido a experiência coletiva de usuários que compartilham uma mesma área de cobertura. Recentemente, o cenário de mobilidade em diferentes velocidades com aplicativos em uso tem sido cada vez mais comum.

As especificações 3GPP definem o RSRP (*Reference Signal Received Power*) ou potência de sinal de referência recebida, como a medida de entrada para o algoritmo de HO [3GPP, 2008]. O RSRP é definido como a média linear sobre as contribuições de potência dos *resource elements* que transportam sinais de referência específicos de células dentro da largura de banda de frequência de medição considerada. O RSRP é medido para a *eNodeB* atual, bem como para outras *eNodeB* na vizinhança do usuário. Por fim, o RSRP é usado para classificar as diferentes células no momento de seleção de célula e HO.

Conforme o UE se move na rede, o mesmo pode enfrentar diferentes condições de propagação e interferência. Pode acontecer de uma célula vizinha apresentar melhores condições (maior RSRP) do que a célula atual. Sendo assim, o UE monitora a célula atual (*SeNB – serving eNodeB*) e células vizinhas (*NeNBs – neighboring eNodeB*) realizando, periodicamente, medições dos canais de rádio *downlink* (RSRP) afim de identificar se a célula vizinha possui uma melhor condição (RSRP).

O HO é acionado pela *eNodeB*, com base nos relatórios de medição (*measure reports*) recebidos do UE. O 3GPP descreve os vários eventos que podem acionar um HO, dentre os quais, o principal é o evento A3². De acordo com o evento A3, o HO é iniciado quando a seguinte condição for atendida por um determinado período de tempo:

RSRP:

$$\mathbf{RSRP}_{\text{NeNB}} > \mathbf{RSRP}_{\text{SeNB}} + H_{ys} \quad (1)$$

Onde o $\mathbf{RSRP}_{\text{NeNB}}$ e $\mathbf{RSRP}_{\text{SeNB}}$ são os valores RSRP da *eNodeB* vizinha e da *eNodeB* atual, respectivamente. O H_{ys} (*hysteresis*) pode ser entendido como uma margem de segurança, essa margem busca reduzir as chances de um HO falhar. Os valores de *hysteresis* válidos variam entre 0 e de 10 dB com passos de 0,5 dB, o que resulta em 21 valores de *hysteresis* possíveis. Outro parâmetro importante no processo de HO é o *time-to-trigger* (TTT) ou *tempo para o gatilho*. O TTT define o tempo durante o qual a condição da Equação 1 deve ter atendida para iniciar um HO. Os valores de TTT para as redes LTE são especificados pelo 3GPP [3GPP, 2010d] são 16 possíveis valores (0, 0,04, 0,064, 0,08, 0,1, 0,128, 0,16, 0,256, 0,32, 0,48, 0,512, 0,64, 1,024, 1,280, 2,560 e 5,120), todos definidos em segundos [BALAN et al, 2011].

² Evento A3: o RSRP da célula vizinha se tornou melhor do que o RSRP da célula atual somado com uma margem.

No LTE, pode-se distinguir entre dois modos diferentes de mobilidade: mobilidade no modo ocioso (*idle*) e mobilidade no modo conectado (*connected*). Quando o UE se encontra no modo *idle* e altera a célula, o processo é chamado resseleção de célula, e quando o UE estiver no modo *connected* e muda de célula, o processo é chamado de *handover*. A rede controla as transições UE de modo *idle* para *connected* e vice-versa [SHOOSHTARI, 2011].

O HO no LTE é classificado como *hard handover*, ao invés do *soft handover* das redes WCDMA. Nesse tipo de HO ocorre uma queda de conexão com a *eNodeB* antiga antes de uma nova conexão com a nova *eNodeB*. A perda de pacotes é evitada através um processo de bufferização dos pacotes seguido de um redirecionamento dos pacotes da antiga para nova *eNodeB*, que repassa os pacotes para o UE.

2.3.4.1. O processo de Handover

O EPC não participa do procedimento de HO, todas as mensagens necessárias são trocadas entre o UE e *eNodeB*. O procedimento de HO é ilustrado na Figura 2.11.

1. A *SeNB* configura o procedimento de medição no UE.
2. Um relatório de medição (*MEASURE REPORT*) é enviado pelo UE para *SeNB* quando algumas condições são atendidas (ex: evento A3).
3. A decisão de HO é tomada pela *SeNB* baseada no relatório de medição.
4. Uma mensagem de *HANDOVER REQUEST* é enviada pela *SeNB* para a *TeNB* (*Target eNodeB*) com todas as informações necessárias para realizar o HO.
5. A *TeNB* pode realizar um processo de controle de admissão dependendo das informações de QoS recebidas. Basicamente, a *TeNB* avalia se existem recursos disponíveis para atender o UE.
6. Caso existam recursos, os mesmos são configurados e uma mensagem de *HANDOVER REQUEST ACKNOWLEDGE* é enviada para *SeNB*. Caso contrário o HO é rejeitado.
7. Um comando de *HANDOVER* é enviado da *SeNB* para UE. O UE se desconecta da *SeNB* e conecta na *TeNB*.

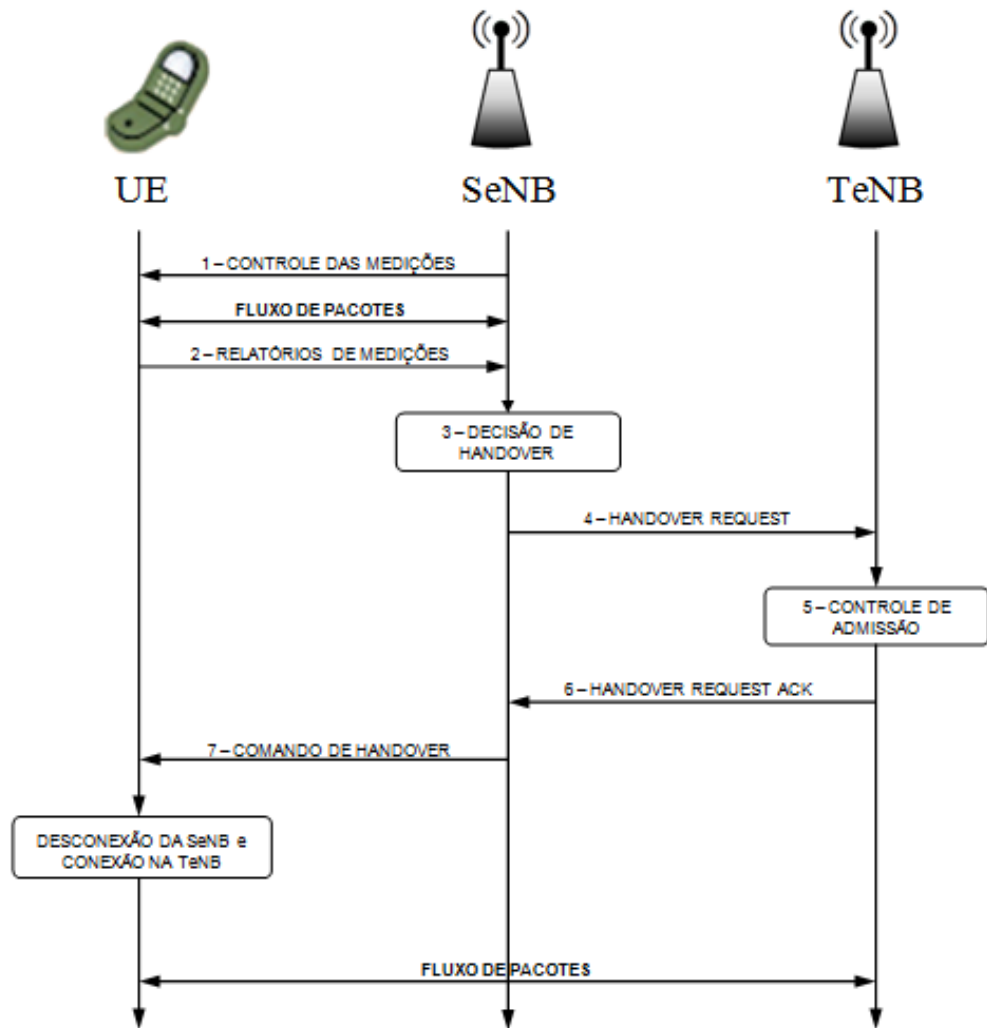


Figura 2.11. Etapas do *handover*

Uma descrição mais aprofundada do processo de HO pode ser encontrada em [SHOOSHTARI, 2011].

2.4. 4G e o LTE Advanced

Como mencionado anteriormente, o padrão LTE na verdade representa um sistema 3G (também são encontradas referências ao LTE como 3.9G). A ITU (International Telecommunications Union) estabeleceu as especificações para uma tecnologia ser denominada como sendo 4G. Uma determinada tecnologia é considerada 4G quando for reconhecida como um sistema IMT-Advanced [ITU, 2013], [RUMNEY, 2008].

Requisitos definidos pelo ITU para um sistema móvel ser considerado de 4ª Geração [4G AMERICAS, 2014]:

- Rede totalmente IP com comutação de pacotes.
- Interoperabilidade com os padrões Wireless existentes.
- Uma velocidade de 100 Mbit/s com o usuário em movimento e 1 Gbit/s com o usuário sem movimento.
- Compartilhar dinamicamente os recursos da rede para suportar mais usuários simultâneos.
- Largura do canal escalável de 5-20 MHz, opcionalmente até 40 MHz
- Eficiência espectral de 15 bit/s/Hz, no downlink, e 6,75 bit/s/Hz, no uplink (o que significa que 1 Gbit/s no downlink com um canal inferior a 67 MHz)
- Eficiência espectral do sistema de até 3 bit/s/Hz/ célula no downlink e 2,25 bit/s/Hz/célula para uso indoor.
- Roaming global através de múltiplas redes.
- Capacidade de oferecer serviços multimídia de alta qualidade.

Em novembro de 2010 a ITU anunciou oficialmente a LTE-Advanced (Rel 10) e WirelessMAN-Advanced, parte do Wimax IEEE 802.16m como tecnologias IMT-Advanced. Atualmente, o LTE-Advanced está no Release 11 e já supera vários requisitos impostos pelo ITU. Dentre as principais inovações do LTE-A, destacam-se [DAHLMAN; PARKVALL; SKOLD, 2011]:

- Largura do canal escalável de 5-20 MHz com suporte a agregação de portadoras que podem criar canais de até 100 MHz (*Carrier Aggregation*).
- Soluções de antenas para técnicas MIMO suportando até 8x8.
- Grande utilização de *femtocells*, *picocells* e *relay nodes* formando as redes heterogêneas (Het-Net).
- Utilização de faixas de frequência não contíguas.
- Configuração e operação automática da rede (redes auto-organizáveis).

Apesar de não ser considerada efetivamente como uma tecnologia de 4ª geração, o LTE se apresenta como uma tecnologia promissora que permitirá ao usuário uma experiência real de banda larga móvel. Com ela poderão ser oferecidos serviços de banda larga móvel de elevado desempenho para o mercado de massa, por meio de uma combinação de elevadas taxas e baixa latência.

2.5. Femtocell

O conceito *femtocell* é parte integrante dos esforços da indústria de telecomunicações para fornecer comunicação de alto rendimento, serviços de alta qualidade para a casa dos usuários. Em contraste com os tipos de células convencionais, que são bem planejadas pelas operadoras, as estações base *femtocell* devem ser instalados pelos próprios clientes, semelhante a um ponto de acesso sem fio [LI et al, 2011].

As *Femtocells* são pequenas estações base com a mesma funcionalidade que as *macrocells*, porém elas possuem potência para atenderem somente um ambiente restrito (10-20 metros), baixo custo, suporte a uma pequena quantidade de usuários, que variam de 2 a 16 usuários, dependendo do ambiente (residencial ou empresarial) [CHANDRASEKHAR; ANDREWS, 2008]. A ideia é que em cada ambiente possa ter instalada uma *femtocell* e que os receptores sem fio dentro do alcance a utilizem para comunicação no lugar da *macrocell*.

Estima-se que 2/3 das chamadas e mais de 90% do tráfego de dados de uma rede celular, ocorrem em ambiente indoor. Algumas pesquisas mostram que 45% das residências e 45% das empresas possuem uma péssima experiência em relação a cobertura indoor [ZHANG; ROCHE, 2010]. Oferecer uma boa cobertura tem se tornado um grande desafio para as operadoras, pois não basta oferecer um bom serviço de voz, mas também altas transferências de dados e vídeo.

2.5.1. Padronização

O *Femto Forum* [FEMTO-FORUM, 2014] é uma organização sem fins lucrativos fundada em 2007 para promover a implantação *femtocells* em todo o mundo. O *Femto Forum* é composto por mais de 135 membros, incluindo: operadoras de telefonia móvel, os principais fabricantes de equipamentos de infraestrutura, fornecedores de *femtocells* e fornecedores de componentes, subsistemas, silício e software necessário para criação *femtocells*. A missão do *Femto Forum* é promover o desenvolvimento e a adoção de pequenas células para o fornecimento de cobertura de alta qualidade e serviços nos mercados de acesso residencial e empresarial.

Funcionando no mesmo espectro de frequências e dependendo da configuração das células da rede (macro, micro, pico), as *femtocells* garantem compatibilidade com os terminais que os clientes já possuem (2G ou 3G), suportando todas as funcionalidades/serviços das restantes células. As potências de emissão utilizadas são muito inferiores às utilizadas nas células de rede Macro, entre os 20 mW e os 100 mW, como pode ser visto abaixo, na relação de coberturas entre células.

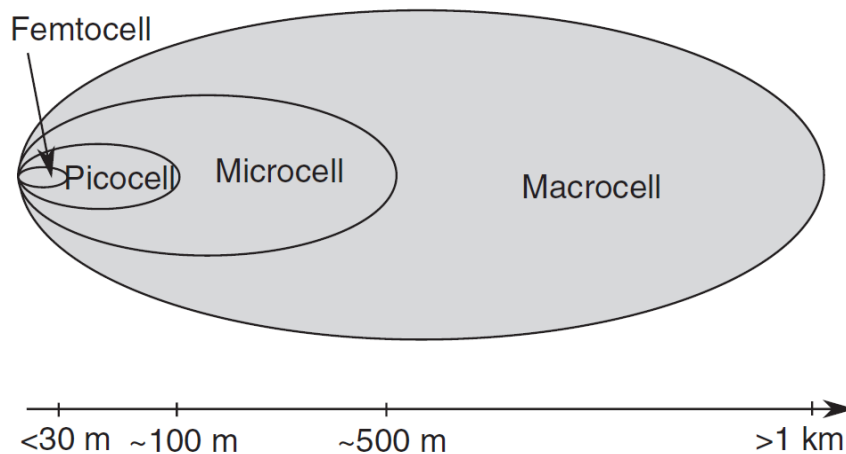


Figura 2.12. Relação entre coberturas de células de redes móveis [ZHANG; ROCHE, 2010]

Em abril de 2009, uma cooperação entre o 3GPP, *Femto Forum* e *Broadband Forum* [BROADBAND, 2013] publicou o primeiro padrão oficial da tecnologia *femtocell*. Isso abriu caminho para as *femtocells* serem produzidos em grandes volumes. No novo padrão, que faz parte do 3GPP *Release 8* (LTE), o ponto de acesso *femtocell* é chamada *Home NodeB* (HNB) e no LTE a *femtocell* é chamada de HeNB.

A *femtocell* conecta ao EPC através das interfaces S1-MME e S1-U. É possível que um gateway HeNB seja empregado, para permitir que a interface entre as HeNBs S1 e EPC afim de dimensionar e suportar um grande número de HeNBs. O gateway HeNB (HeNB GW) pareceria uma HeNB como uma MME, enquanto que para a MME a porta de entrada apareceria como um HeNB. Se um HeNB liga ao EPC diretamente ou não, a interface S1 permanece o mesmo. Um E-UTRAN com HeNB é mostrada na figura 2.13. [TAHA et al, 2012].

