

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

OUTROS TRABALHO EM  
[www.projetoderedes.com.br](http://www.projetoderedes.com.br)

**SIMULAÇÃO SISTÊMICA DE REDES CELULARES 3GPP  
LTE COM A UTILIZAÇÃO DE FEMTOCÉLULAS**

**IGOR ABRAHÃO MOURA DE CARVALHO**

**ORIENTADOR: ANDRÉ NOLL BARRETO**

**TRABALHO DE GRADUAÇÃO**

**BRASÍLIA/DF: AGOSTO - 2011.**



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**SIMULAÇÃO SISTÊMICA DE REDES CELULARES 3GPP  
LTE COM A UTILIZAÇÃO DE FEMTOCÉLULAS**

**IGOR ABRAHÃO MOURA DE CARVALHO**

DISSERTAÇÃO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO  
DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO DE  
REDES DE COMUNICAÇÃO.

APROVADA POR:

---

Prof. Dr .André Noll Barreto (ENE/UnB)  
(Orientador)

---

Prof. Dr. Adoniran Judson de Barros Braga (ENE/UnB)  
(Examinador Interno)

---

Prof. Dr Leonardo Aguayo. (FGA/UnB)  
(Examinador Externo)

BRASÍLIA/DF, 06 DE SETEMBRO DE 2011.

## AGRADECIMENTOS

*Agradeço à família e à minha namorada pelo apoio incondicional.*

*Agradeço aos meus companheiros de curso pela amizade durante os cinco anos de estudo.*

*Agradeço à dedicação do meu orientador André.*

*Agradeço ao colega Guilherme Rabelo por ter me ajudado com o início do trabalho.*

Igor Abrahão Moura de Carvalho

## RESUMO

Este trabalho visa a realizar um estudo sobre o comportamento de redes celulares 3GPP LTE contando com a opção de se utilizar femtocélulas, estações rádio base que transmitem em baixa potência formando células em tamanho reduzido. Para tal estudo, foi utilizada a ferramenta de simulação sistêmica para o estudo de alocação de recursos em sistemas MIMO/OFDM apresentada em [1], acrescentando novas funcionalidades e características. A nova ferramenta de simulação conta com a opção de possuir usuários dentro de um ambiente fechado (*indoor*) e em espaço aberto (*outdoor*). Com essa nova opção, os usuários em ambiente fechado tendem a receber dados em uma taxa inferior aos usuários em espaços abertos devido à forte atenuação do sinal sofrido pelas paredes. Para solucionar esse tipo de problema tão comum em situações reais, o simulador tem a opção de acrescentar femtocélulas. Outra funcionalidade importante e que visa a melhora do desempenho da rede foi a opção de reuso de frequência com fator de reuso maior do que 1, que tem o objetivo de reduzir a interferência causada pelas células adjacentes. Aproveitando a já existente setorização das macrocélulas, cada um dos 3 setores utiliza 1/3 das subportadoras disponíveis. Com a existência de femtocélulas no ambiente de simulação, algumas opções de reuso de frequência levando em conta a localização das mesmas também foram implementada. Além dos resultados já gerados pelo trabalho antecessor, foram coletadas curvas como: CDF (*cummulative density function*) das taxas de transmissão dos usuários como um todo e dos casos de ambientes fechados e em espaços abertos, bem como dos valores de SINR de cada subportadora com o objetivo de realizar um estudo da interferência da rede.

## ABSTRACT

This work aims to conduct a study on the behavior of cellular networks 3GPP LTE with the option of using femtocells, base radio stations that transmit at low power forming cells in small sizes. For this study was used simulation tool for the systematic study of resource allocation in MIMO / OFDM presented in [1] by adding new functionality and features. The new simulation tool has the option of owning users within a closed environment (indoor) and open air (outdoor). With this new option indoors users tend to receive data at a lower rate than open air users due to the strong signal attenuation suffered by the walls. To solve this problem so common in real situations the simulator has the option of adding femtocells. Another important feature, which aims to improve network performance, was the option to reuse the frequency reuse factor greater than 1 which has the goal to reduce interference caused by adjacent cells. Leveraging existing sectorization of macrocells, each of the three sectors uses 1/3 of the available subcarriers. With the existence of femtocells in the simulation environment, some options for the reuse of frequency, taking into account the location of same have also been implemented. Besides the results already generated by the work predecessor, curves were collected such as: cdf (cumulative density function) from transmission rates of users as a whole and cases of indoors and outdoors as well as the SNIR values of each subcarrier with a goal to study network interference.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	NECESSIDADES DE SERVIÇOS . . . . .	1
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO . . . . .	2
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO . . . . .	3
<b>2</b>	<b>O 3GPP LTE</b>	<b>4</b>
2.1	INTRODUÇÃO . . . . .	4
2.2	EVOLUÇÃO DO 3GPP LTE . . . . .	4
2.3	TÉCNICAS e ARQUITETURA . . . . .	4
2.3.1	MIMO . . . . .	5
2.3.2	OFDM . . . . .	5
2.3.3	TDD e o FDD . . . . .	6
2.3.4	CAMADA FÍSICA NO ENLACE DIRETO . . . . .	7
2.3.5	SAE . . . . .	10
<b>3</b>	<b>FEMTOCÉLULAS</b>	<b>12</b>
3.1	O QUE SÃO? . . . . .	13
3.2	BENEFÍCIOS . . . . .	13
3.3	COBERTURA INDOOR . . . . .	14
3.4	FEMTOCELULAS E O LTE . . . . .	14
3.5	MOTIVAÇÃO PARA AS OPERADORAS . . . . .	15
3.6	ARQUITETURA . . . . .	16
3.7	PROBLEMAS . . . . .	16
<b>4</b>	<b>O SIMULADOR</b>	<b>18</b>
4.1	INTRODUÇÃO . . . . .	18
4.2	DESCRIÇÃO DO SIMULADOR . . . . .	19
4.2.1	SUBSISTEMA DE FUNCIONALIDADES BÁSICAS . . . . .	21
4.2.2	SUBSISTEMA DE GRID . . . . .	21
4.2.3	SUBSISTEMA DE MOBILIDADE . . . . .	23
4.2.4	SUBSISTEMA DE ENLACE . . . . .	23