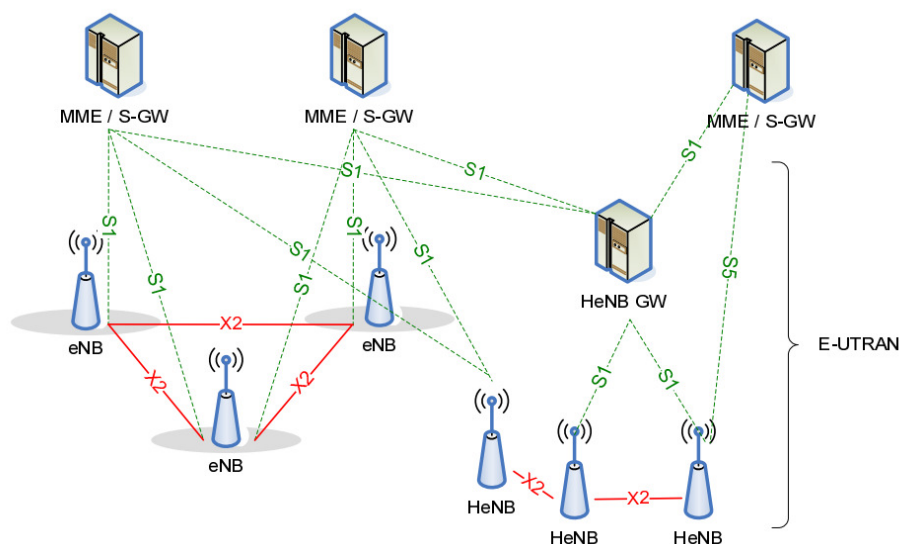


Figura 2.13. Arquitetura E-UTRAN com implantação de HeNB-GW [3GPP, 2010a]

No Brasil a expectativa da Anatel é de que o uso de *femtocells* seja homologado em 2014. Apesar do prazo ainda não ter sido estipulado, o órgão regulador vai liberar o uso das *femtocells* para os provedores do Serviço de Comunicação Multimídia, redes móveis e de serviço móvel especializado [FUTURECOM, 2013]. A proposta de norma para uso de *femtocells* em redes do Serviço Móvel Pessoal (SMP) ou do Serviço Móvel Especializado (SME) está disponível por meio da Consulta Pública nº 53/2012 no site da Anatel.

2.5.2. Principais Características

Um fator a ser levado em consideração, é que o processo de instalação dessas *femtocells* seria a cargo do usuário, ou seja, plug and play e sem muita consideração quanto ao planejamento, contando apenas com as habilidades de auto-configuração embutidas para minimizar o impacto sobre o macrocell por meio de parâmetros de auto-provisionamento. Em [ANDREWS et al, 2012] o autor dá uma visão geral da história das *femtocells*, descrevendo seus aspectos fundamentais, e oferece uma previsão para os próximos anos, onde os autores acreditam que haverá um grande crescimento da tecnologia de pequenas células.

Na *macrocell* espera-se a diminuição do tráfego, melhorando o serviço para os demais usuários e reduzindo os custos para a operadora. A partir da *femtocell*, a comunicação segue pela rede de dados (Internet) até chegar ao *backbone* ou central do provedor de serviços. Isso permite as operadoras disponibilizar novos planos e serviços com preços diferenciados no ambiente de cobertura da *femtocell*, usando a banda larga que já é

do cliente, permitindo as operadoras aumentar a capacidade da rede com menor investimento, pois elimina os custos relacionados à implantação de *macrocells*, reduzindo os custos utilizando a infraestrutura pronta no cliente [ZHANG; ROCHE, 2010]. Um esquema básico da rede *femtocell* pode ser visto na Figura 2.14.

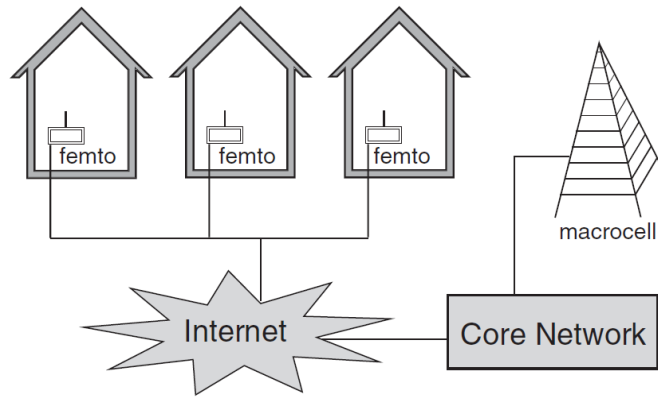


Figura 2.14. Esquema básico da rede *femtocell*, adaptado de [ZHANG; ROCHE, 2010]

O conceito de *femtocell* podem ser aplicados a qualquer tecnologia de comunicação sem fio, como WiMAX, por exemplo, não se restringindo somente às redes celulares (UMTS ou LTE). Sendo assim, as *femtocells* podem trabalhar em frequências livres (WiMAX) ou licenciadas (LTE).

Além das características já mencionadas, *femtocells* também precisam interagir com as redes celulares tradicionais para a realização de tarefas como a *handovers*, gerenciamento de interferência, faturamento e autenticação [ANDREWS et al, 2012]. Tais desafios levaram ao surgimento da metodologia aqui proposta e do estudo de caso realizado.

2.5.3. Arquitetura da rede *Femtocell*

As *femtocells* estão previstas para serem implantadas em larga escala para usuários domésticos e corporativos. Este novo modelo de implantação não planejada requer uma arquitetura de rede que atenda aos seguintes requisitos:

1. Escalável para um grande número de *femtocells* com o mínimo ou nenhum impacto na infraestrutura existente.
2. Conectividade segura e confiável a partir de *femtocell* à rede básica do operador através da Internet.

3. Remotamente configurável.

A arquitetura da rede *femtocell* é composta de três elementos principais: A *femtocell* (HNB), que incorpora as funcionalidades da *NodeB* e RNC da UTRAN (UMTS), já na E-UTRAN (LTE) a HNB, chamada de HeNB, agrega as funções da *eNodeB*. Mais detalhes sobre esta arquitetura podem ser encontrados em [3GPP, 2010b]. A HNB se conecta aos usuários (UEs) através da interface *Uu* e ao HNB-GW através da nova interface *Iu-h*.

O *femto-gateway* (HNB-GW) concentra as conexões das HNBs e as repassa para o núcleo da rede (*Core Network*), trata todo tráfego de sinalização e autentica cada *femtocell*. O HMS (*HNB Management System*) é usado para prover os dados de configuração das HNB de forma remota usando a família de padrões de TR-069, dentre essas configurações destacam-se as atualizações de softwares, parâmetros da HNB e diagnósticos de problemas. O *Security Gateway* (SeGW) usa IPSec [FEMTO-FORUM, 2005] para fornecer uma ligação segura entre o HNB e o HNB-GW (através da *Iu-h*) e entre o HNB e o HMS. O SeGW também é responsável pela autenticação da HNB [CHEN et al, 2010].

Em [CLAUSSEN; HO; SAMUEL, 2008] são descritas propostas de como pode ser realizado o processo de configuração da *femtocell* e registro na rede da *macrocell*, também são descritos métodos para autenticação e autoconfiguração dos parâmetros iniciais (frequências, potências, etc).

2.5.4. Alocação de Canais de Frequência

De acordo com [GAGO, 2013] existem dois tipos de alocações de frequências em redes *femto-macrocell*: alocação com canais dedicados e alocação co-canal. No modo de canal dedicado, diferentes canais de frequência são atribuídos à *femtocell* e *macrocell*, portanto, não há interferência entre as mesmas, porém este método pode desperdiçar recursos já que nem sempre existirá uma *femtocell* utilizando o canal reservado. Por outro lado, o método de co-canal atribui o mesmo canal de frequência para o *femtocell* e *macrocélula*.

A alocação co-canal resulta em uso mais eficiente do espectro, facilita o processo de *handover* e o processo de busca por células, mas pode ocorrer a interferência entre a

femtocell e *macrocélula* que, se não for administrado, pode degradar significativamente a qualidade do sinal [SUNG et al, 2008].

2.5.5. Controle de Acesso

Outra característica importante sobre o uso de *femtocells* é o modo como é feito o controle de acesso. Existem três formas de acesso às *femtocells*: acesso livre, fechado ou híbrido [3GPP, 2011], todos mostrados na Figura 2.15. No primeiro caso, qualquer usuário próximo a um *femtocell* pode utilizá-la; no segundo caso, somente os usuários previamente cadastrados e dentro da região de alcance da *femtocell* podem utilizá-la e o último caso é aquele em que ambos os usuários subscritos e não subscritos podem utilizar a *femtocell*, mas há prioridade para os subscritos.

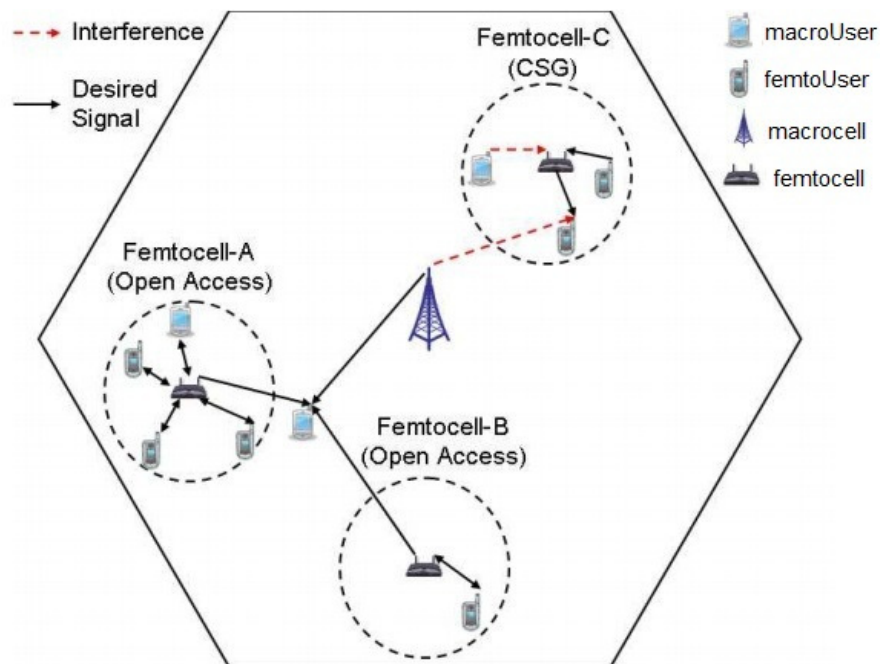


Figura 2.15. Modos de acesso em redes *femtocell* [DEMIRDOGEN; GUCENÇ; HUSEYIN, 2010]

Apesar de que o controle de acesso por subscrição garantir que somente os usuários previamente definidos acessem a *femtocell*, esse tipo de acesso pode gerar diversos problemas de interferência. Por exemplo, se um usuário sem permissão está perto da *femtocell*, o mesmo permanecerá associado à *macrocell* e será uma grande fonte de interferência para a *femtocell*. Muitos trabalhos tem mostrado que o acesso livre a *femtocell* ou abordagens híbridas permitem melhores resultados [DEMIRDOGEN; GUCENÇ; HUSEYIN, 2010], [HO; CLAUSSEN, 2007].

2.5.6. Mobilidade

Usuários e operadoras esperam que as *femtocells* forneçam a mesma qualidade de serviço das *macrocells*. Assim, é fundamental que todos os usuários possam realizar *handovers macro-femto*, *femto-macro* e *femto-femto*. Devido à cobertura limitada e a alta densidade de *femtocells*, é possível que os usuários realizem muitos *handovers*, sendo alguns deles desnecessários. Com isso, surge a necessidade de melhorias no processo de *handover*, diversos trabalhos têm sido publicados na academia buscando soluções para esses desafios [CHUEH; CHANG; KAO, 2011], [CHOWDHURY; BUI; JANG, 2011], [ZHUANG; ZHAO; ZHU, 2012].

2.5.7. Backhaul

Na maioria das tecnologias existentes sempre é necessário algum tipo de QoS, e para as redes *femtocell* não será diferente, onde a exigência e a garantia de entrega de seus pacotes devem ser mantidos e a priorização de dados, como voz, deve ocorrer para manter qualidade na conversação do usuário. Porém, *femtocells* utilizam a infraestrutura da Internet, como um *backhaul* para se conectar a rede da operadora (*femto-gateway*). Este *backhaul* apresenta as seguintes questões: pouca segurança, QoS deficiente e largura de banda limitada [CHEN et al, 2010].

- Segurança: qualquer comunicação entre a *femtocell* e o *femto-gateway* devem ter garantia de confidencialidade e integridade dos dados. Protocolos de segurança como IPSec podem ser utilizados para esta finalidade. Além disso, como a *femtocell* é implantada pelo usuário final, deve-se proteger o *femto-gateway* contra uma *femtocell* falsificada ou alterada, para isso é necessário realizar a autenticação mútua entre a *femtocell* e o *Security Gateway* (que pode estar dentro ou fora do *femto-gateway*) usando as credenciais do dispositivo que são armazenados de forma segura dentro da *femtocell*.
- QoS: Na ausência de um *backhaul* dedicado com QoS, a comunicação entre o *femtocell* e o *femto-gateway* pode ser prejudicada pela perda de pacotes, atraso e *jitter* que podem variar durante o uso da *femtocell*. Estes fatores podem afetar as aplicações de tempo real, como voz e vídeo. Para tratar dessas questões, tanto a *femtocell* quanto o *femto-gateway* podem classificar pacotes sensíveis a atraso, utilizando o DSCP (*Differentiated Services Code*

Point) nos cabeçalhos IP. Com isso, os roteadores intermediários podem priorizar esses pacotes adequadamente para melhorar o QoS. Para proteção adicional, a qualidade da aplicação pode ser monitorada e o usuário redirecionado para uma *macrocell* se a qualidade da conexão cair abaixo de um limiar.

- Largura de banda limitada: normalmente, os provedores de Internet (ISPs) fornecem conexões assimétricas para usuários de banda larga, com mais largura de banda disponível no *downlink* do que no *uplink*. Assim, dependendo da aplicação, o número de usuários da *femtocell* fica limitado pelo *uplink*. Para reduzir a sobrecarga no *uplink*, técnicas como compressão do cabeçalho dos pacotes ou controle de admissão e escalonamento podem ser utilizadas como forma a minimizar o problema [HARYANTO et al, 2011].

2.5.8. Interferência

Outro fator que tem sido abordado em vários trabalhos [CHANDRASEKHAR; ANDREWS, 2008], [RANGAN; MANDAN, 2012], [ZAHIR et al, 2013], [MAQBOOL; LALAM; LESTABLE, 2011] é a interferência em redes *femtocell*. Existem três fontes de interferências: a) *macrocell* para *femtocell*, b) *femtocell* para *femtocell*, c) *femtocell* para a *macrocell*. O tipo (a) é a principal fonte de interferência, os tipos (b) e (c) de interferência são relativamente baixos devido à baixa potência de transmissão e o efeito de isolamento gerado pelo alto nível de obstrução nos ambientes com *femtocell* (wall loss). A Figura 2.16 mostra os tipos de interferência.

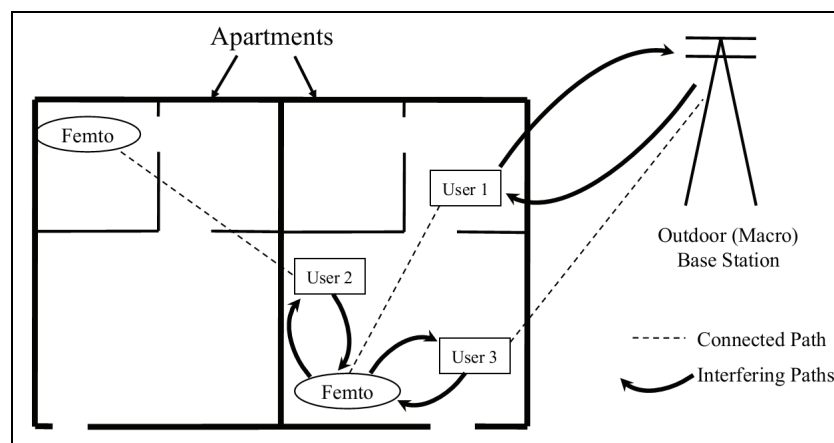


Figura 2.16. Tipos de interferência [FEMTO-FORUM, 2010]

Diversos trabalhos com diferentes soluções para reduzir a interferência em redes *femtocell* tem sido publicados. Em [ZAHIR et al, 2013] foi apresentado um estudo sobre a gestão de interferência em redes *femtocells*, os autores resumem os principais desafios enfrentados em ambientes com alta densidade de *femtocells* e mostra as soluções propostas ao longo dos anos. *Femtocells* são normalmente implantados com um planejamento mínimo de RF. Isto requer que as *femtocells* sejam capazes de se auto-organizar, buscando otimizar os recursos de rádio (frequência, potência, etc.) Outros estudos sobre gestão de interferência podem ser vistos em [RANGAN; MANDAN, 2012] [FEMTO-FORUM, 2010] [RANGAN, 2010].

2.6. Considerações Finais

Neste capítulo, foi apresentado o levantamento do estado da arte das tecnologias envolvidas nesta pesquisa, contemplando as principais propriedades das redes LTE. Assim como foi também apresentado os conceitos que norteiam as *femtocells*. Foi possível demonstrar a diversidade de estratégias que vem sendo aplicadas para que a utilização de *femtocells* seja de fato solução para melhoria de cobertura e taxa de dados .

No próximo capítulo serão apresentados os trabalhos relacionados a esta pesquisa, enfatizando não só os estudos que demonstram os desafios técnicos em discussão, como também, mostrar as pesquisas que vem sendo publicadas na literatura em consonância com o estudo desta dissertação.