4.2.5	SUBSISTEMA DE CAMADA FÍSICA . . . . .	24
4.2.6	SUBSISTEMA DE NÓ FÍSICO . . . . .	24
4.2.7	SUBSISTEMA DE CANAL DE RÁDIO . . . . .	24
4.2.8	SUBSISTEMA DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS DE RÁDIO . . . . .	27
4.2.9	SUBSISTEMA DE GERENCIADOR TEMPORAL . . . . .	30
4.2.10	SUBSISTEMA DE TRANSIMSSÃO . . . . .	30
4.2.11	SUBSISTEMA DE RESULTADOS . . . . .	30
4.2.12	SUBSISTEMA DE PARÂMETROS . . . . .	32
<b>5</b>	<b>RESULTADOS DE SIMULAÇÃO</b>	<b>36</b>
5.1	INTRODUÇÃO . . . . .	36
5.2	PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO . . . . .	37
5.3	RESULTADOS INTRODUTÓRIOS . . . . .	40
5.4	COMPARATIVO DA QUALIDADE DO CANAL . . . . .	40
5.5	COMPARATIVO DE DESEMPENHO . . . . .	47
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>56</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>58</b>



## LISTA DE TABELAS

2.1	Evolução das Redes Celulares . . . . .	5
2.2	Modulação e Codificação definidos para o LTE . . . . .	9
3.1	Evolução do tamanho do raio de cobertura das células . . . . .	12
4.1	MCS utilizadas no simulador . . . . .	29
5.1	Cenários de simulação . . . . .	36
5.2	Parâmetros de antena de transmissão . . . . .	37
5.3	Parâmetros de canal . . . . .	37
5.4	Parâmetros de <i>grid</i> . . . . .	38
5.5	Parâmetros de adaptação de enlace . . . . .	38
5.6	Parâmetros de camada física . . . . .	38
5.7	Parâmetros de escalonamento . . . . .	39
5.8	Parâmetros de simulação . . . . .	39
5.9	Parâmetros do terminal móvel . . . . .	39
5.10	Parâmetros sistêmicos . . . . .	40
5.11	Porcentagem dos usuários servidos por HeNBs e eNodeBs. . . . .	40
5.12	Porcentagem dos usuários servidos por HeNBs e eNodeBs. . . . .	40
6.1	Cenários de simulação . . . . .	56

## LISTA DE FIGURAS

2.1	Representação da divisão de um espectro banda larga em subportadoras ortogonais [2]. . . . .	6
2.2	TDD e FDD [3]. . . . .	7
2.3	Grade de tempo e frequência [3] . . . . .	7
2.4	Bloco de recurso [3] . . . . .	8
2.5	Subquadro [3] . . . . .	8
2.6	Estrutura de um quadro de rádio [3] . . . . .	9
2.7	Bloco de recurso considerando o tempo e frequência [3] . . . . .	9
2.8	Escalonamento dos recursos de rádio [3] . . . . .	10
2.9	Evolved Packet Core [4] . . . . .	11
3.1	Arquitetura básica de uma rede celular com femtocélulas residenciais [5]	13
3.2	Crescimento da receita e do tráfego de dados [6] . . . . .	15
3.3	Arquitetura do uso de femtocélulas usando um HeNB GW . . . . .	16
3.4	Arquitetura do uso de femtocélulas usando um HeNB GW . . . . .	17
4.1	Fluxograma da campanha de simulação. . . . .	19
4.2	Fluxograma do funcionamento da simulação de cada rodada . . . . .	20
4.3	Grid de simulação: Macrocélulas [1]. . . . .	22
4.4	Célula de 3 setores [1]. . . . .	22
4.5	Grid de sombreamento . . . . .	26
4.6	Curva de enlace para o QPSK [1] . . . . .	28
4.7	Curva de enlace para o 16QAM [1] . . . . .	28
4.8	Curva de enlace para o 64QAM [1] . . . . .	29
5.1	Média dos valores de SINR. . . . .	41
5.2	CDF dos valores de SINR. . . . .	42
5.3	Distribuição de MCS das ERBs. . . . .	43
5.4	Média dos valores de SINR em ambientes fechados. . . . .	44
5.5	CDF dos valores de SINR em ambientes fechados. . . . .	44
5.6	Média dos valores de SINR em espaço aberto. . . . .	45
5.7	CDF dos valores de SINR em espaço aberto. . . . .	45

5.8	Distribuição de MCS dos HeNBs. . . . .	46
5.9	Distribuição de MCS dos eNodeBs. . . . .	46
5.10	Porcentagem do número de transmissões com sucesso. . . . .	47
5.11	CDF dos valores de taxa de transmissão total dos usuários . . . . .	48
5.12	CDF dos valores de taxa de transmissão efetiva dos usuários . . . . .	48
5.13	Média da taxa de transmissão dos usuários . . . . .	49
5.14	CDF dos valores de taxa de transmissão total dos usuários em ambientes fechados . . . . .	50
5.15	CDF dos valores de taxa de transmissão efetiva dos usuários em ambi- entes fechados . . . . .	51
5.16	Média das taxas de transmissão dos usuários em ambientes fechados . .	51
5.17	CDF dos valores de taxa de transmissão total dos usuários em espaço aberto . . . . .	52
5.18	CDF dos valores de taxa de transmissão efetiva dos usuários em espaço aberto . . . . .	53
5.19	Média das taxas de transmissão dos usuários em espaço aberto . . . . .	53
5.20	Média das taxas de transmissão das ERBs . . . . .	54
5.21	Média das taxas de transmissão das HeNBs . . . . .	54
5.22	Média das taxas de transmissão dos eNodeBs . . . . .	55