Capítulo 3 – Trabalhos Relacionados

3.1. Considerações Iniciais

Existem muitos trabalhos que abordam a utilização de *femtocells* e demonstram suas vantagens de utilização. No entanto não é com a mesma facilidade, que se encontram trabalhos discutindo os contrapontos da implantação ou ainda, que levantem o questionamento quanto a efetividade de utilização. Nesse sentido, este capítulo inicia com a apresentação de estudos que como esta dissertação, incitam e apontam os principais desafios técnicos em discussão e conclui com a demonstração de algumas abordagens que relacionam-se com o objetivo proposto neste trabalho.

3.2. Desafios em *femtocells*.

Com o intuito de discutir e motivar novas pesquisas, apresentam-se alguns trabalhos que demonstram os desafios mais amplos de *femtocells*, no que diz respeito as limitações técnicas e não técnicas. As *femtocells* ganharam muita atenção recentemente devido a suas vantagens em termos de economia de custos na infraestrutura e melhoria da experiência em ambientes *indoor*. Vários consórcios de padronização, como o 3GPP, WiMAX Fórum e IEEE 802.16, começaram a desenvolver soluções para permitir e otimizar a operação de *femtocells* dentro destas tecnologias [COSTA, 2012]. No entanto, existem aspectos importantes a serem superados antes de se pensar em implantações em grande escala.

ANDREWS et al. [2012] oferece uma revisão ampla e detalhada da literatura, destacando as principais características sobre a tecnologia *femtocell*, fornecendo um levantamento quanto a questões técnicas, de negócio e regulamentares. Isso porque a infraestrutura não muito planejada para a rede aponta muitas incertezas. Além disso traz questionamento também acerca da eficiência da tecnologia, tais como: *Femtocells* serão cruciais para o descarregamento de dados e vídeo a partir da rede tradicional? Ou será que as *femtocells* irão provocar mais problemas, prejudicando décadas de cuidados na implantação de estação base por meio de interferências imprevisíveis e entregando apenas ganhos limitados? E ainda: seriam *femtocells* apenas uma etapa emocionante, mas de curta duração,

que se tornará obsoleta com melhorias no descarregamento Wi-Fi, novos regulamentos de *backhaul* e/ou preços, ou outros desenvolvimentos tecnológicos imprevistos?

Percebe-se que a preocupação ocorre porque apesar de todas vantagens previstas, os impasses não são facilmente solucionáveis devido à sequência de grandes desafios técnicos e não técnicos ainda pendentes. Em vários trabalhos [VIVIER, 2010] [ZAHIR, 2013] [TYRRELL, 2011] é possível perceber os principais aspectos que norteiam essas limitações:

3.2.1 Técnicos

- Gestão de Interferência: Será necessária para mitigar a degradação do desempenho resultante da interferência entre *macrocell* e *femtocells* e entre *femtocells*, quando as implantações forem densas e sem planejamento prévio.
- Auto-configuração: Garantir as *femtocells* configurações dinâmicas, para alteração de parâmetros de funcionamento durante mudanças nas condições ambientais.
- Gestão de *handover*: Ainda não há uma abordagem clara e eficaz para assegurar a perfeita gerência de *handover* entre *eNodeB* e HeNB.
- Técnicas de posicionamento cooperativo: Que permitam uma melhor precisão e gestão quanto ao posicionamento das *femtocells* antes da instalação.
- Controle de acesso: Os mecanismos propostos até agora são arbitrários e não otimizados e tornam-se mais difíceis ainda, quando se trata de áreas onde diferentes *femtocells* se sobrepõem (implementações maciças). Atualmente três modos de acesso foi definida para uma *femtocell* [LATHAM, 2008], [CHOI, 2008] modo Aberto, Fechado e Híbrido.
- *Femtocells* são implantados por usuários finais e podem ser ligadas e desligadas a qualquer momento, portanto, a implantação é completamente aleatória. O número e os locais de *femtocells* podem variar continuamente dentro de uma mesma *macrocell*. Isso faz com que as ferramentas de planejamento e projetos de rede clássicos para configurar e otimizar uma rede *femtocell* sejam inutilizável. É necessário que tenham inteligência suficiente para integrar de forma autônoma uma rede de acesso de rádio [YOUNG, 2009].
- Proporcionar segurança eficiente para redes *femtocell* também se mostra um desafio. No caso do modo de acesso aberto a privacidade das informações precisa ser garantida. A rede *femtocell* é propensa a muitos riscos de segurança. Por exemplo, a informação privada do assinante viaja através da conexão de internet *backhaul*. Esta informação pode ser interceptada, o que violaria a privacidade e confidencialidade [PRASAD; BARUAH, 2009].

- Falta de soluções precisas para escalabilidade, redundância e particionamento de tráfego.
- Não há atualmente nenhuma garantia de que a conexão de banda larga fixa irá priorizar o tráfego originado das *femtocells* para um serviço sem interrupções, bloqueios ou quedas de chamadas.

3.2.2 Não técnicos

- As principais vantagens concentram-se do lado das operadoras e não há modelos de negócios que incluam de forma atraente a compra de *femtocells* por parte do usuário final.
- As operadoras preferem não depender de um único fornecedor, o que preocupa já que atualmente os equipamentos não garantem interoperabilidade.

Dentre os tantos desafios os mais comumente discutidos dizem respeito a gerência de *handover* e ao estudo da interferência de *femtocells* entre si e com *macrocells*. Como as *femtocells* são instaladas pelo usuário e não são ajustadas em campo, elas precisam ter a capacidade de ajustar-se automaticamente à rede celular.

Estudos realizados por [LEE, 2010] mostram que a implantação de *femtocells* pode ter um impacto indesejado sobre o desempenho na *macrocell*. A alocação de recursos de espectro e a necessidade de evitar interferências eletromagnéticas são obstáculos frequentes encontrados pelas operadoras que desejam implantar esta tecnologia. Uma cobertura e análise da interferência baseada em um cenário realista contendo *macrocell* e *femtocell* utilizando OFDMA são fornecidas, bem como algumas orientações sobre como a atribuição do espectro e os problemas de interferência podem ser abordados nestas redes. É dada especial atenção ao uso de possíveis técnicas de auto-configuração e auto-otimização para evitar a interferência.

Alguns trabalhos analisados visam estabelecer a melhor forma de equilibrar os fatores envolvidos na comunicação móvel e gerenciar os usuários de forma a aproveitar melhor os recursos da rede e com isso obter uma maior eficiência. Avaliações do mecanismo de *handover* em redes LTE tem sido intensamente estudados na academia e na indústria.

Em [WU, 2011], onde é proposto uma estratégia para o *handover* entre *femtocell* e *macrocell* para redes LTE, o artigo expõe uma estratégia que tenta evitar as falhas de *handover* e a ocorrência de *handovers* desnecessários. Em muitos trabalhos [XENAKIS,

2014] [ZHOU, 2013] levantam-se análises sobre os desafiantes problemas quanto ao potencial de utilização de *femtocells* em redes LTE como alternativa para cobertura.

Em [KHALID, 2013], o procedimento de *handover* em *femtocells* LTE é discutido com foco no aumento expressivo do número de *femtocells* em determinados ambientes. Simulações para o *handover* entre *macro-femto* e entre *femto-femto* foram realizadas. Um algoritmo de otimização foi proposto e comparado ao algoritmo convencional. Em outros trabalhos, tem sido proposto o processo de *handover* entre o HeNB e *eNodeB* de forma modificada [ZHANG, 2010]. Um novo algoritmo de *handover* com base na velocidade do usuário e na qualidade de serviço foi proposto, tomando por base três ambientes com velocidades diferentes, ou seja, baixa mobilidade (0-15 km/h), média (15-30 km/h) e elevada mobilidade (> 30 km/h). A análise mostrou que o algoritmo proposto tem melhor desempenho.

As estratégias de *handover* existente para sistemas LTE considera uma única portadora de interferência e ruído (CINR), que muitas vezes sofre limitações de recursos na *femtocell* alvo, gerando efeitos negativos no desempenho geral da rede. Em [ROY, 2012] é proposto uma nova solução de *handover* em redes LTE. A solução considera vários parâmetros, tais como a potência do sinal e largura de banda disponível para a seleção da célula alvo ideal. Isso resulta em um aumento significativo na taxa de sucesso de *handover*, reduzindo assim as taxas de bloqueio de *handover*. O procedimento de *handover* é modelado e analisado por uma cadeia de Markov tridimensional. Os resultados analíticos para os principais indicadores de desempenho se assemelham aos resultados da simulação. Os resultados das simulações mostram que o mecanismo multi-objetivo proposto oferece melhoria considerável nas taxas de bloqueio, sessão atraso de fila, e na latência de *handover*.

Segundo [MENDES, 2003], acesso aberto é uma das opções de acesso para redes *femtocell*, onde as estações estão autorizadas a fazer *handover* para as estações de base de *femtocell* na sua vizinhança. Neste trabalho várias métricas de desempenho e *trade-offs*, que são relacionados à implantação de redes *femtocell* de acesso aberto, são apresentados através de simulações, onde analisa-se o impacto de um método de seleção baseado na capacidade da célula, ao invés de uma seleção de célula que se baseia na qualidade da ligação e na capacidade da *macrocell*. São estudadas então, as funções de distribuição cumulativa (CDF) da capacidade de *femtocells*, de *macrocells* e de usuários em *femtocells* de acesso aberto.

Em artigo publicado por [ULVAN, 2010], o procedimento de *handover* em redes LTE com *femtocell* foi analisado com abordagem em três cenários diferentes, ou seja, no procedimento de *handover* entre *macrocell* e *femtocell*, de *femtocell* pra *macrocell* e entre

femtocells. Os fluxos de sinalização também foram analisados. Os cenários de *macro-femto* e entre *femtos* são bastante exigentes em comparação ao *femto-macro*, tornando-se um desafio fazer uma seleção do *femtocell* alvo. Neste trabalho, propõe-se um mecanismo de predição de mobilidade que possa ser usado para antecipar a posição do usuário e, em seguida, estimar a *femtocell* destino para a qual o usuário pode ser conectado. Além disso, a estratégia de *handover* reativo e pró-ativo é proposto como uma política de decisão de *handover* para diminuir os *handovers* muito frequentes e desnecessárias.

3.1. Considerações Finais

Após uma análise dos trabalhos aqui exibidos, é possível concluir que mesmo agregando um conjunto de vantagens de utilização, a experiência desfavorável da solução de *femtocells* tem relação direta com desafios técnicos ainda em discussão. Nota-se que já há uma demanda de estudos elencando e comentando os desafios. Mas, muitos esforços ainda são necessários quanto a avaliação do desempenho, pois é notório a deficiência, no sentido do estudo da efetividade de *femtocell* como solução única para melhoria de cobertura e taxa de dados.

Capítulo 4 – Avaliação de Desempenho de Sistemas

4.1. Considerações Iniciais

Quando se pretende avaliar o desempenho de um determinado sistema, o primeiro passo desse processo consiste em identificar a técnica que mais se adequa ao sistema sob análise. Este capítulo se inicia com considerações importantes sobre avaliação de desempenho. Em seguida são abordados de forma mais detalhada, o processo de modelagem e as técnicas de desempenho. Por fim, aborda-se, de forma sucinta, o formalismo para sistemas no contexto da modelagem por simulação e modelagem analítica.

4.2. Avaliação de Desempenho

A análise ou avaliação de desempenho é um fator fundamental em qualquer estágio do ciclo de vida de um sistema. Durante a etapa de planejamento, pode ser usada para investigar o comportamento do sistema de forma a observar as relações existentes entre as variáveis ou verificar se ele corresponderá às exigências especificadas [BOLCH et al., 1998] e [HAREL, 1987]. Após a implantação de um sistema, a análise de desempenho pode ser aplicada para encontrar possíveis gargalos e sugerir alternativas para a sua expansão [FRANCÊS, 2001].

De forma genérica, as técnicas de avaliação de desempenho podem ser divididas em dois grupos que, de certa forma, podem ser vistos como complementares. No primeiro grupo encontram-se as técnicas que obtêm medidas para a avaliação a partir de experimentações no sistema real, enquanto que no segundo grupo estão as técnicas que obtêm tais medidas a partir de abstrações criadas para representar o comportamento desse sistema. A representação das técnicas de avaliação de desempenho podem ser observada conforme figura 4.1.

Uma taxonomia para essas técnicas é proposta em [SANTANA et al., 1997], onde os autores sugerem uma divisão em duas classes: as técnicas de aferição e as de modelagem, para o primeiro e segundo grupo respectivamente. Por essa divisão, pode-se observar que a escolha da técnica está diretamente relacionada ao estágio do ciclo de vida em que o sistema se encontra. Para os casos em que o sistema já existe e seu desempenho pode ser averiguado empiricamente, as técnicas de aferição são as mais recomendadas. Estão nessa classe, por exemplo, os *benchmarks*, os protótipos e a coleta de dados (através de monitores de hardware e/ou de software).

Em contrapartida, para os sistemas inexistentes, em [SANTANA et al., 1997] os autores sugerem as técnicas de modelagem. No contexto de avaliação de desempenho, modelagem é um processo complexo e com um forte teor matemático, mas que de maneira simplista pode ser definida como a utilização de uma abstração que contemple em seu cerne as características essenciais de um sistema real, sendo que através da solução desse modelo, pode-se ter uma aproximação de como o sistema se comportaria se o mesmo fosse efetivado [FRANCÊS, 2001].

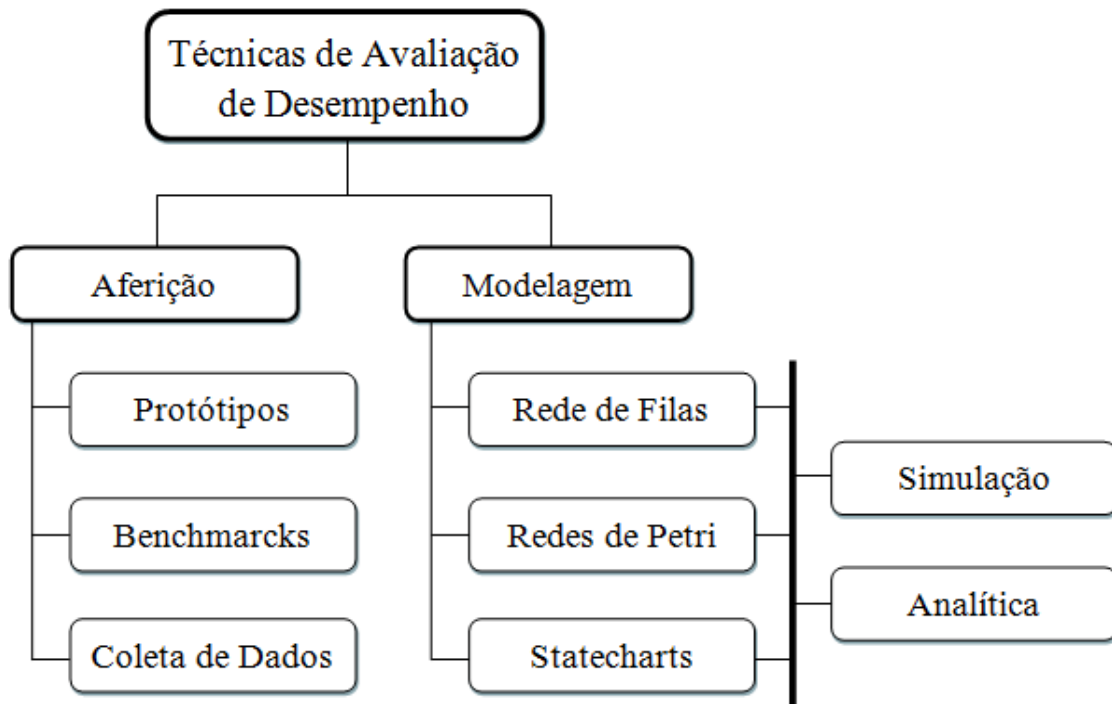


Figura 4.1. Técnicas de avaliação de desempenho

4.3. Métricas

Critério usado para qualificar o desempenho de um determinado sistema. São exemplos de métricas usualmente adotadas:

- **Utilização:** Define-se como o período de tempo em que o sistema permanece ocupado, atendendo a pedidos;
- **Vazão:** É definida como a taxa em que as requisições podem ser atendidas pelo sistema, permite determinar a velocidade com que as requisições são atendidas e, portanto, como o servidor está tratando as diversas solicitações do serviço.
- **Tempo de resposta:** É definido como o intervalo entre a requisição do usuário e a resposta do sistema.
- **Taxa de Custo / Desempenho:** É uma métrica interessante para se comparar dois sistemas. O custo inclui hardware, software, instalação e manutenção em um número

de anos. O desempenho é medido em termos da sua vazão, considerando uma dada restrição de tempo de resposta.

- **Confiabilidade:** É medida pela probabilidade de erros ou o intervalo de tempo entre os erros, também com frequência especificada com segundos livres de erros. Através deste indicativo, podem-se comparar serviços diferentes e indicar o maior tempo possível.
- **Disponibilidade:** É a fração de tempo em que o sistema está disponível para atender as requisições do usuário, o tempo em que o sistema não está disponível é chamado de *downtime*, e o tempo em que está ativo é chamado de *uptime*.