# LISTA DE SÍMBOLOS

## SIGLAS E ABREVIACÕES DA LÍNGUA INGLESA

3G	<i>Third Generation</i>	Terceira geração
3GPP	<i>Third Generation Partnership Project</i>	Proeto de parceria da terceira geração
ADSL	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i>	Linha Digital por Assinatura Assimétrica
BLER	<i>Block Error Rating</i>	Taxa de erro de bloco
CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i>	Função de Distribuição Acumulada
eNodeB		Estação rádio base relativa à tecnologia 3G LTE
EPC	Evolved Packet Core	Núcleo de Pacote Evoluído
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>	Duplexação por Divisão de Frequência
GSM	<i>Global System for Mobile Communication</i>	Sistema de Comunicação Móvel global
HeNB	<i>Home eNodeB</i>	Estação rádio base residencial relativa à tecnologia 3G LTE
HSPA	<i>High Speed Packet Access</i>	Acesso a pacotes em alta velocidade
ISI	<i>Intersymbol Interference</i>	Interferência Inter-simbólica
LTE	<i>Long Term Evolution</i>	Evolução a longo prazo
MCS	<i>Modulation/Codification Scheme</i>	Esquema de modulação e codificação
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>	Múltiplas entradas e múltiplas saídas
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplex</i>	Multiplexação por divisão de frequências ortogonais
PRB	<i>Physical Resource Block</i>	Bloco de recurso físico
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>	Modulação por amplitude em quadratura
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>	Modulação por chaveamento de fase

RE	<i>Resource Element</i>	Elemento de Recurso
RRM	<i>Radio Resource Managment</i>	Gerenciamento dos recursos de rádio
SAE	System Architecture Evolution	Evolução do Sistema e Arquitetura
SINR	<i>Signal to Interference plus Noise Ratio</i>	Razão entre a potência do sinal recebido e a soma do ruído mais os sinais interferentes
TDD	<i>Time Division Duplex</i>	Duplexação por divisão de tempo
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunication System</i>	Sistema universal de telecomunicações móveis
WCDMA	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>	Multiplo acesso por divisão no código utilizando portadora de banda larga

## SIGLAS E ABREVIACÕES DA LÍNGUA PORTUGUESA

ERB    Estação Rádio Base

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 NECESSIDADES DE SERVIÇOS

De acordo com o estudo realizado pela VNI (Cisco Visual Networking Index Global Mobile Data Traffic Forecast ) [7], o tráfego de dados móvel deverá crescer 39 vezes com uma taxa anual de 108% até o ano de 2015 no Brasil. Devem ser trafegados 189.506 terabytes por mês em 2015, o equivalente a 17 vezes o volume de tráfego de toda Internet em 2005. O total de dados previstos representa 47 milhões de DVD's por mês ou mais de 522 milhões de mensagens de texto por segundo.

Um dos grandes fatores que levam a esse aumento de tráfego de dados é que o número de dispositivos móveis conectados em 2015 deve ser de 1,2 aparelho por pessoa, ou seja, um total de mais de 246 milhões de unidades. A presença de *tablets* no mercado brasileiro deve crescer 81 vezes entre 2010 e 2015, com mais de 5,7 milhões de unidades. O número de *smartphones* será de 58 milhões de unidades, crescendo quatro vezes, enquanto que o total de *laptops* no País deve crescer cinco vezes, atingindo 18 milhões de dispositivos. A previsão é que praticamente a metade dos usuários de internet estejam conectados exclusivamente por dispositivos móveis, chegando a 32 milhões de usuários.

Outro fator a ser considerado é a velocidade de conexão. Os usuários esperam que a velocidade de conexão seja tal que baixar aplicativos, músicas e vídeos possam ser feitos em um tempo semelhante a quando se usa uma internet banda larga. Para se ter uma ideia, de acordo com dados da Bytemobile [8], uma empresa que ajuda 125 operadoras do mundo inteiro a gerenciar o tráfego de dados, cerca de 60% do tráfego gerado por aparelhos móveis é proveniente de arquivos de vídeos.

Para atender todo esse crescimento no tráfego de dados móveis, assim como a quantidade de pessoas conectadas, as operadoras de redes móveis precisam proporcionar melhorias em sua rede atual. Fatores como área de cobertura e qualidade de conexão deverão ser aprimoradas. Atualmente, a maioria das operadoras no Brasil tem como tecnologia para prover acesso a internet o HSPA, um padrão desenvolvido pelo 3GPP *The 3rd Generation Partnership Project* [9] e que oferece taxas de transmissão na ordem de 14 Mbps.

A evolução lógica do HSPA, o LTE, também especificado pelo 3GPP, já começou a ser implementada em alguns lugares do mundo e objetiva oferecer taxas de dados de até 100 Mbps [4]. Porém, as operadoras necessitam realizar um investimento elevado para atender a crescente demanda. Como uma possível saída para diminuir o alto investimento inicial, a implementação do LTE, em um primeiro momento, poderia ser realizada através de instalações de femtocélulas, estações rádio base que transmitem em baixa potência e atendem a pequenas áreas de cobertura. Femtocélulas custam bem menos que as macrocélulas tradicionais e podem ser instaladas em locais estratégicos, onde a demanda por uma alta taxa de dados móveis é alta. Vale lembrar que femtocélulas podem ser usadas em qualquer tecnologia (WCDMA, HSPA, GSM) e são uma boa solução para a cobertura de ambientes fechados.

## **1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO**

O objetivo do trabalho é realizar um estudo sobre o comportamento de redes celulares 3G LTE contando com a opção de se utilizar femtocélulas por meio do simulador sistêmico para a alocação de recursos de rádio em redes celulares 3G LTE [1]. Para tal estudo, o simulador sofreu algumas mudanças como o acréscimo de femtocélulas, novas funcionalidades e características que buscam a aproximação dos resultados com a realidade bem como a geração de outros tipos de dados além dos existentes.

Um fator de grande importância em simulações de redes de comunicação de rádio móvel é o modelo de somreamento. De acordo com [10], o somreamento pode ser modelado por uma variável aleatória com distribuição log-normal. Entretanto, não é considerada a correlação espacial [11]. Implementando essa correlação, o objetivo é aprimorar o modelo de somreamento consequentemente fazendo com que os resultados da simulação fiquem mais próximos da realidade.

Considerando agora a existência de usuários em ambientes fechados que correspondem à grande maioria dos usuários [6], a análise de desempenho da rede acaba ficando mais próxima da realidade atual e nos remetem a novos problemas antes não considerados como a forte atenuação sofrida pelo sinal devido as paredes dos ambientes fechados.

Para a solução do problema de cobertura em ambientes fechados, o simulador apresenta a opção de se utilizar femtocélulas, estações rádio base de baixa potência de transmissão. Vale ressaltar que esse tipo de solução poderá acarretar um aumento no nível de interferência da rede. Por isso, um dos objetivos do trabalho é analisar a

melhora do desempenho da rede, principalmente em relação aos usuários em ambientes fechados assim como a interferência entre as macrocélulas tradicionais e as femtocélulas e o quanto essas novas interferências irão prejudicar a rede.

Como outra forma de tentar melhorar o desempenho da rede, foram adicionados ao simulador opções de reuso de frequência, levando em consideração a setorização das macrocélulas assim como as localizações das femtocélulas, visando reduzir as interferências e melhorar a distribuição da vazão entre os usuários.

### **1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

Este trabalho será dividido em seis capítulos:

No Capítulo 2 é apresentado um resumo das principais técnicas e arquitetura do LTE, assim como uma descrição mais detalhada da camada física do enlace direto, o foco do simulador.

O Capítulo 3 explica o conceito de femtocélulas e suas vantagens, noções de mercado, arquiteturas e seus problemas.

No capítulo 4 é apresentada uma breve descrição do simulador, enfatizando as mudanças feitas nesse atual trabalho.

O Capítulo 5 contém os parâmetros das simulações realizadas, assim como seus resultados e análises.

O último capítulo, o Capítulo 6, contém as conclusões finais do trabalho, assim como sugestões para trabalhos futuros.



## **2 O 3GPP LTE**

Neste Capítulo é apresentado o 3GPP LTE focando em suas principais técnicas, em sua arquitetura e um detalhamento na camada física no enlace direto que é o objeto de simulação.

### **2.1 INTRODUÇÃO**

Motivado pela grande necessidade de maiores taxas de dados e um melhor desempenho nas redes de dados celular, o 3GPP [9] começou em 2004 os estudos de uma nova tecnologia para suprir as carências da 3ª geração da telefonia celular (WCDMA,HSPA). LTE (Long Term Evolution ) é o nome dado à nova tecnologia de acesso rádio celular. Os requisitos desejados para essa nova tecnologia são:

- Redução do custo por bit;
- Baseado em rede totalmente em IP;
- Flexibilidade para o uso das atuais e novas frequências licenciadas;
- Arquiteturas simplificadas e interfaces abertas;
- O uso comedido de potência entre os terminais móveis;

### **2.2 EVOLUÇÃO DO 3GPP LTE**

Comparando o LTE com os seus predecessores, o uso de novas tecnologias de acesso ao meio é o principal fator para as novas taxas de dados e outras melhorias em relação às tecnologias anteriores. Na tabela 2.1 vemos a evolução em relação a alguns aspectos.

### **2.3 TÉCNICAS e ARQUITETURA**

O LTE introduz novas técnicas para prover um melhor aproveitamento espectral conseguindo assim melhores desempenhos em relação a taxas de transmissão e menor latência. Para tolerar essas novas capacidades, uma evolução arquitetural no núcleo

Tabela 2.1: Evolução das Redes Celulares

-	WDCMA	HSPA	HSPA+	LTE
Taxa máxima de downlink(bps)	384k	14M	28M	100M
Taxa máxima de uplink(bps)	128L	5,7M	11M	50M
Latência RTT(Round Trip Time)	150 ms	100 ms	50ms	10 ms
3GPP Releases	Rel 99/4	Rel 5 / 6	Rel 7	Rel 8
Método de acesso ao meio	CDMA	CDMA	CDMA	OFDMA/SC-FDMA

da rede se faz necessária. Por isso, nesta seção descrevem-se a arquitetura e técnicas mais importantes.

### 2.3.1 MIMO

MIMO (Múltiplas entradas Múltiplas saídas - *Multiple Input Multiple Output*) é uma tecnologia que busca se beneficiar dos múltiplos usos de antenas na transmissão e recepção aproveitando a propagação de múltiplos caminhos do sinal em um ambiente terrestre real. Normalmente, esses múltiplos caminhos geram interferências, mas também pode ser vantajoso em função do tratamento adequado do sinal. Apesar de uma necessidade maior de processamento e um número maior de antenas, pode-se obter os ganhos relevantes em relação à taxa de dados, as antenas transmitem dados diferentes, assim como robustez, antenas transmitem dados iguais visando a garantir uma menor taxa de erro de *bit*. Para o LTE, na transmissão no sentido enlace direto, o esquema de duas antenas na estação rádio base e duas antenas receptoras no terminal móvel. Também são previstos esquemas com quatro antenas. No sentido enlace reverso, a configuração utilizada é chamada de MU-MIMO (Multi-User MIMO), cada terminal móvel possui uma única antena transmissora enquanto a estação rádio base possui várias antenas receptoras.

### 2.3.2 OFDM

Assim como outros sistemas de comunicação móvel como o IEEE 802.11 (Wi-Fi) e o IEEE 802.16 (WiMAX), o LTE baseia seu esquema de transmissão entre as ERBs e os terminais móveis, no sentido enlace direto, na tecnologia OFDM (Multiplexação por divisão de frequências ortogonais - *Orthogonal Frequency Division Multiplex*). O OFDM é uma técnica de modulação que consiste em dividir um espectro de frequência de banda larga como vemos na Figura 2.1 a) em diversas subportadoras ortogonais entre si como mostra a figura 2.1 b).