4.4. Aferição

As técnicas de aferição são utilizadas quando se faz necessário coletar dados de um sistema já pronto (sistema real) e posteriormente fazer os cálculos das métricas com esses dados. Um problema encontrado nesta técnica é que ela atua diretamente no sistema, disputando recursos e, via de regra, interferindo nos resultados a serem avaliados.

Tem alta exatidão somente se for realizada de forma correta, pois somente assim poderá determinar os resultados do modelo com precisão.

Podem-se destacar três técnicas de aferição: protótipo, *benchmark* e monitoração. A seguir será apresentada uma breve definição de cada uma das técnicas:

- **Protótipo:** é uma simplificação de um sistema original, mantendo o mesmo comportamento funcional e descartando as características irrelevantes [SANTANA et al., 1997].
- **Benchmark:** é um padrão de desempenho, normalmente um programa de computador, usado para testar o desempenho de um *software* ou um *hardware* [SANTANA et al., 1997].
- **Monitoração:** ferramenta cujo propósito é monitorar um sistema computacional é denominada como monitor. Por intermédio de tal técnica, pode-se observar o desempenho de um sistema de forma a coletar os dados e mostrar as estatísticas de desempenho, entre outros resultados [JAIN, 1991].

Em resumo, as técnicas de aferição são aplicadas quando um sistema já existe (parcialmente ou em sua totalidade) e as medidas de desempenho são obtidas a partir de experimentação do próprio sistema. Detalhes sobre cada uma das técnicas de aferição são omitidos por não fazerem parte do escopo deste trabalho. Contudo, mais referências sobre esse grupo de técnicas podem ser encontradas em [CORTÉS, 1999] e [JAIN, 1991].

4.5. O Processo de Modelagem

O processo de avaliação de desempenho por meio de modelagem consiste de um conjunto de etapas intimamente inter-relacionadas. A Figura 4.2 apresenta as etapas de um processo de modelagem.

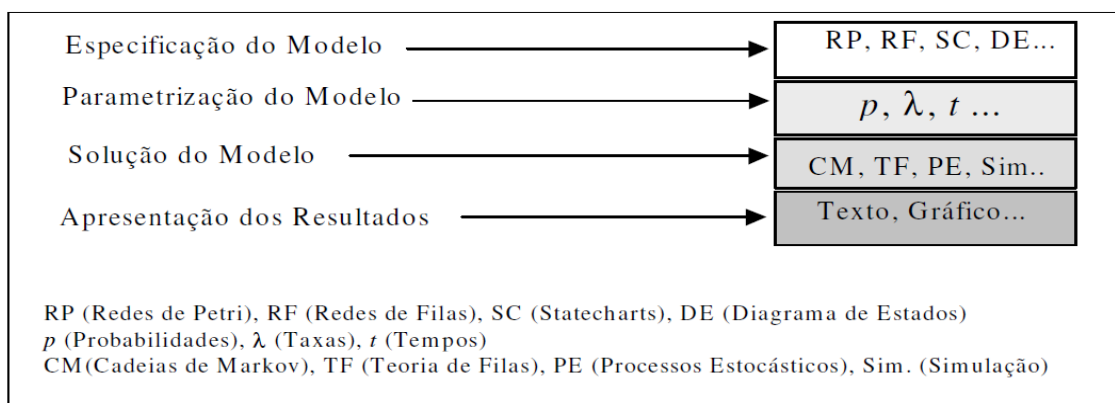


Figura 4.2. Etapas do Processo de Modelagem [FRANCÊS, 2001]

Na fase inicial desse processo, deve-se criar uma especificação coerente com o sistema real, na qual devem estar contidos os componentes do sistema relevantes à avaliação, além do relacionamento entre eles. Idealmente, essa especificação deve ser capaz de representar o sistema de forma clara e livre de ambiguidades. Algumas das principais técnicas utilizadas para especificação são redes RP (Redes de Petri) [PETERSON, 1981], RF (redes de fila) [JAIN, 1991], SC (*Statecharts*) [HAREL, 1987] e DE (diagramas de estados e transições) [LEWIS; PAPADIMITRIOU, 1997]. Após a elaboração do modelo com uma das técnicas citadas, deve-se indicar os parâmetros do sistema, os quais serão passados como entrada para a fase de solução.

Comumente, esses parâmetros são probabilidades (p), taxa de ocorrência de eventos (λ) e tempo médio entre ocorrência de evento (t). Na fase seguinte (solução), as medidas de desempenho, que representam de forma quantitativa como o sistema se comporta em função dos parâmetros dados, são adquiridas aplicando-se um método matemático, o qual pode ser automatizado ou não. Para a solução, pode-se utilizar um método analítico, por exemplo, CM(cadeias de Markov) [BOLCH et al, 2006] e TF (teoria de filas) [JAIN, 1991], ou SIM (simulação) [PIDD, 1998]. Os resultados obtidos pela solução do modelo devem ser apresentados de forma conveniente, utilizando-se, normalmente, gráficos e/ou arquivos textos, a partir do qual é possível identificar os pontos de sobrecarga e/ou ociosidade do sistema.

4.6. Solução por Modelagens Analíticas

A modelagem analítica baseia-se no desenvolvimento de um modelo do sistema real, porém com um nível de abstração mais alto. Neste caso, o modelo é puramente matemático. Neste tipo de modelo, o funcionamento do sistema real é reduzido a relações matemáticas.

Modelos analíticos podem ser determinísticos ou estocásticos. Em um modelo determinístico, todos os parâmetros do sistema são previamente determinados. Já em um modelo estocástico, o comportamento do sistema é analisado probabilisticamente, ou seja, os parâmetros do sistema são descritos por variáveis aleatórias, com distribuições de probabilidade convenientes.

No último caso, o sistema é descrito em termos de um conjunto de estados em que o mesmo pode se encontrar e de transições estocásticas entre esses estados (uma transição estocástica é aquela cuja ocorrência é descrita por uma variável aleatória [KLEINROCK, 1975]).

Desenvolver modelos analíticos normalmente exige maior abstração de aspectos da realidade, se comparado a modelos de simulação. Ainda, em alguns casos não se consegue obter uma resolução numérica, mas sim uma resolução analítica. Algumas vezes a complexidade computacional do modelo pode tornar a resolução muito cara, ficando mais dispendiosa que uma resolução igualmente aceitável em simulação. Mesmo assim, métodos analíticos podem ser empregados com maior facilidade que outros métodos em vários casos. Uma vantagem desta técnica em relação às outras descritas é que não há a necessidade de se preocupar com um conjunto específico de amostras de funcionamento do sistema para a obtenção dos índices de desempenho.

O uso de modelagem analíticas no processo de avaliação de desempenho não foi objeto de estudo deste trabalho. Sugere-se consultar [MARSAN; BALBO; CONTE, 1987] e [KLEINROCK, 1975] para abordagens mais profundas quanto ao formalismos para a modelagem de sistemas no contexto da modelagem analítica.

4.7. Cadeias de Markov

Genericamente, um processo estocástico é um fenômeno que varia em algum grau, de maneira imprevisível, à medida que o tempo passa. Entretanto, uma experiência aleatória, nesse contexto, não é mais representada por um valor único (a probabilidade), e sim por uma função que represente uma sequência ou uma série de valores de probabilidade [KOVACS, 1996].

Em outros termos, um processo estocástico é definido como uma família de variáveis aleatórias $\{X_t : t \in T\}$, onde cada variável aleatória X_t é indexada pelo parâmetro $t \in T$, o qual é normalmente denominado de *parâmetro do tempo*, se $T \subseteq \mathbb{R}_+ = [0, \infty)$. O conjunto de todos os possíveis valores de X_t (para cada $t \in T$) é chamado de espaço de estados S do processo estocástico.

Se o conjunto T de parâmetros do processo estocástico for finito ou infinito contável, tem-se os processos de parâmetro discretos. Neste caso o conjunto de parâmetros T pode ser representado pelo conjunto (ou por um subconjunto) dos números Naturais ($T \subseteq \mathbb{N}$). Em outros casos quando T não pode ser contável, obtém-se os processos de parâmetro contínuo ($T \subseteq \mathbb{R}_+$). Da mesma forma, o conjunto de estados S do processo estocástico pode ser contável, o que define os processos estocásticos de estados discretos, também conhecidos como cadeias, ou o espaço de estados S pode ser não contável, caracterizando um processo de espaço de estados contínuo.

Uma cadeia de Markov é um processo estocástico $\{X_t : t \in T\}$ com espaço de estados discreto, no qual para todo parâmetro $t \in T$, sendo $0 = t_0 < t_1 < t_2 \dots < t_{n-1} < t_n$, e para todo estado $s_t \in S$, a seguinte condição é satisfeita:

$$\begin{aligned} P(X_{m+1} = s_{m+1} \mid X_{t_0} = s_{t_0}, X_{t_1} = s_{t_1}, \dots, X_{m-1} = s_{m-1}, X_m = s_m) \\ = P(X_{m+1} = s_{m+1} \mid X_m = s_m) \end{aligned} \quad (2.1)$$

Esta condição descreve a bem conhecida propriedade de Markov (também conhecida como *sem-memória*). Informalmente, a equação 2.1 pode ser interpretada no sentido de que todo histórico da cadeia pode ser sumarizado no estado atual s_t . Em outras palavras, dado o presente, o futuro é condicionalmente independente do passado [BOLCH et al, 2006].

Nesta definição de cadeias de Markov estão incluídas tanto as cadeias de parâmetro discreto quanto as cadeias de parâmetro contínuo. Visto que, normalmente, o parâmetro t das cadeias de Markov representa o tempo no qual o processo evolui, costuma-se então utilizar as denominações CMTD (*cadeias de Markov a tempo discreto*) e CMTC (*Cadeias de Markov a tempo contínuo*).

Nas CMTD as transições entre estados ocorrem em pontos equidistantes de tempo e utiliza-se $N = \{0, 1, 2, \dots\}$ para representar o parâmetro T . Com isso a equação 2.1 pode ser escrita como:

$$\begin{aligned} P(X_{n+1} = s_{n+1} \mid X_0 = s_0, X_1 = s_1, \dots, X_{n-1} = s_{n-1}, X_n = s_n) \\ = P(X_{n+1} = s_{n+1} \mid X_n = s_n) \end{aligned} \quad (2.2)$$

Já nas CMTC as transições podem ocorrer arbitrariamente ao longo do tempo. Neste caso, caracteriza-se o tempo entre transições através de uma distribuição de probabilidade. Uma vez que a distribuição exponencial é a única distribuição de probabilidade contínua que apresenta a propriedade de *sem-memória*, é de senso comum que se utiliza esta distribuição para caracterizar o tempo entre transições.

Para estudos mais aprofundados de cadeias de markov , recomenda-se as leituras de [PUTERMAN, 1994] e [TIJMS, 1994].

4.8. Solução de Modelagem por Simulação

Quando se utiliza esta técnica, pretende-se simular o comportamento do sistema, para que se tenha uma ideia do seu desempenho. Com a utilização desta abordagem, podem-se realizar previsões, pois não há a necessidade do sistema pronto. Para tanto, um modelo do sistema que se deseja implementar (ou mesmo de um sistema já implementado) é criado, para facilitar e observar os fatores que interferem no seu comportamento.

A abordagem consiste em construir um modelo que simule o funcionamento do sistema a ser avaliado. Este modelo descreve as características funcionais do sistema em uma escala adequada de tempo [PIDD, 1992].

Os sistemas modelados podem alterar suas características com o tempo ou não, diferenciando simulações estáticas e dinâmicas, respectivamente. Conforme descrito em [JAIN, 1991] e [HU; GORTON, 1997] diferentes tipos de simulações são encontradas, tais como emulação, Monte Carlo, *trace-driven*, *discret-event* e *execution-driven*.

O modelo deve conter detalhes importantes referentes ao sistema, mas não a sua totalidade. Em outras palavras, há certo nível de abstração. Contudo, é importante levar em consideração que a abstração não deve acarretar na inclusão de erros no modelo nem mesmo na exclusão de características importantes.

De forma comparativa, a simulação costuma ser menos dispendiosa e consumir menos tempo para que os índices sejam calculados, permitindo que sejam feitos quantos experimentos forem necessários. Porém, por se tratar de uma abstração de realidade, a fidelidade das medidas tende a ser menor na simulação se comparada a monitoração. Além disso, da mesma forma que a monitoração, a quantidade e representatividade das amostras consideradas são muito importantes para obtenção de resultados corretos.

Os modelos de um sistema podem ser classificados como modelos de mudança discreta e modelos de mudança contínua. Estes termos descrevem o modelo e não o sistema. [SANTOS, 1999]. Os modelos dinâmicos são classificados de acordo com os instantes de

tempo em que as variáveis de estado têm seus valores alterados. Na simulação contínua o sistema se altera a cada fração de tempo.

Para o estudo de caso, utilizou-se a simulação discreta, pois se considera somente os eventos onde há alteração do sistema, ou seja, o tempo decorrido entre alterações do estado do sistema não era relevante para a obtenção dos resultados da simulação. Alguns autores a chamam de simulação de eventos discretos, exatamente para enfatizar que a discretização se refere apenas à ocorrência dos eventos ao longo do tempo.

4.9. Considerações Finais

Neste capítulo, conclui-se que avaliar o desempenho faz parte do processo do ciclo de vida de qualquer sistema e exige uma atenta definição da metodologia e ferramentas, para que a escolha seja funcional e intuitiva. A apresentação das diferentes técnicas de modelagem fornece um amplo conjunto de opções, que dependem do estágio do desenvolvimento do sistema alvo.

O processo de modelagem é uma ótima técnica que permite que o sistema, o qual muitas vezes não é passível de instrumentação, seja analisado através de abstrações que representam sua dinâmica. Este processo consiste de várias etapas inter-relacionadas, no qual esta dissertação explora em seu estudo de caso, a abordagem baseada em simulação discreta.

Há diversas taxonomias propostas para a área de avaliação de desempenho, sem entretanto, haver consenso acerca da classificação e agrupamento das técnicas. Sequer há consenso na nomenclatura acerca dos termos “modelagem”, “soluções” e “métricas”. Apesar disso, optou-se por adotar uma das referências das mais citadas pelos pesquisadores da área. [JAIN, 1991]. Entretanto, não é intenção esgotar o tema, portanto recomenda-se [PIDD, 1998] [LEWIS; PAPADIMITRIOU, 1997] e [HU; GORTON, 1997], para ter-se uma visão mais abrangente da área.

Capítulo 5 – Uma abordagem para análise do impacto da utilização de *femtocells* em um cenário LTE - Estudo de Caso em simulação discreta

5.1. Considerações Iniciais

O objetivo deste capítulo é descrever uma metodologia para estudo de avaliação dos impactos da utilização de *femtocells* em um cenário LTE. São apresentados os importantes detalhes que nortearam a modelagem, a definição dos fluxos e principalmente o estudo de caso realizado nesta dissertação. Inicia-se com algumas importantes definições da abordagem e do simulador utilizado. A partir dessa abordagem de simulação discreta, discute-se a correlação entre os indicadores de *handover* e os indicadores de QoS, contemplando, principalmente, o estudo sobre a efetividade da utilização de LTE com *femtocell*, sob a ótica dos impactos, ganhos e desvantagens que essa combinação de tecnologias pode oferecer. Em sequência, são apresentados os resultados obtidos para os cenários propostos e suas respectivas análises.

5.2. Simulação

Segundo [DATAPREV, 2014] existem três técnicas para avaliação de desempenho de um determinado sistema. São elas: a modelagem analítica, simulação e medidas de um sistema real (aferição). A seleção da técnica correta depende do tempo e recursos disponíveis para solucionar o problema e o nível desejado de detalhamento e precisão. Juntamente com a técnica de avaliação, faz-se a escolha da ferramenta a ser utilizada na modelagem. Para simulação, por exemplo, pode-se utilizar um pacote de simulação disponível ou a linguagem de programação para desenvolvimento de um simulador próprio. Já as soluções analíticas se baseiam em expressões matemáticas fechadas.

Na medição do sistema real, utilizam-se ferramentas de monitoração de tal sistema para aferir seu desempenho, em um tempo determinado. A simulação utiliza recursos matemáticos e computacionais para modelar o funcionamento de um conjunto de operações ou processos existentes no mundo real. A simulação pode avaliar um sistema que ainda não está disponível, prevendo seu desempenho ou comparando alternativas [RONG; ELAYOUBI; HADDADA, 2011].

Alguns dos fatores que justificam o uso de técnicas de simulação são: Possibilidade de atingir níveis de detalhes às vezes não permitidos em um sistema real; economia de tempo e recursos financeiros, trazendo ganhos de produtividade e qualidade; permitir obter

respostas a eventos que não ocorrem naturalmente e com frequência no sistema real, mas que são relevantes.

Atualmente, há uma variedade de simuladores, que vão desde as aplicações mais simples às mais complexas. No caso de simuladores de redes de comunicações, no mínimo, estes devem permitir que os usuários simulem uma topologia de rede, definindo os cenários, especificando os nós da rede, as ligações entre os nós e o tráfego entre tais nós. Sistemas mais complexos podem permitir que o usuário realize modificações profundas nos protocolos utilizados para processar o tráfego de rede.