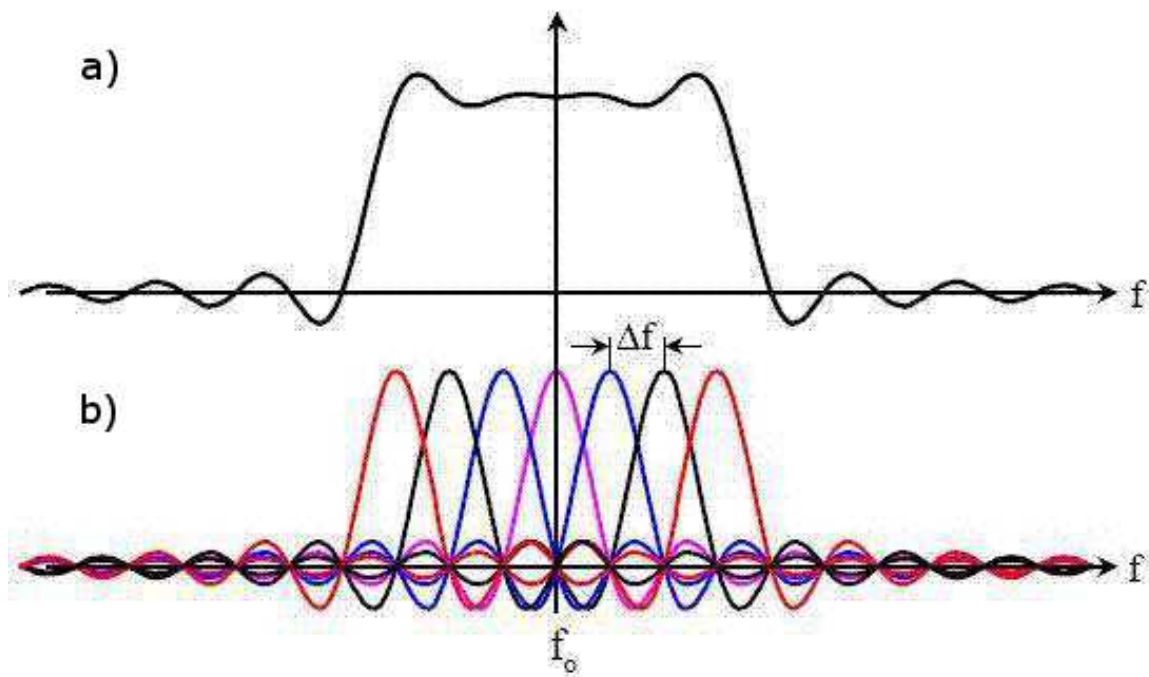


Figura 2.1: Representação da divisão de um espectro banda larga em subportadoras ortogonais [2].

Essa técnica provê uma grande robustez quanto a canais seletivos em frequência e o atraso do sinal causado por múltiplos percursos, reduzindo a interferência inter simbólica (ISI) possibilitando obter taxas mais elevadas.

### 2.3.3 TDD e o FDD

O LTE foi projetado para utilizar o TDD (Divisão dupla no tempo - *Time Division Duplex*) e o FDD (Divisão dupla na frequência - *Frequency Division Duplex*). O FDD utiliza faixas diferentes de frequência para as transmissões no sentido direto e reverso. O TDD, nas transmissões no sentido direto e reverso, utiliza a mesma faixa de frequência. Porém, as transmissões no sentido direto e reverso são feitas em *slots* de tempo diferentes. Ambos os esquemas são ilustrados na Figura 2.2 O FDD, esquema adotado neste trabalho, é interessante no ponto de vista de ser compatível com as tecnologias anteriores em que esse esquema é o mais utilizado. Entretanto o TDD possui algumas vantagens como menor custo de *hardware*.

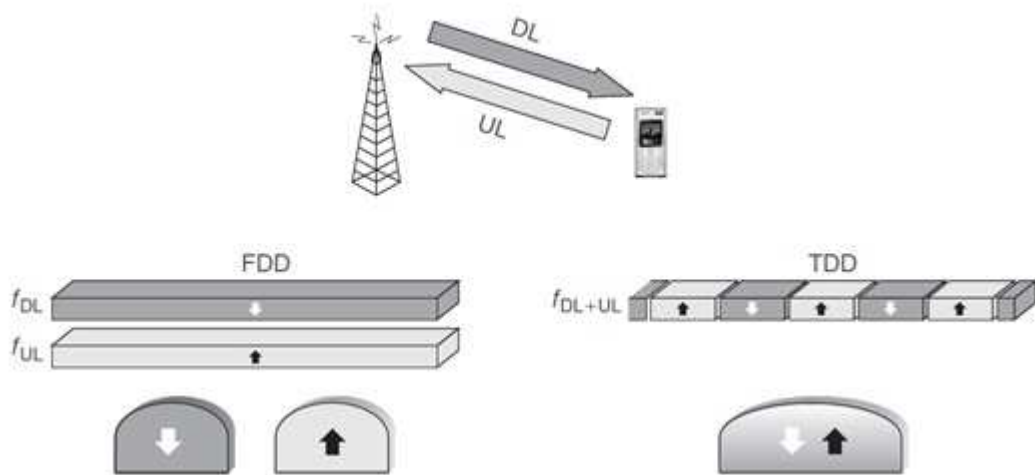


Figura 2.2: TDD e FDD [3].

### 2.3.4 CAMADA FÍSICA NO ENLACE DIRETO

#### 2.3.4.1 DESCRIÇÃO

Considerando uma grade de tempo e frequência, de acordo com a Figura 2.3, é definido como elemento de recurso (*resource element*) o equivalente a uma subportadora OFDM espaçadas em 15kHz durante o intervalo de símbolo OFDM.