Existem diversos tipos de simuladores. Os dotados de interface gráfica, que permitem aos usuários visualizar facilmente o funcionamento do seu ambiente simulado, e em contraponto, outros baseados puramente em linhas de código e podem não fornecer nenhuma interface visual ou ainda fornecer uma bem menos intuitiva, mas podem permitir formas avançadas de personalização, o que os torna, via de regra, mais flexíveis.

Entre os diversos simuladores existentes, nesta dissertação a modelagem dos cenários de interesse utiliza o simulador comercial OPNET Modeler 17.5 (*release 8*). A escolha se deu pelo fato de haver um *know-how* (no âmbito dos laboratórios da universidade federal do Pará - LPRAD, LEA, LaPS e LCT) desenvolvido a partir de diversos trabalhos, ao longo dos últimos anos, inclusive culminando com a aquisição de licença do OPNET, em sua versão 17.5, a qual contempla o módulo LTE necessário ao estudo realizado, além do mesmo agregar características primordiais, brevemente descritas neste capítulo.

5.3. OPNET Modeler

O OPNET acelera o processo de pesquisa e desenvolvimento permitindo a análise e concepção de redes de comunicação, dispositivos, protocolos e aplicações. É um simulador largamente utilizado como instrumento para modelagem de redes de telecomunicações [OPNET, 2014a]. Possui um ambiente de trabalho que permite criar uma rede a partir de uma biblioteca de modelos e definir parâmetros não só ao ambiente, como também de cada objeto que a compõe, e os impactos de suas variações.

No âmbito educacional, sua utilização é garantida, pois uma de suas grandes vantagens é a interface gráfica fornecida ao usuário para configurar cenários além da possibilidade didática de visualizar resultados. O OPNET foi desenvolvido pela RIVERBED, uma empresa Norte Americana. [OPNET, 2014a]. Observa-se que todos os resultados, topologia, configuração e simulação podem ser apresentados de forma intuitiva.

Os parâmetros também podem ser ajustados e os experimentos podem ser repetidos facilmente, a partir de operações triviais na GUI (Graphical User Interface), que nada mais é do que um ambiente com todos os parâmetros que se julgue necessário para a realização de cada uma das simulações.

O OPNET tem três funções principais: modelagem, simulação e análise. Para a modelagem, proporciona ambiente gráfico intuitivo para criar todos os tipos de modelos de redes e protocolos. Para simular, ele usa três diferentes tecnologias e simulações avançadas. Além de simulação de eventos discretos, o Modeler oferece duas outras tecnologias de simulação que exigem menos detalhes do que o oferecido por meio da simulação de eventos discretos. A análise de fluxo que oferece modelagem analítica completa, útil para simulações interativas utilizadas em design de rede e análise de falhas, fornece o tempo de execução mais rápido em relação a outras abordagens e escalas para suportar grandes redes e volumes de tráfego. A outra diz respeito a simulação híbrida, onde é oferecido uma combinação de modelagem de tráfego discreto e analítico para simulações altamente detalhadas.

Por fim, para a análise, os dados e resultados da simulação podem ser exibidos de forma facilitada por uma ferramenta integrada, a partir de gráficos e relatórios condensados. De acordo com [OPNET, 2014b] entre as diversas características deste simulador, podem ser destacadas:

- Simulação rápida de eventos discretos
- Biblioteca de componentes com código fonte
- Modelagem orientada a objetos
- Ambiente de modelagem hierárquica
- Suporte a simulações escaláveis
- 32-bit e 64-bit interface gráfica do usuário
- Modelagem sem fio personalizada
- Eventos discretos, híbridos e simulação analítica
- Simulação de *kernel* de 32 bits e de 64 bits em paralelo
- Suporte à computação de alto desempenho
- Depuração e análise baseada em GUI

- Interface aberta para a integração de bibliotecas de componentes externos.

Diante do exposto, a utilização deste simulador se deu em razão da existência do módulo LTE, da facilidade em manusear seus componentes e na exportação de seus dados para o devido tratamento, já que o mesmo possui uma interface gráfica que torna o trabalho mais produtivo e, de certa forma, mais aprazível.

5.4. Metodologia de Simulação Proposta

Para execução deste trabalho, foi necessário elaborar uma metodologia, de forma que a modelagem fosse igualitária na realização dos dois cenários de simulação propostos neste estudo, como também a obtenção de resultados coerentes com os cenários simulados. Desta forma, na figura 5.1, pode-se verificar um fluxograma que descreve a sequência de etapas, a partir das quais o trabalho foi desenvolvido. Obviamente que a metodologia proposta pode ser generalizada para diversos outros problemas do mundo real que possam ser modelados e resolvidos por simulação.

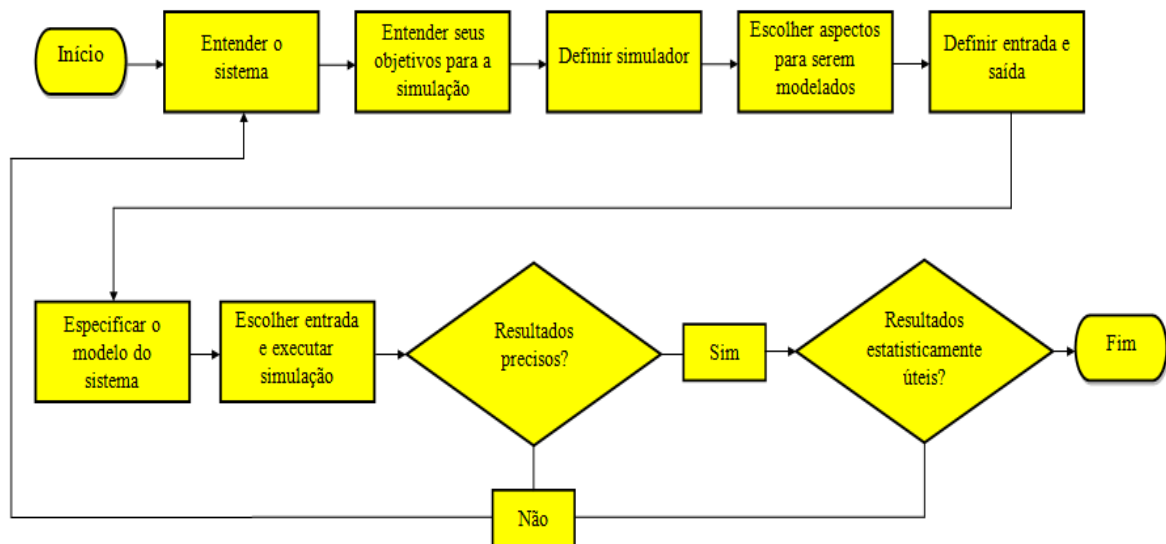


Figura 5.1. Fluxograma da metodologia proposta

O processo de planejamento de rede é realizado com o objetivo de obter-se a maior cobertura de atuação com a menor quantidade de equipamento possível; e ao mesmo tempo, prover a capacidade de rede necessária para atender a demanda de tráfego dos usuários atendidos. Para que tais objetivos sejam alcançados, existem estágios típicos a serem realizados, que incluem a definição dos parâmetros de projeto e otimização.

O primeiro estágio do planejamento consiste em se obter diversas informações relevantes, tais como: a cobertura desejada, a quantidade de usuários e sua respectiva distribuição na região de cobertura, estimativas de tráfego por usuário, serviços a serem

oferecidos, a qualidade de serviço requerida, a capacidade necessária, características de possíveis equipamentos e funcionalidades que podem ser utilizadas.

O resultado final deve ser a mínima densidade de *eNodeB* a ser instalada. Esse estágio usualmente envolve uma simulação para estimar a cobertura e capacidade requerida para os usuários do sistema. A figura 5.2, mostra o processo de estimação de cobertura, onde define-se uma trajetória ao nó móvel e uma velocidade constante de movimentação. O usuário é configurado para iniciar a transmissão no instante 0 e, ao final, coleta-se o instante de tempo em que o usuário para de transmitir. Em seguida, e após obter-se distância percorrida, velocidade e tempo de transmissão, aplica-se a regra matemática de proporção simples, e obtém-se o alcance de cobertura da *eNodeB*.

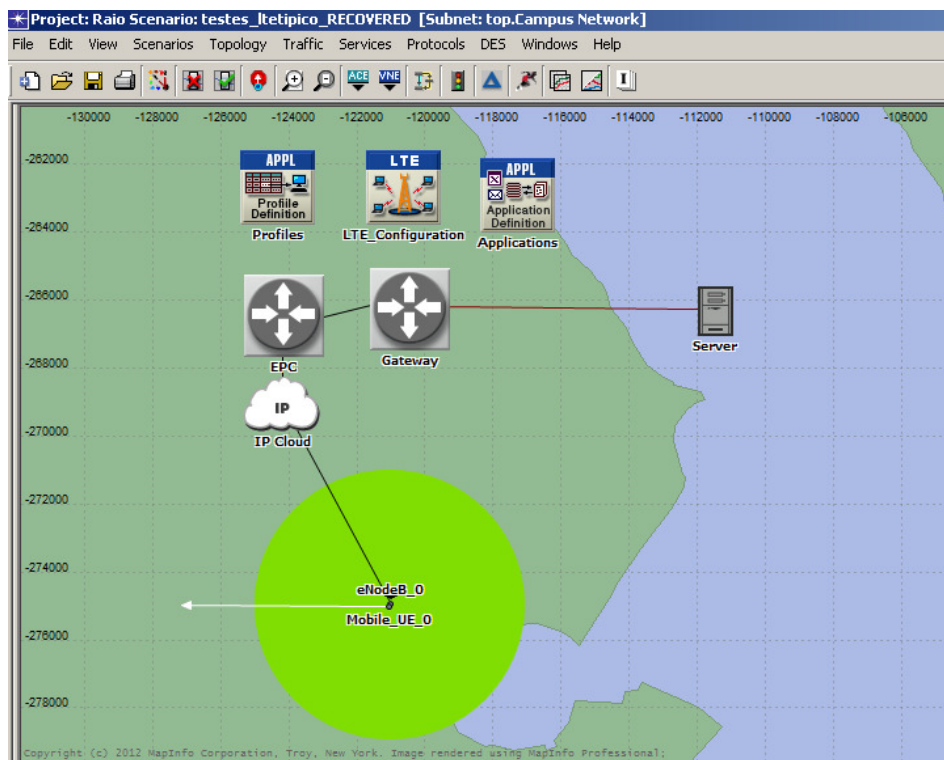


Figura 5.2. Estimação de Cobertura

O planejamento detalhado pode ser dividido em processos que incluem [ABDUL, 2009]:

- Ajuste do Modelo de Propagação - Processo para calibração do modelo de propagação teórico utilizado. Essa calibração geralmente é realizada através da importação nas ferramentas de predições de arquivos obtidos em medições de campo específicas;
- Definição dos Locais de Instalação - Nos sistemas celulares, a seleção de locais para instalação dos equipamentos é um grande desafio. Esse processo

envolve a identificação dos candidatos que podem atender às necessidades de projeto, tais como: KPIs (*Key Performance Indicator*), Cobertura e Capacidade;

- Dimensionamento - O objetivo final desta etapa é o dimensionamento do equipamento (células e *eNodeB*) para atender a demanda de cobertura e capacidade da região a ser atendida;
- Parametrização - Os parâmetros do sistema precisam ser identificados e configurados para o melhor desempenho da rede;

Na figura 5.3 é apresentada uma célula com as características citadas anteriormente, sem a adição de *femtocells*.

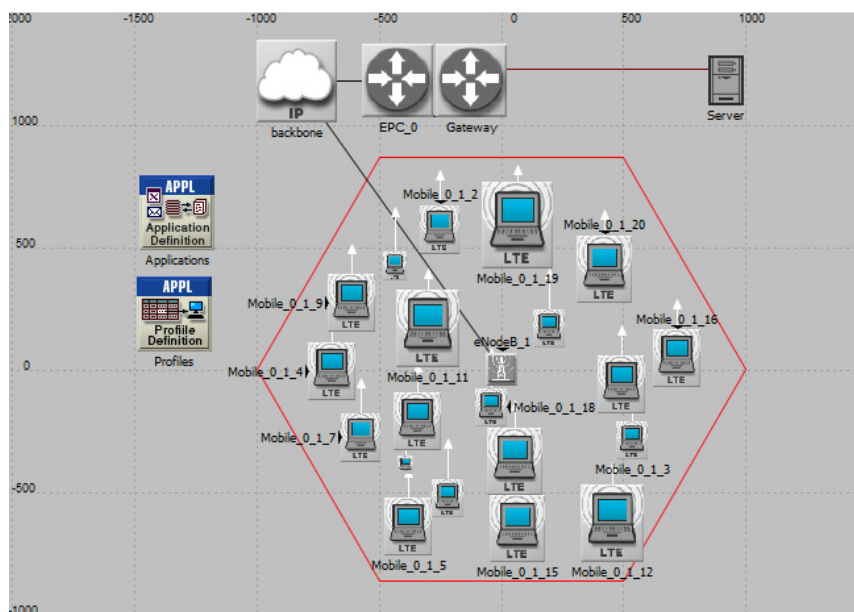


Figura 5.3. Célula sem *femtocell*

A visualização de uma célula do cenário 2 também é demonstrada na figura 5.4, onde a célula é composta da combinação *eNodeB* + *femtocells* onde tem-se 1 *eNodeB* LTE, 9 *femtocells* do tipo aberta, e 20 usuários de teste, cada um deles fazendo uso do serviço VoIP.

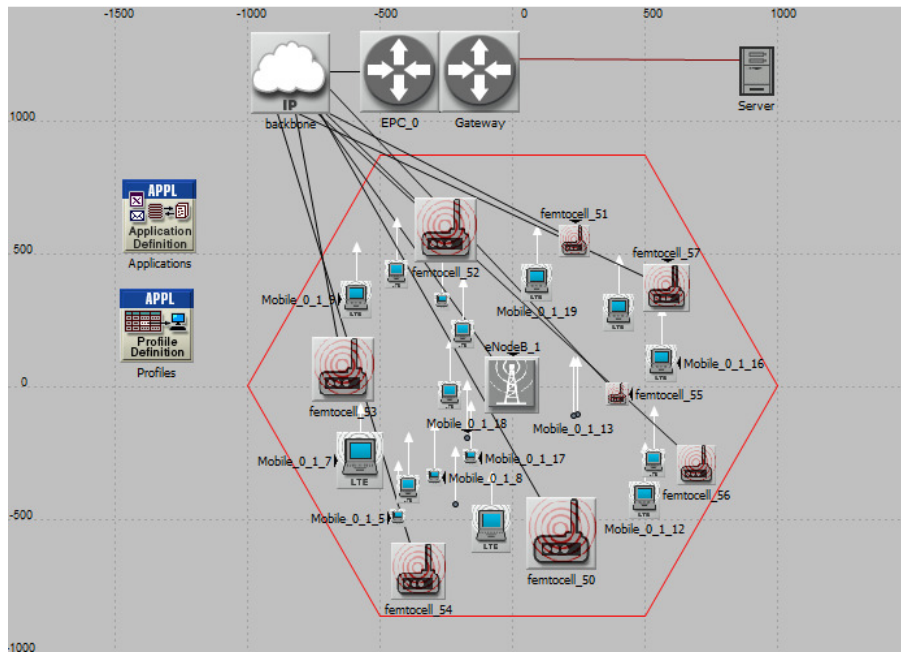


Figura 5.4. Célula LTE + femtocell

5.5. Topologia

Para a realização do trabalho proposto, são necessários alguns dados relativos à topologia de simulação, a configuração de antenas e usuários LTE e, posteriormente, a realização da simulação propriamente dita. A topologia utilizada, como mostra a figura 5.5, é composta por um conjunto de células hexagonais com:

- 5 *eNodeB*
- 7 Quilômetros de raio
- 100 Usuários móveis

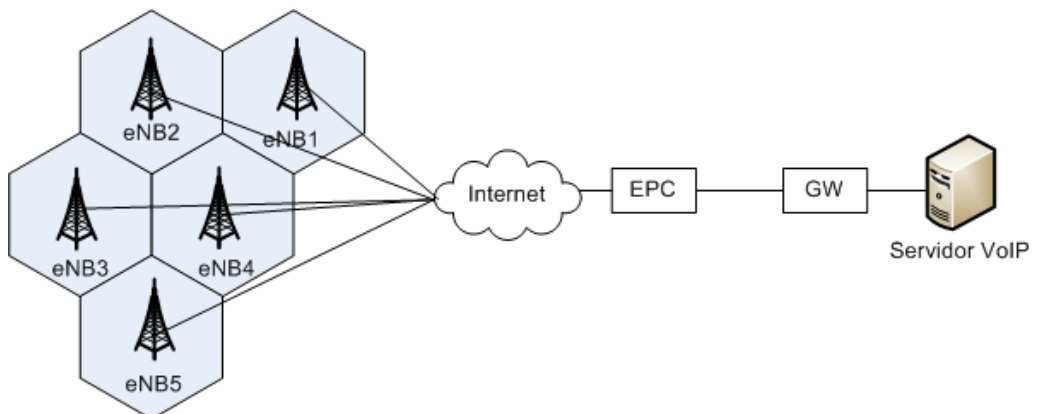


Figura 5.5. Topologia da Simulação

As configurações adotadas para as *eNodeB* LTE podem ser observadas na tabela 5.1. É importante destacar que para obtenção de resultados mais precisos, todos os

parâmetros, tanto os da *eNodeB* quanto os da femtocell, foram adaptados e os modelo de propagação *urban macrocell* e *indoor environment* foram escolhidos em consonância com os mais comumente utilizados na literatura.

Tabela 5.1. Configurações das *eNodeB* LTE. Adaptado de [AL-RUBAYE et al., 2011]

Parâmetro	Valor
Potência	26 dBm
Frequência SC-FDMA (UL)	1920 MHz
Frequência OFDMA (DL)	2110 MHz
Largura de banda	10 MHz
Ganho de Antena	17 dBi
Altura da antena	40m
Raio de cobertura	7 Km
Modelo de Propagação	<i>Urban Macrocell</i>
Duração da simulação	900s

Os parâmetros definidos aos 100 usuários podem ser visualizadas conforme tabela 5.2.

Tabela 5.2. Configurações dos Usuários. Adaptado de [AL-RUBAYE et al., 2011]

Parâmetro	Valor
Antenas LTE	5
Potência	23 dBm
Ganho de Antena	0 dBi
Modelo de propagação	<i>Indoor Environment</i>

5.6. Configurações dos Fluxos

Para geração de tráfego na rede, fez-se uso de uma aplicação VoIP. A aplicação VoIP é utilizada para representar a classe de aplicações inelásticas, em tempo real, interativas que é sensível ao atraso fim-a-fim, mas pode tolerar a perda de pacotes (até 1% de perda [ITU-T, 2013]). Hoje, a emergência de aplicação em tempo real exige mais recursos, portanto, é necessário garantir uma comunicação rápida e confiável de voz para um grande número de usuários na rede.

Os Codecs são responsáveis pela codificação e decodificação entre os dispositivos analógicos e os digitais. Existem diversos tipos de codecs, possuindo cada um características específicas como método de codificação, taxa de compressão e atraso. Nesta aplicação fez-se uso codec GSM FR (*GSM Full Rate*) para tráfego de voz. [ETSI, 1998]

Todos os usuários foram configurados para estabelecer uma chamada VoIP com um servidor externo. Na Tabela 5.3, listamos os parâmetros mais relevantes definidos a partir do próprio padrão do simulador para a configuração da aplicação. Os parâmetros da aplicação foram com base nos próprios padrões disponibilizados pelo simulador.

Tabela 5.3. Parâmetros da aplicação VoIP

Parâmetro	Valor
<i>Silence Length (sec)</i>	<i>Exponentially (0.65)</i>
<i>Talk Spurt Length (sec)</i>	<i>Exponentially (0.352)</i>
<i>Encoder Scheme</i>	<i>GSM (silence)</i>
<i>Voice Frames per Packet</i>	1
<i>Type of Service</i>	<i>Best effort (0)</i>
<i>(De) Compression Delay</i>	0.02

5.7. Definição de mobilidade

O processo de *handover* está relacionado ao acesso, recursos de rádio e controle da rede, tendo um impacto significativo na capacidade e desempenho do sistema. Para as análises realizadas neste trabalho, dois cenários idênticos foram criados, porém, um sem utilização de *femtocell* e outro com a inserção de 9 *femtocells* por célula. A configuração e parametrização das *femtocells* estão contidas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4. Parâmetros das *femtocells*. Adaptado de [AL-RUBAYE et al., 2011]

Parâmetro	Valor
Potência	23 dBm
Ganho de Antena	2 dBi
Altura de Antena	1m
Modelo de propagação	Indoor Environment

Quanto à mobilidade, assumiu-se para todos os 100 usuários da rede o modelo *random waypoint* [CAMP; BOLENG; DAVIES, 2002]. O modelo de mobilidade é um fator de grande importância e possui grande influência no desempenho e no projeto da rede.

O modelo *Random Waypoint* faz com que o nó móvel permaneça parado em um ponto no ambiente de simulação durante um determinado período, uma vez transcorrido este tempo, o nó escolhe uma velocidade e posição aleatória no cenário como destino, esses valores são escolhidos de modo a serem uniformemente distribuída entre valores predefinidos. O processo é reiniciado quando o nó chega ao ponto de destino [CAMP; BOLENG; DAVIES, 2002].

O cenário de simulação, figura 5.6, também nos mostra a estrutura da rede LTE, composta pelos EPC e *gateway* que farão a comunicação com o servidor de aplicação.

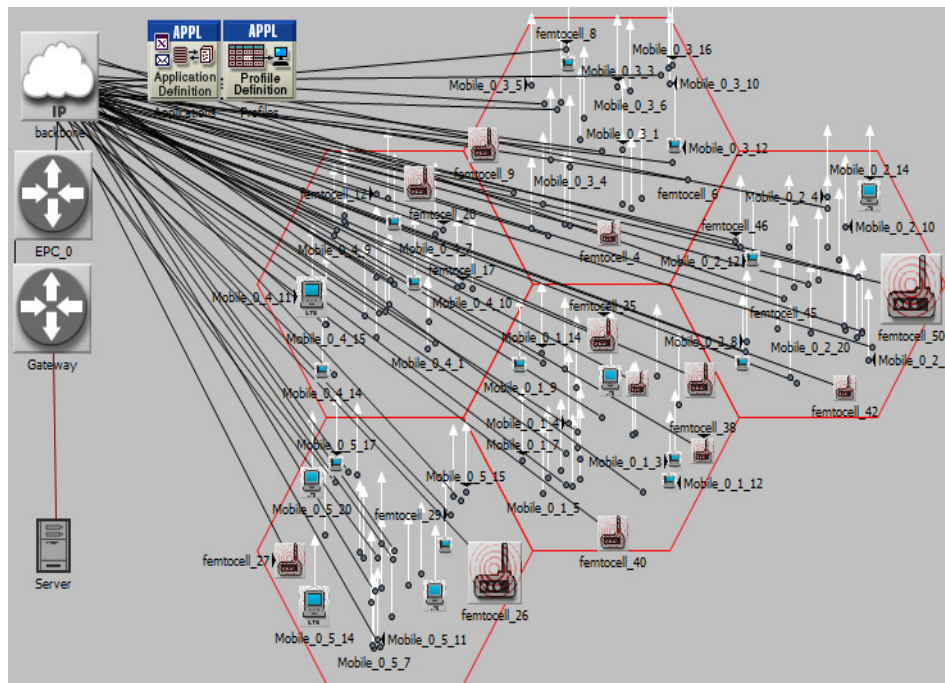


Figura 5.6. Cenário modelado na simulador OPNET

5.8. Indicadores de Desempenho de *Handover* (HPI)

Nesta seção, são descritas as principais métricas de avaliação utilizadas como indicadores de desempenho de *handover*. As métricas são apresentadas a seguir.

Handover Delay: A partir desta estatística é possível identificar o tempo decorrido para o processo de *handover*. Indiretamente, essa métrica também indica o número de *handover* realizados, assim como também o posição no tempo onde ocorre o atraso para o *handover* ocorrido com sucesso.

Handover Failure: A relação de falha no *handover* (HF) é a razão entre o número de *handovers* que falharam (NHfail) sobre o número de tentativas realizadas [JANSEN, 2010]. Onde o número de tentativas de *handover* é dado pela soma do número de *handover* que falharam (NHfail) mais o número de *handovers* com sucesso (NHsuc).

$$HPI_{HF} = \frac{NHfail}{(NHfail + NHsuc)} \quad (1)$$

Blocking Probability: A probabilidade de bloqueio é a relação entre o número de falhas (Nfail) sobre o número de falhas totais (falhas de radio + falhas de *handovers*) somado ao número total de *handover* (TH) adaptado de [BASHARIN, 2003].

$$HPI_{BP} = \frac{Nfail}{((RadioFail - NHfail) + TH)} \quad (2)$$

5.9. Análises dos Resultados

Com o levantamento das configurações iniciais realizadas no OPNET, a simulação então foi realizada. Foram executadas diversas instâncias de simulação, a repetição dos cenários ocorreu com mesma configuração, mesma duração, mesmos parâmetros de entrada, porém com semente de geração de números aleatórios diferente.

O tempo de simulação foi de 15 minutos - tempo esse tido como suficiente para que o ambiente apresentasse um comportamento estável e os usuários de testes pudessem percorrer a trajetória estabelecida. No entanto, devido ao cenário de alta mobilidade proposto, as simulações demandaram um tempo computacional extremamente alto, em média 6 dias para cada simulação de 15 minutos.

Na Figura 5.7, observa-se o gráfico obtido diretamente do OPNET. Tal gráfico, expressa uma visualização conjunta de duas métricas fundamentais para análise dos indicadores de desempenho *handover*. A associação de *eNodeB*, que permite visualizar em que instante de tempo e em quais *eNodeB*, o usuário se associou; e, na mesma figura e no mesmo instante de tempo, o *handover delay* é exposto, identificando os atrasos dos *handovers* realizados com sucesso. Tanto As *eNodeBs* a qual o usuário se associa, quanto os pontos em que ocorreram *handover*, são dispostos na figura tendo como eixo x, o tempo de simulação.

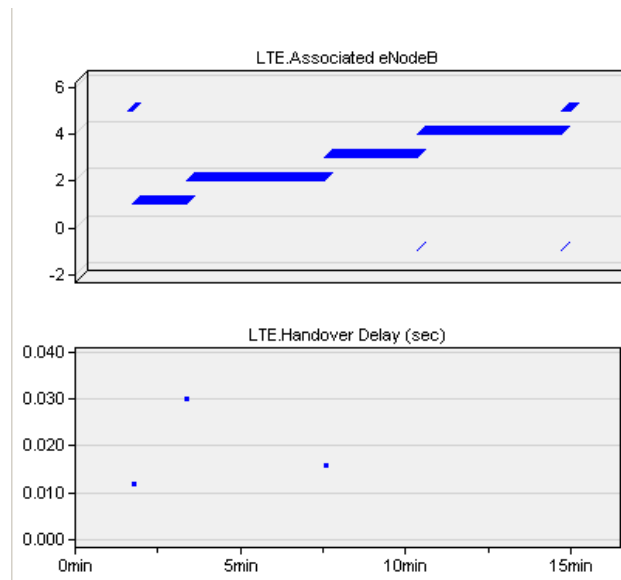


Figura 5.7. Associação de *eNodeB* e *handover delay*

Os resultados obtidos são indicativos e tendências dos mecanismos que de fato impactam no desempenho do sistema. Alguns dos parâmetros variáveis incluem a velocidade de utilizador, o tipo de tráfego, a aplicação, entre outros.

Na análise realizada, os 100 usuários móveis foram inicialmente observados de forma individual, já que cada usuário percorreu uma trajetória aleatória, o que garantiu números de falhas e de *handovers* específicos a cada um.

Os resultados aqui apresentados demonstram um comparativo dos dois ambientes simulados, ou seja, cenário com e sem *femtocell*. A análise permite inferir que, a partir da implantação de *femtocells* na rede, os usuários passam a realizar um número muito maior de *handovers* desnecessários, o que impacta fortemente nos indicadores de desempenho de *handover*. O comparativo entre ambas as abordagens pode ser visualizado na Tabela 5.5.

A taxa de falha de *handover* sofre um adicional de 61%. Já a probabilidade de bloqueio teve um acréscimo de rejeição de aproximadamente 50% a mais após a inserção de

femtocells na rede.

Tabela 5.5. Indicadores de Desempenho de *Handover*

Estatística	Cenário LTE (%)	Cenário LTE+ <i>Femtocell</i> (%)
<i>Handover Failure</i>	0,1	0,71
<i>Blocking Probability</i>	0,259	0,764

Alguns indicadores de QoS foram coletados para avaliar o comportamento experimentado pelos usuários e permitir avaliar a correlação entre os indicadores de *handover* e QoS obtidos. Nota-se que a implantação de *femtocells* não representou uma melhoria significativa sobre os parâmetros de QoS, o que será melhor observado no detalhamento dos resultados de *Delay*, MOS e *Jitter*.

A avaliação do comportamento geral dos 100 usuários pode ser visualizada na figura 5.8, a qual mostra o *delay* ocorrido nos dois cenários. Nota-se que não houve grande variação, já que ambos tiveram um comportamento em torno dos 200 ms.

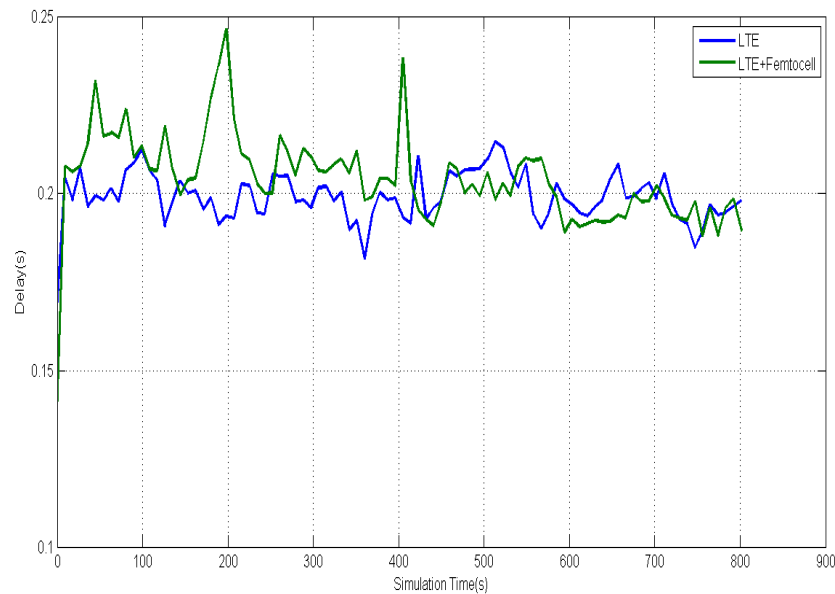


Figura 5.8. Atraso da aplicação VoIP

As figuras 5.9 e 5.10, respectivamente, expressam os valores de MOS (*Mean Opinion Score*) e *jitter* obtidos. O MOS é uma medida clássica de qualidade de voz, uma indicação numérica da qualidade subjetiva de voz, variando de 1 (qualidade baixa) a 5 (qualidade excelente). Na tabela 5.6, a escala para avaliação subjetiva de qualidade de voz é expressa.

Tabela 5.6. Escala para avaliação Subjetiva de Qualidade de Voz [TR-126, 2006]

Pontuação (MOS)	Entendimento de Voz	Distorção
5	Excelente	Imperceptível
4	Boa	Apenas perceptível, sem incomodar
3	Regular	Perceptível, leve perturbação
2	Pobre	Perturbando, mas audível
1	Ruim	Perturbando muito, inaudível

Nos cenários propostos, a rede conta com um número significativo de usuários móveis e o cálculo do MOS tomou por base a média dos 100 usuários de teste. O gráfico mostra que o MOS alcançado foi considerado pobre, pois teve comportamento médio em torno de 1,5, mesmo após a inserção de *femtocells*.

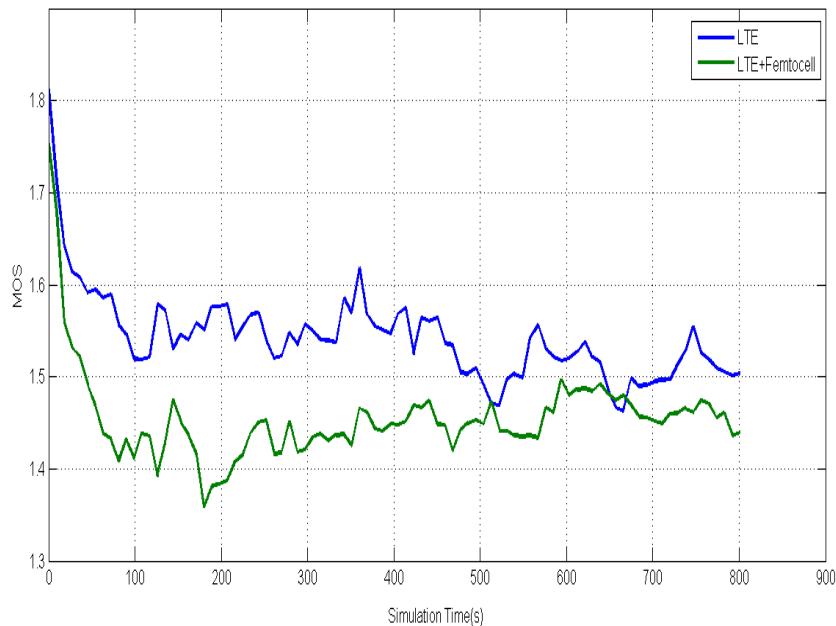


Figura 5.9. MOS da aplicação VoIP

O *jitter*, que consiste na variação do atraso de transmissão, é um dos principais fatores que causa degradação da qualidade em uma comunicação de voz sobre IP. As aplicações VoIP geram pacotes em intervalos regulares, mas após passarem pelos roteadores da rede intermediária, os intervalos de tempo entre os pacotes se tornam totalmente irregulares.