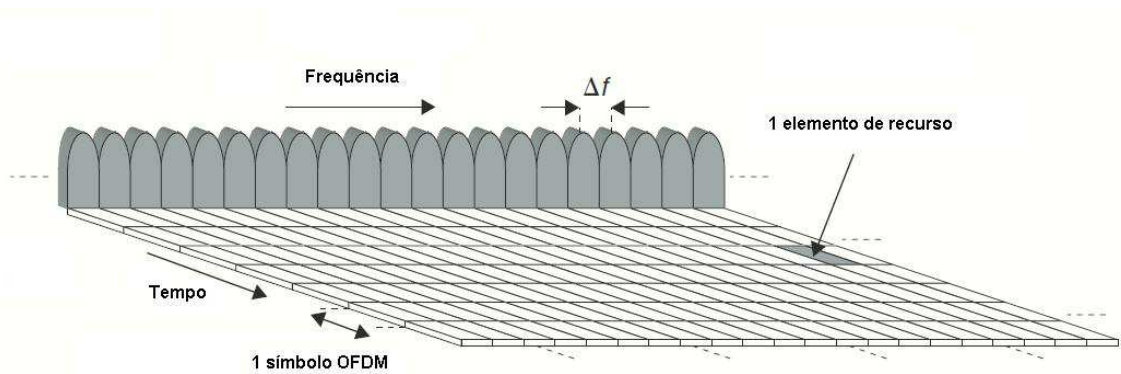


Figura 2.3: Grade de tempo e frequência [3]

Agora, considerando somente o domínio da frequência, é definido como bloco de recurso (*resource block*) 12 subportadoras OFDM consecutivas, resultando uma largura de banda de 180kHz como mostra a figura 2.4.

No enlace direto, o número de blocos de recurso pode variar de 6 até mais de 100, de acordo com a banda disponível, que varia de 1MHz até 20MHz.

Levando em consideração o domínio do tempo, é definido como um subquadro o inter-

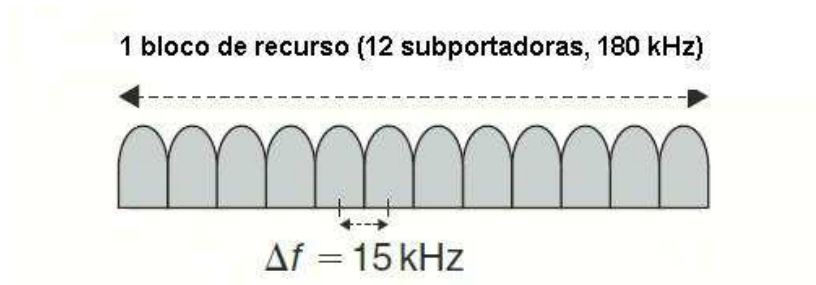


Figura 2.4: Bloco de recurso [3]

valo de 1 ms contendo 2 *slots* com a duração de 0,5 ms cada. Cada *slot* corresponde, geralmente, a 7 intervalos de símbolos OFDM onde entre cada intervalo, é inserido um CP (Prefixo de ciclo - *cyclic prefix*). Um CP corresponde a uma cópia do final do símbolo anterior.

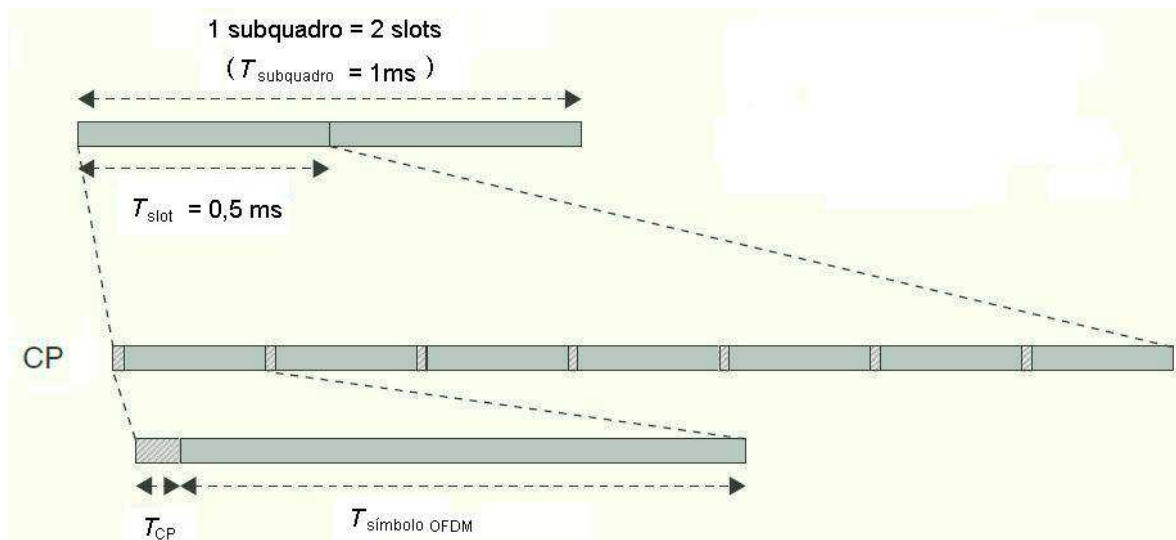


Figura 2.5: Subquadro [3]

Um quadro de rádio é definido como um conjunto de 10 subquadros, totalizando um intervalo de 10 ms como vemos na Figura 2.6.

Voltando a analisar sobre a ótica da grade de tempo frequência, o bloco de recurso equivale a 12 subportadoras OFDM na duração de 1 *slot* que equivale a 7 símbolos OFDM.

São esses blocos que são escalonados para os usuários da rede, Figura 2.8 de acordo com um determinado algoritmo de alocação de recursos.