A seguir o *jitter* é ilustrado. O gráfico mostra que as variações de tempo da chegada do pacote de voz ao destino não excedeu 5ms.

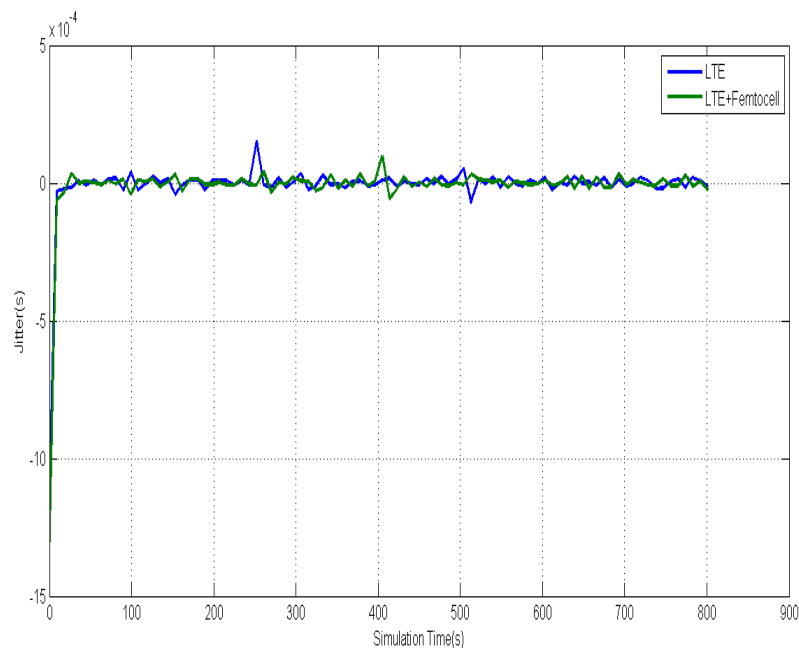


Figura 5.10. Jitter da aplicação VoIP

Portanto, diante dos cenários propostos e dos parâmetros adotados, o estudo de caso realizado, baseado na metodologia elaborada nesta dissertação, aponta para uma ineficiência da utilização de *femtocells*. Até que ponto a solução de *femtocells* é de fato aplicável? Considerando a questão da viabilidade dessa integração como interface para melhoria da cobertura e qualidade de serviço em ambientes indoor.

5.10. Considerações Finais

Neste capítulo detalhou-se a metodologia, as configurações das *eNodeB* LTE, das *femtocells*, a configuração dos fluxos da aplicação e os cenários de estudo. Após as simulações realizadas, os dados obtidos foram tratados, para composição dos gráficos e tabelas utilizados no estudo comparativo aqui descrito. Por fim, as métricas de *handover* e de QoS foram analisadas.

Com as análises preliminares obtidas neste trabalho, percebe-se que a integração de LTE e *femtocell* não foi vantajosa da forma que se esperava. Para os parâmetros propostos e para os cenários definidos esperava-se que a inserção de *femtocells*, garantissem no mínimo a melhora nos indicadores de qualidade de serviço.

Os resultados reforçam a necessidade de habilidades de auto-configuração para provisionamento correto das *femtocells*, assim como mitigar a degradação do desempenho resultante da interferência entre *macrocell* e *femtocells* e entre *femtocells*, quando as implantações forem densas e sem planejamento. Sem essas habilidades a implantação em

massa torna-se inviável, ocasionando prejuízos quanto aos indicadores de QoS, de *handover* e no *overhead* de sinalização associados aos procedimentos de mobilidade.

Apesar dos predicados, o uso dessas pequenas células não se apresentou, para o cenário estudado, como uma panacéia. A gerência do mecanismo de *handover*, interferência e auto-configuração são ainda desafios de grande relevância para o sucesso dessa integração.

Por fim ressalta-se que tal estudo não possui pretensão de ser conclusivo, mas sim inserir outros parâmetros na discussão importante e contemporânea do uso indiscriminado de *femtocells* como alternativas ao sistema celular tradicional.

Capítulo 6 – Conclusão

Com a evolução das comunicações móveis e o surgimento de novas aplicações, mais exigentes em termos de largura de banda, tornam-se indispensáveis estudos sobre os parâmetros de qualidade de serviço e influência da mobilidade dos usuários em tais sistemas.

Como reflexo, a procura de serviços de banda larga móvel por parte dos utilizadores tem crescido de forma contínua e a um ritmo exponencial, fazendo com que as operadoras estejam com constantes investimentos em soluções, para prover aumento de capacidade em redes móveis. Nesse contexto, a adoção de *femtocells* vem sendo proposta como uma possível alternativa para atender a essas limitações.

Esta dissertação apresentou um levantamento do estado da arte das áreas envolvidas na pesquisa, a partir de buscas realizadas em periódicos, conferências e em grupos de pesquisa/instituições de referência. Por conseguinte, realizou-se um *overview* acerca das diversas técnicas e ferramentas de avaliação de desempenho (aferição, solução por modelagem analítica e por simulação), compreendendo também questões relevantes relacionadas à qualidade de serviço, indicadores de *handover*, planejamento, implantação e otimização da integração de *femtocell* em redes LTE.

Este estudo teve por objetivo promover uma discussão quanto à efetividade da integração de *femtocell* em redes LTE, considerando a questão da viabilidade da tecnologia como uma interface para melhoria da cobertura e qualidade de serviço em ambientes *indoor*. Para tanto, uma metodologia foi proposta e elaborada e um conjunto de simulações foi realizado, utilizando-se a ferramenta OPNET Modeler.

As simulações permitiram analisar como as tecnologias de acesso testadas se comportam em situações específicas para um cenário de grande mobilidade, como é esperado ser em um sistema real. Para tanto, utilizou-se um cenário somente com antenas LTE e as comparou em iguais condições, em um cenário contendo antenas LTE e antenas *femtocells*. A partir dessa análise, foi possível extrair indicativos e tendências dos mecanismos que, de fato, impactam no desempenho do sistema.

O trabalho conclui com um questionamento em aberto: até que ponto a solução de *femtocells* é de fato aplicável e plenamente eficaz? Existem ainda diversas outras questões a

serem analisadas para garantir que o uso dessa tecnologia possui uma relação custo/benefício favorável.

O estudo de caso realizado apresenta resultados preliminares, nos quais, para os parâmetros e cenários propostos, a integração de *femtocells* não foi vantajosa, tanto quanto era esperado.

6.1. Contribuições da Dissertação

Como principais contribuições desta dissertação, destacam-se:

- A proposta de uma metodologia para o estudo de avaliação dos impactos da utilização de *femtocells* em um cenário LTE, podendo ser generalizada para diversos outros problemas do mundo real que possam ser modelados e resolvidos por simulação.
- A metodologia proposta, comporta-se de forma flexível, podendo incorporar um conjunto de outras variáveis aleatórias, de acordo com a função densidade ou estudo de interesse, permitindo a geração de inúmeros cenários de simulação.
- A realização de um estudo aprofundado da tecnologia LTE, compreendendo as principais características, parâmetros envolvidos e caracterização de *femtocells* no simulador OPNET.
- Por intermédio da utilização das métricas de QoS e *handover* obtidas, foi possível realizar um estudo da utilização de *femtocells* em um cenário LTE, avaliando contrapontos, vantagens e desvantagens, que as *femtocells* geram dentro de um cenário de alta mobilidade.
- A investigação de estratégias que garantam suporte ao crescente tráfego móvel, contribuindo principalmente na discussão da efetividade da utilização de *femtocells* como solução.
- A realização de estudo pioneiro do módulo LTE no simulador OPNET, no que concerne ao âmbito dos laboratórios LPRAD, LEA, LaPS e LCT, compreendendo sobretudo aspectos de parametrização, modelagem e simulação de *femtocells* em rede LTE.
- Identificação dos parâmetros mais relevantes relativos ao processo de seleção de células e *handover*, tais como RSRP, QoS, nível de utilização das *eNodeB* assim como também, indicadores de desempenho de *handover* tais como: *handover delay*, *handover failure* e *blocking probability*.

- A partir do Programa de Cooperação Acadêmica (PROCAD/CAPES), a autora desta dissertação passou parte do período deste trabalho de mestrado na cidade de São José dos Campos – SP, onde realizou estudos no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e no Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA). Como resultado e contribuição, fortaleceram-se os laços de cooperação entre as instituições UFPA, INPE e ITA;
- A divulgação do trabalho por meio de publicação de artigos em conferência internacional, onde são apresentados a proposta e os resultados do estudo de caso desta dissertação. Estes artigos foram aceitos e serão publicados no primeiro semestre de 2014. Os artigos são listados abaixo:
 - SILVA, K. C., VIJAYKUMAR, N. L., FRANCÊS, C. R. L., SILVA, C.P.A., DONZA, A.C.S., *Analysis of Handover Based on the Use of Femtocells in LTE Networks*. Aceito e apresentando na IRCEM: 2014 *International Research Conference on Engineering, Science and Management*, Dubai, UAE, Junho de 2014.
 - SILVA, K. C., VIJAYKUMAR, N. L., FRANCÊS, C. R. L., SILVA, C.P.A., DONZA, A.C.S., *An approach for analysis the impact of LTE-based femtocell network - Case study based on discrete simulation*. Aceito para publicação na ICWN: 2014 *International Conference on Wireless Networks*, Las Vegas, Nevada, USA, Julho de 2014.

6.2. Trabalhos Futuros

Como possíveis desdobramentos deste trabalho, seria de grande relevância o estudo de técnicas de otimização combinatória e de modelos de inteligência computacional para controlar e otimizar parâmetros de *handover* em redes LTE com *femtocell*. Definir cenários de interesse, particularizando-se para cenários críticos de grande mobilidade, afim de obter a diminuição dos efeitos negativos na rede, tais como: falhas de *handover*, quedas de chamada, probabilidade de bloqueio entre outras.

A proposição de soluções que buscam diretamente ou indiretamente o balanceamento de Carga em redes LTE também vem se consolidando como uma área de intensa investigação pela comunidade científica. Os aspectos quanto a busca por uma maior automação das *eNodeB*, melhor planejamento e utilização dos recursos disponíveis na célula, além da redução de custos, motivam as concessionárias a aperfeiçoar continuamente

o desempenho de suas estratégias de planejamento. Portanto através da utilização de técnicas de aprendizado de máquina e tomada de decisão, o desenvolvimento de políticas ótimas para seleção de célula e *handover* seria de grande contribuição.

Também sugere-se a investigação do comportamento das *femtocells* de acesso aberto, já que nesse modo de funcionamento todos os usuários têm acesso aos recursos. Este tipo de acesso pode ter inúmeras implicações, a exemplo a instalação dessa solução em ambiente públicos. Sabendo que existem operadoras que têm as *femtocells* funcionando na mesma frequência que a rede *macrocell* UMTS, seria importante avaliar o comportamento em termos de interferência, e verificar as vantagens e desvantagens desta opção de configuração de acesso.

Pesquisas quanto as implicações do crescimento desordenado de *femtocells* é outra sugestão. Como não há uma política de gestão eficiente para implementações *femtocells* em grande escala, a avaliação do controle da gestão dos recursos rádio dos HNBS, é um fator importante quando colocado num ambiente com elevado número de utilizadores. Qual o número de *femtocells* que a rede suporta de forma a não degradar os indicadores de performance de *handovers*? Até que ponto o número de *femtocells* pode crescer desordenadamente sem impactar na qualidade de serviço? A interferência gerada será minimizada ao ponto de garantir de fato melhor cobertura e taxas de dados?

Por fim, a importância em avaliar modelos para planejamento de capacidade para sistemas celulares, sobretudo investigando estratégias para minimizar o consumo de energia, mantendo níveis aceitáveis de qualidade de serviço também é significativo. A partir da realização de simulações ou da implementação de modelos markovianos buscar métodos de otimização do consumo de energia elétrica nos ambientes onde há o crescente tráfego de Internet gerado pela telefonia celular de banda larga.

6.3. Dificuldades Encontradas

- A principal dificuldade que norteou o trabalho, foi em avaliar os indicadores de desempenho de *handover*. Mesmo sendo a análise do procedimento de *handover* um estudo imprescindível, o simulador não contemplam métricas específicas para essa avaliação. Neste trabalho todos os 100 usuários de teste foram analisados individualmente quanto a quantidade de falhas ocorridas, falhas de *handover*, e

handovers com sucesso. Após esse levantamento os dados foram tratados e as médias foram obtidas através do software MATLAB.

- A criação e modelagem da estrutura *femtocell* no módulo LTE também necessitou de um minucioso trabalho. Isso porque, um arranjo na *ENodeB* LTE precisou ser feito para que as características *femtocell* pudessem ser representadas. No módulo LTE, novos aspectos precisaram ser levados em consideração, tais como estimação da área de cobertura e quantidade de usuários suportados por *femtocell*. Por se tratar de ser um software comercial, o OPNET não oferece tantos detalhes quando as suas arquiteturas.
- No que diz respeito as parametrizações quanto a modelo de propagação, antenas e usuários também necessitou de muita atenção. O OPNET contemplava valores por default para cada estrutura, no entanto quando comparados com valores de referência da comunidade científica, era possível observar valores não tão próximos dos reais. Nesse sentido um levantamento foi realizado para que as configuração das estruturas nos cenários aqui apresentados fossem os mais aproximados possíveis, pois sabe-se que os resultados dependem muito da sintonização dos parâmetros da camada física e do modelo de propagação utilizado.
- Para garantir um cenário com alta mobilidade, fez-se uso do de Modelo de amplamente utilizado para tais fins, o *random waypoint mobility*. O problema de tentar modelar a movimentação de usuários é bastante complexo pois tem como objetivo prever o comportamento humano quanto à sua mobilidade.
- No momento em que define-se um determinado perfil de comportamento, temos a possibilidade de avaliar o processo de geração de requisições de alocação de canal uma vez que cada procedimento de *handover* gera uma nova requisição de canal na célula destino. Contudo o impacto dessa escolha foi significativo no tempo computacional para as simulações realizadas, aproximadamente 6 dias para cada simulação de 15 minutos.

Referências

- 3G AMÉRICAS. Disponível em: <<http://www.3gamericas.org/>>, acesso em 23 Mar 2014.
- 3GPP TS 36.214 V8.2.0 (2008-03), *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA). Physical Layer-Measurements (Release 8)*. 2008.
- 3GPP TS 136.300 V8.12.0, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN). Overall Description; Stage 2. (Release 8)* 2010a. Disponível em: <http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136300_136399/136300/08.12.00_60/ts_136300v081200p.pdf>, acesso em 23 mar. 2014.
- 3GPP TS 25.467, UTRAN architecture for 3G Home NodeB (HNB); Stage 2; (Release 9), 2010b.
- 3GPP TS 36.300 V10.1.0, *Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (Release 10)*. 2010c. Disponível em: <<http://www.qtc.jp/3GPP/Specs/36300-a10.pdf> >, acesso em 23 fev. 2014.
- 3GPP, TR 36.331, section 5.3.11, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC)*; 2010d. Protocol specification. Technical Report. Disponível em: <www.3gpp.org>, acesso em 24 fev. 2014.
- 3GPP. ETSI TS 122.220, *Service requirements for Home Node B (HNB) and Home eNodeB (HeNB)*. 3GPP Technical Specification. 2011.
- 4G AMÉRICAS. *Inside 3GPP Release 12: Understanding the Standards for HSPA+ and LTE-Advanced Enhancements*. White Paper, 2014. Disponível em: <http://www.4gamericas.org/documents/Executive%20Summary_3GPP%20Release%2012_FINAL%283%29%20%282%29.pdf>. Acesso em 22 abril 2014.
- ABDUL, S. B. *Dimensioning of LTE Network – Description of Models and Tool, Coverage and Capacity Estimation of 3GPP Long Term Evolution radio interface*. Tese (Mestrado em Ciência da Tecnologia) Helsinki University of Technology. Espoo, 2009.

- ALI-YAHIYA, T. *Understanding LTE and its Performance*. Springer New York Dordrecht Heidelberg. London, 2011.
- AL-RUBAYE, S.; AL-DULAIMI, A.; COSMAS, J. *Cognitive Femtocell, Future Wireless Networks for Indoor Applications*. IEEE Vehicular Technology Magazine. 2011.
- ANATEL, Agência Nacional de Telecomunicações. *Brasil fecha março de 2014 com 273,58 milhões de acessos móveis*. 2014. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/Portal/exibirportalinternet.do>>. Acesso em: 24 abril 2014.
- ANATEL. *Agência Nacional de Telecomunicações*. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br>>, acesso em 23 mar. 2014.
- ANDREWS, J. G.; et al. *Femtocells: Past, Present and Future*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Volume 30 no.3, 2012.
- AZIZ D.; SIGLE, R. *Improvement of LTE Handover Performance through Interference Coordinatination*. IEEE 69th Vehicular Technology Conference, 2009.
- BĂLAN, I. M., et al. *An enhanced weighted performance-based handover parameter optimization algorithm for LTE networks*; EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, , Volume 2011, Number 1, Page 1. 2011.
- BASHARIN, G. P.; MERKULOV, V. E. *Blocking Probaility Analysis of New and Handover Calls in Cellular Mobile Networks with Repeated Attempts*. Proceedings of the 7th International Conference on Telecommunications, vol. 1, 2003, pp. 273 – 278.
- BOLCH, G. et al. *Queuing Networks and Markov Chains: Modeling and Performance Evaluation with Computer Science Applications*. New York: John Wiley & Sons, 1998.
- BROADBAND. Disponível em: <www.broadband-forum.org>, acesso em 18 out. 2013.
- CALIN D.; CLAUSSEN H.; UZUNALIOGLU H. *On femto deployment architectures and macrocell offloading benefits in joint macro-femto deployments*. IEEE Commun. Mag. 48(1), 26–32. 2010.
- CAMP T.; BOLENG J.; DAVIES V. *A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research*, Wireless Communications and Mobile Computing, vol. 2, no. 5, pp. 483–502, 2002.

- CARVALHO I. A. M. *Simulação Sistêmica de Redes Celulares 3GPP LTE com a Utilização de Femtocélulas*. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia De Redes De Comunicação). Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília. Brasília, 2011.
- CHANDRASEKHAR, V.; ANDREWS, J. G.. Femtocell Networks: A Survey. IEEE Communication Magazine, Vol. 46, Issue 11, 2008.
- CHEN, J. et al. *Femtocells –Architecture & Network Aspects*, Whitepaper, 2010; Disponível em: <<http://www.qualcomm.com/media/documents/files/femtocells-architecture-network-aspects.pdf>>, acesso em 23 jan. 2014.
- CHOI, D. et al. *Dealing with loud neighbours: The benefits and tradeoffs of adaptive femtocell access*. IEEE. Global Telecommunications Conference, Nova Orleans, 2008.
- CHOWDHURY, M. Z.; BUI, M. T.; JANG, Y. M. *Neighbor cell list optimization for femtocell-to-femtocell Handover in dense femtocellular networks*. Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), Third International Conference on , vol., no., pp.241,245, 15-17. 2011.
- CHUEH, H.; CHANG, F; KAO. S. *A beacon-based handover scanning mechanism with QoS support in WiMAX FemtoCell architecture*. Computer Science & Education (ICCSE), 6th International Conference on , vol., no., pp.1069-1074, 3-5. 2011.
- CISCO, *Cisco Virtual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2013-2018*. Disponível em: <http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_c11-520862.html>. Acesso em 05 abril 2014.
- CLAUSSEN, H., HO, L. T. W.; SAMUEL, L. G. *An overview of the femtocell concept*. Bell Labs Technical Journal, 13: 221–245. 2008.
- CORNELIO, J. B. M. *Inovações Tecnológicas no Setor de Telecomunicações no Brasil: Desafios e Oportunidades do LTE para expansão da Telefonia Móvel*. Dissertação (Mestrado Internacional de Gerenciamento), Escola Brasileira de Administração Pública e de Empresas da Fundação Getúlio Vargas, Centro de Formação Acadêmica e Pesquisa. Rio de Janeiro, 2011.

- CORTÉS, O. A. C. *Desenvolvimento e Avaliação de Algoritmos Numéricos Paralelos*. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação e Matemática Computacional). Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.
- COSTA, A. B. et al. *The Femtocell as Return Channel: A Proposal for Brazilian Amazon Region Interactive Digital TV* Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies, 6th International Conference, Paris, 2012.
- DAHLMAN, E.; PARKVALL S.; SKÖLD, J.; BEMING, P. *3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband*. Elsevier Science, 2007.
- DAHLMAN, E.; PARKVALL, S.; SKOLD, J. *4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*. Academic Press, Elsevier Science, 2011.
- DATAPREV. *TV Digital Social da Dataprev recebe título internacional de inovação*. Dataprev. 2011 Disponível em: <<http://portal.dataprev.gov.br/tag/tv-digital/>>, Acesso em: 12 Maio 2014.
- DEMIRDOGEN, I.; GÜCENÇ, I; HÜSEYİN A. *A Simulation Study of Performance Trade-offs in Open Access Femtocell Networks*. IEEE 21st International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Workshops, 2010.
- ETSI - European Telecommunications Standards Institute. *Digital cellular telecommunications system*. 1998.
- EXPLORE GATE. Disponível em: <www.exploreagate.com>, acesso em 19 out. 2013.
- FEMTO-FORUM, *RFC 4301: Security Architecture for the Internet Protocol*, White Paper, 2005; Disponível em: <<https://datatracker.ietf.org/doc/rfc4301/>>, acesso em 26 fev 2014.
- FEMTO-FORUM. Disponível em: <www.femtoforum.org>, acesso em 20 out. 2013.
- FEMTO-FORUM. *Interference Management in OFDMA Femtocells*, White Paper, 2010. Disponível em: <www.femtoforum.org>, acesso em 12 Out. 2013.

- FRANCÊS, C. R. L. *Statecharts Estocásticos e Queuing Statecharts – Novas Abordagens para Avaliação de Desempenho Baseadas em Especificação Statecharts*. 2001. Tese (Doutorado em Ciência da Computação e Matemática Computacional). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.
- FUTURECOM. Disponível em: <www.futurecom.com.br>, acesso em 20 out. 2013.
- GAGO, A. C. G. *Análise Do Impacto Da Utilização De Femto-Células em LTE*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica e Telecomunicações) Instituto Superior De Engenharia De Lisboa, 2013.
- GUEDES, L. C. S.; VASCONCELO, R. R. *UMTS, HSPA e LTE*. 2009. Disponível em: <http://www.gta.ufrj.br/grad/09_1/versao-final/umts/lte.html>, acesso em: 17 mar 2014.
- HAREL, D. *Statecharts: A Visual Formalism for Complex Systems*. The Science of Computer Programming, vol. 8, no. 3, pp. 231-274. 1987.
- HARIYANTO, H. et al. *Backhaul-aware scheduling for WiMAX femtocell with limited backhaul capacity*. IEEE Region 10 Conference , vol., no., pp.1280,1284, 21-24 Nov. 2011.
- HO, L.T.W.; CLAUSSEN, H. *Effects of User-Deployed, Co-Channel Femtocells on the Call Drop Probability in a Residential Scenario*. The 18° Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Communications. Atenas, 2007.
- HOLMA, H.; TOSKALA, A. *LTE for UMTS OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*. John Wiley & Sons, New York, 2009.
- HU, L.; GORTON, I. *Performance Evaluation for Parallel Systems: A Survey*. Sydney, Australia: University of NSW, School of Computer Science and Engineering, Department of Computers Systems, 1997.
- ITU. Disponível em: <www.itu.int>, acesso em outubro de 2013.
- ITU-T Recommendation G. 1010, *End-User Multimedia QoS Categories*, 2013.
- JAIN, R. *The art of computer systems performance analysis: techniques for experimental design, measurement, simulation, and modeling*. John Wiley. New York, 1991.

- JANSEN, T. et al. *Handover parameter optimization in LTE self-organizing networks*, in *IEEE 72nd Veh. Technol. Conf. Fall*, 2010. pp.1-5.
- KHALID, W.; KWAK, K. S. *Handover optimization in femtocell networks*. IEEE. ICT Convergence. Jeju Island, 2013.
- KLEINROCK, L. *Queueing Systems*. New York: John Wiley & Sons, 1975.
- KOROWAJCZUK, L.; *LTE, WiMAX and WLAN Network Design, Optimization and Performance Analysis*. Wiley, 2011.
- KOVACS, Z. L., *Teoria da Probabilidade e Processos Estocásticos*. Edição acadêmica. 1996.
- LATHAM, M. *Consumer attitudes to femtocell enabled in-home services-insights from a european survey*. Femtocells Europe. Londres, 2008.
- LEE, T. et al. *Resource allocation analysis in OFDMA femtocells using Fractional Frequency Reuse*. Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Workshops, in IEEE 21st International Symposium. Istanbul. 2010.
- LETOURNEUX, F., et al. *3D Performance analysis of a heterogeneous LTE network with indoor small-cells in a real urban environment*. In IEEE International Conference on Communications (ICC). 2013.
- LEWIS, H. R., PAPADIMITRIOU, C. H. *Elements of the Theory of Computation*. Segunda Edição. Prentice Hall, 1997.
- LI, Y. et al. *Overview of femtocell support in advanced WiMAX systems*. IEEE Communications Magazine. 2011.
- MANSFIELD G. *Femtocells in the US market-business drivers and consumer propositions*. Proceedings of the FemtoCells Europe Conference. Londres, 2008.
- MAQBOOL, M.; LALAM, M.; LESTABLE, T. *Comparison of femto cell deployment models for an interference avoidance technique*. Future Network & Mobile Summit (FutureNetw), vol., no., pp.1-9, 15-17. 2011.

- MARGALHO, M.; FRANCÊS, C. R. L.; COSTA, J. W. A. *Return Path in Brazilian Digital Television with Interactivity Based on Continuous Signalization Mechanism and QoS Bandwidth Control*. in IEEE Latin America Transactions. 2007.
- MARSAN, M. A.; BALBO, G.; CONTE, G. *Performance models of multiprocessor systems*. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1987.
- MENDES, L. L.; SILVEIRA, A. C. *Abordagem educacional para estudo de redes de computadores utilizando OPNET*. 31º Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia. Rio de Janeiro, 2003.
- OLSSON, M. et al. *SAE and the Evolved Packet Core - driving the mobile broadband revolution*. Academic Press. Elsevier, 2010.
- OPNET Modeler. Application and Network Performance. Disponível em: <<http://www.opnet.com>>. Acesso em: 25 jan. 2014a.
- OPNET. *Network R&D Solutions for Defense Organizations and System Integrators*. 2009. OPNET Technologies, Inc. Disponível em: <https://www.opnet.com/solutions/brochures/R&D_Defense.pdf> Acesso em 23 fev. 2014b.
- PETERSON, J. L. *Petri Nets: an Introduction*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1981.
- PETRI, C. A. *Communication with Automata*.: Institut für Instrumentelle Mathematik, Bonn, West Germany, 1966.
- PIDD, M. *Computer Simulations and Management Science*. New York: John Wiley & Sons. New York, 1992.
- PIDD, M. *Computer Simulation and Management Science*, 4º Edição. John Wiley & Sons, 4ª ed. New York, 1998.
- PRASAD, S. S.; BARUAH, R. *Femtocell mass deployment: Indian perspective*. IEEE. 3rd International Conference on Anti-counterfeiting, Security and Identification in Communication. Hong Kong, 2009.
- PUTERMAN, L. M. *Markov Decision Processes: Discrete Stochastic Dynamic Programming*. John Wiley & Sons. New York, 1994.

- RANGAN, S. *Femto-macro cellular interference control with subband scheduling and interference cancelation*. in Proc. Globecom. Miami, 2010.
- RANGAN, S.; MADAN, R. *Belief Propagation Methods for Intercell Interference Coordination in Femtocell Networks*. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on , vol.30, no.3, pp.631-640, 2012.
- RONG, L.; ELAYOUBI, S.E. ; HADDADA, O.B. *Performance Evaluation of Cellular Networks Offering TV Services*. IEEE Vehicular Technology Society. 2011.
- ROY A.; SHIN J.; SAXENA N.; *Multi-objective handover in LTE macro/femto-cell networks*. In Proceedings of Journal of Communications and Networks. 2012.
- RUMNEY, M. *IMT-Advanced: 4G Wireless Takes Shape in an Olympic Year*. Agilent Technologies. White Paper. 2008. Disponível em: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-9793EN.pdf>>, acesso em 27 maio 2014.
- SÁ, S. R. *Algoritmo para Desenvolver uma Ferramenta de Planejamento para o Sistema de Comunicações Móveis LTE*”, Dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações e Informática), Departamento de Ciências e Tecnologias da Informação, Instituto Universitário de Lisboa. Lisboa, 2010.
- SANTANA, M, J. et al. (1997), *Methodologies for Performance Evaluation of Distributed Systems: a Comparison Study*. Publicado em: The Proceedings of the: Summer Computer Simulation Conference, Arligton, Virginia, USA, 1997 p. 124-28.
- SANTOS, M. P. *Introdução à Simulação Discreta*. Departamento de Matemática aplicada. Instituto de Matemática e Estatística. Universidade Estadual do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1999.
- SAUNDERS. S et al. *Femtocells: Opportunities and Challenges for Business and Technology (Telecoms Explained)*, Edition illustrated, 2009.
- SESA, S; TOUFIK, I.; BAKER, M. *LTE—the UMTS long term evolution : from theory to practice*. Wiley, 2009.

- SHOOSHTARI, A. N. *Optimizing handover performance in LTE networks containing relays*. Dissertação (Mestrado em Ciência da Tecnologia) School of Electrical Engineering, Department of Communications and Networking. Espoo, 2011.
- SUNG, Y. et al. *Femtocell/Macrocell Interference Analysis for Mobile Wimax System*. 5th IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communication Symposium (APWCS 2008), vol.1, Sendai, 2008.
- TAHA, A.-E. M. et al. *LTE, LTE-Advanced and WiMAX: Towards IMT-Advanced Networks*, Wiley 2012.
- TELECO. *Femtocell: Características Principais*. 2009. Disponível em: <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialfemto/pagina_2.asp>. Acesso em: 20 jan. 2014.
- TELECO. *Tecnologias de Celular*. 2012. Disponível em: <<http://www.teleco.com.br/tecnocel.asp>>. Acesso em: 21 jan. 2014.
- TIJMS, H. C. *Stochastic models: an algorithmic approach*, John Wiley & Sons. New York, 1994.
- TR-126, TECHNICAL REPORT. *Triple-play Services Quality of Experience (QoE) Requirements*. DSL Forum, 2006.
- TYRRELL, A. et al. *Use Cases, Enablers and Requirements for Evolved Femtocells*. IEEE VTC2011, Budapeste, 2011.
- ULVAN, A.; BESTAK, R.; ULVAN, M. *The study of handover procedure in LTE-based femtocell network*. Wireless and Mobile Networking Conference. Budapeste, 2010.
- UMTS FORUM. *Mobile Broadband Evolution: the roadmap from HSPA to LTE*. 2009. Disponível em: <http://www.umts-forum.org/component/option,com_docman/task,doc_download/gid,2089/Itemid,12/>. Acesso em 01 Maio 2014.
- VARGAS, B. J. E. et al. "Performance of CS Fallback from LTE to UMTS," Communications Magazine, IEEE , vol.51, no.9, 2013.

- VIVIER, G. et al. *Femtocells for next-G Wireless Systems: the FREEDOM approach*, Future Network & Mobile Summit, Florence, 2010.
- WU, J. *A new handover strategy between femtocell and macrocell for LTE-based network*. IEEE. 4th International Conference on Ubi-Media Computing. São Paulo, 2011.
- XENAKIS, D. et al. *Mobility Management for Femtocells in LTE-Advanced: Key Aspects and Survey of Handover Decision Algorithms*. IEEE. Communications Surveys and Tutorials. 2014.
- XIA P.; CHANDRASEKHAR V.; ANDREWS J. G. (2010) *Open vs. closed access femtocells in the uplink*. IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 9, no. 12, pp.3798–3809. 2010.
- YOUNG, J. S.; HAE, G. H.; KWANG, K. S. “*A self organised femtocell for ieee 802.16e system*”. IEEE. Global Telecommunications Conference. Honolulu, 2009.
- ZAHIR, T. et al. *Interference Management in Femtocells*. IEEE, Communications Surveys and Tutorials. 2013.
- ZAHIR, T. et. al. *Interference Management in Femtocells*. Communications Surveys & Tutorials, IEEE , vol.PP, no.99, pp.1-19. 2013.
- ZHANG, H. et al. *A Novel Handover Mechanism between Femtocell and Macrocell for LTE based Networks*. IEEE. Communication Software and Networks International Conference. Singapura, 2010.
- ZHANG, J.; ROCHE, G.L. *Femtocells Technologies and Deployment*. Wiley, 2010.
- ZHANG. H., et al. *Signalling Cost Evaluation of Handover Management Schemes in LTE-Advanced Femtocell*. In IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring). 2011.
- ZHOU, H. et al. *Cell association and handover management in femtocell networks*. IEEE. Wireless Communications and Networking Conference. Shanghai, 2013.
- ZHUANG, Y; ZHAO, S.; ZHU X. *A new handover mechanism for femtocell-to-femtocell*. Wireless Communications & Signal Processing (WCSP), 2012 International Conference on , vol., no., pp.1,4, 25-27. 2012.