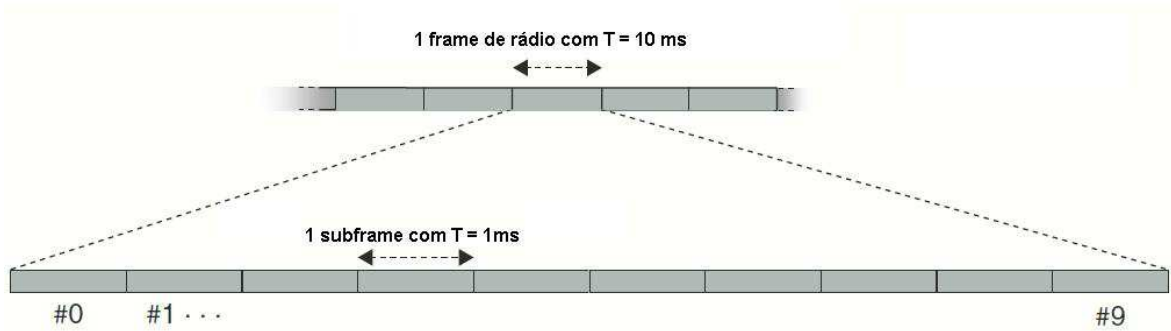


Figura 2.6: Estrutura de um quadro de rádio [3]

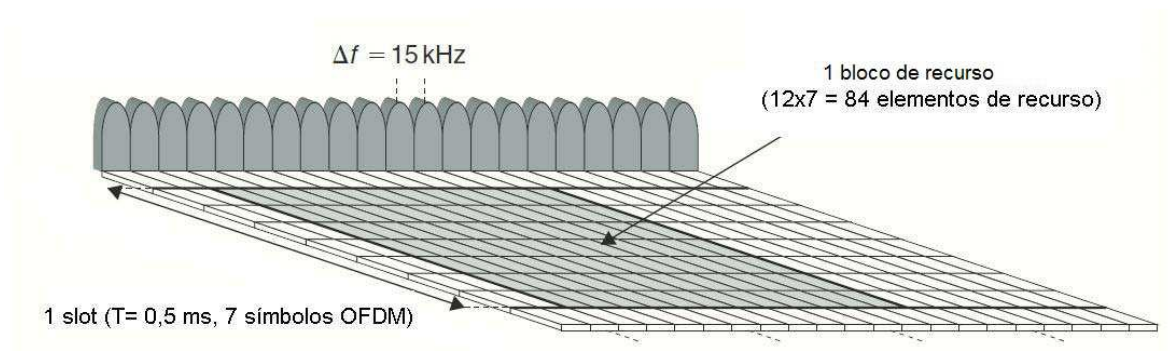


Figura 2.7: Bloco de recurso considerando o tempo e frequência [3]

#### 2.3.4.2 ADAPTAÇÃO DE ENLACE

De tempos em tempos os terminais móveis devem reportar às ERBs a qualidade do canal para uma determinada subportadora. A qualidade do canal é representada pelo CQI (Indicador de qualidade de canal - *Channel Quality Indicator*) que é basicamente o valor de SINR com erros e atrasos acrescentados. Baseado nessas informações os símbolos OFDM de um bloco de recurso podem ser modulados e codificados de maneira adaptativa. Se o canal possuir em um determinado momento qualidade ruim, esquemas de modulação e codificação, chamados de MCS (Esquema de modulação e codificação - *Modulation /Coding Scheme*) mais robusto são escolhidos. As opções de modulação e codificação definidas para o LTE estão na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Modulação e Codificação definidos para o LTE

Modulação	QPSK, 16QAM, 64QAM
Codificação	Turbo, Convolutacional

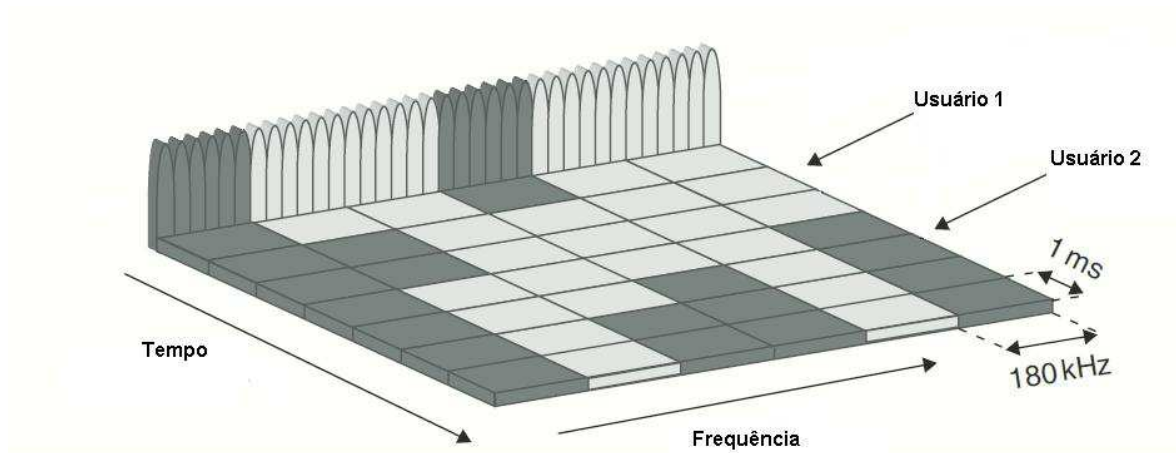


Figura 2.8: Escalonamento dos recursos de rádio [3]

### 2.3.5 SAE

SAE (System Architecture Evolution) corresponde ao núcleo da rede do 3G LTE. É baseado nos núcleos de redes de tecnologias legadas (GSM, WCDMA) para facilitar a migração. Algumas importantes vantagens que o novo núcleo de rede é:

- Aumento na taxa de dados para poder oferecer a taxa de 100Mbps para os usuários;
- Arquitetura baseado na tecnologia IP;
- Redução da latência para 10 ms;

#### 2.3.5.1 ELEMENTOS

O principal elemento do SAE é conhecido como EPC (*Evolved Packet Core*) que por sua vez é composto por 4 elementos como vemos na figura 2.9.

- MME (*Mobility Management Entity*): É o principal nó de controle da rede com as seguintes funções:
  - Busca de terminais móveis inativos;
  - Ativação e desativação de portadoras;
  - Escolha do SGW (*Serving Gateway*) para um terminal móvel;

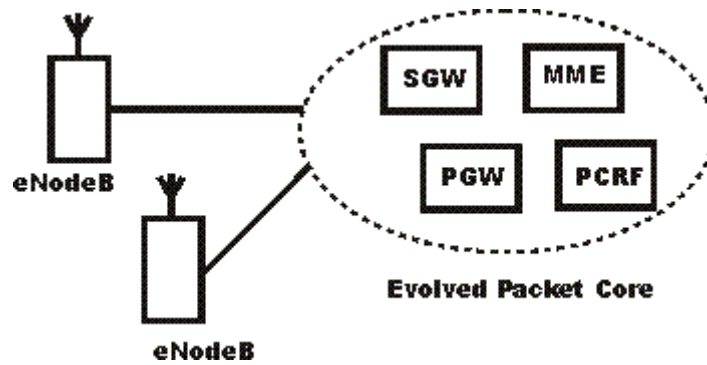


Figura 2.9: Evolved Packet Core [4]

- Controle de *handover* ;
- Autenticação de usuários e implementação de restrições de *roaming*;
- Procedimento de *paging*;
- Plano de controle entre o LTE e redes de segunda e terceira geração;
- SGW *Serving Gateway*: É o elemento que gerencia o plano de mobilidade do usuário assim como mantém o caminho entre os eNodeBs e os PGW (*PDN Gateway*) fazendo a conexão com a internet convencional;
- PGW ( *PDN Gateway*):Provê a conectividade entre o terminal móvel e a internet convencional;
- PCRF (*Policy and Charging Rules Function*): Elemento que gerencia os serviços e políticas reservadas para cada usuário;



### 3 FEMTOCÉLULAS

Neste Capítulo é apresentado o conceito de Femtocélula bem como seus benefícios, arquiteturas, relação com o LTE e os seus principais problemas.

De acordo com a lei de Cooper [6], a demanda de tráfego de dados móvel irá dobrar a cada 30 meses. Uma das formas de aguentar tal demanda, no caso específico das redes celulares, vem sendo diminuir cada vez mais o tamanho do raio de cobertura das células a fim de aumentar sua capacidade. Essa diminuição do tamanho do raio de cobertura é representada na Tabela 3.1 contendo outras informações como: nomenclatura referente a célula, raio aproximado de cobertura, tipo de ambiente, responsabilidade da conexão com a operadora.

Tabela 3.1: Evolução do tamanho do raio de cobertura das células

Nomenclatura	Raio de cobertura	Ambiente	Responsabilidade da conexão com a operadora
Macro célula	1 - 10 km	rural, urbano e suburbano	operadora
Micro célula	500 m	urbano e suburbano	operadora
Pico célula	200 m	fechados	operadora
Femto célula	20 m	fechados	usuário

Analisando o mercado mundial de telecomunicações, 63 operadoras de telefonia celular que representam 1,71 milhões dos usuários e 74 revendedores participam do femto forum [5], forum sem fim lucrativos que visa a promover o uso de femtocélulas pelo mundo. nove operadoras lançaram serviços baseados em femtocélulas no segundo trimestre de 2011. Desde o final de 2010, 2,3 milhões de pontos de acesso para femtocélulas e 1,6 pontos de acesso para macro célula estão sendo implantados. Oito das dez maiores operadora do mundo oferecem serviços através de femtocélulas. Especificações de padrões para femtocélulas no 3GPP e IEEE 802.16 (WiMax) já foram concluídos e de acordo com [12], 60% das operadoras acreditam que pequenas células serão mais importantes do que células maiores para a estratégia de implantação do LTE.

### 3.1 O QUE SÃO?

São pontos de acesso sem fio transmitindo em baixa potência, que operam em uma faixa de frequência licenciada onde o seu principal objetivo é o aumento de capacidade e uma melhora na cobertura em ambientes fechados. Sua conexão entre o usuário e as operadoras é realizada através de, por exemplo, uma internet banda larga (ADSL, Cable Modem).



Figura 3.1: Arquitetura básica de uma rede celular com femtocélulas residenciais [5]

Custam menos que as tradicionais macrocélulas e são gerenciadas exclusivamente pelas operadoras mesmo estando na casa de um usuário.

### 3.2 BENEFÍCIOS

Os benefícios do uso de uma arquitetura de redes celulares contendo células menores são diversos como por exemplo a melhora do desempenho, cobertura, principalmente em ambientes fechados (*indoor*) e capacidade fazendo com que os usuários possam desfrutar de serviços que demandam uma alta taxa de transferência de dados.

Os benefícios são:

- Melhorando a cobertura em ambientes fechados, as operadoras não precisariam oferecer o serviço de telefonia fixa convencional oferecendo apenas o serviço de

telefonia celular;

- Como as femtocélulas transmitem em baixa potência, consequentemente as baterias dos terminais móveis apresentam um tempo de duração maior;
- Devido ao seu baixo custo em relação às células convencionais, as femtocélulas são uma boa alternativa para soluções em áreas rurais com pouca ou nenhuma infraestrutura de rede assim como desafogar o tráfego das macrocélulas;

### 3.3 COBERTURA INDOOR

Como a maioria das sessões de comunicação são iniciadas em ambientes fechados [6], é economicamente complicado para as operadoras se a cobertura desses ambientes fossem realizadas apenas pelas tradicionais macrocélulas, levando em conta a crescente demanda de serviços de voz e dados e o seu alto custo de implantação.

Além disso, o uso de femtocélulas em ambientes fechados traz vantagens como:

- As paredes dos ambientes fechados funcionam como uma blindagem, reduzindo a interferência causada pelos usuários em espaço aberto.
- O uso da tecnologia MIMO para a multiplexação espacial é amplamente favorecido devido a um maior número de reflexões e múltiplos caminhos do sinal causados pelas paredes e características do ambiente.
- Sabendo que as novas tecnologias de rádio trabalham com esquemas de modulação e codificação adaptativa dependendo das condições do canal (SINR), o uso de femtocélulas permite o uso do esquema que proporciona uma maior taxa de transmissão fazendo um melhor uso do espectro visto que com uma maior proximidade entre as antenas, maior é o valor do SINR.

### 3.4 FEMTOCELULAS E O LTE

Partindo do princípio que o LTE é a evolução mais lógica para redes de terceira geração, as femtocélulas seriam essenciais para o primeiro passo da implantação dessa nova tecnologia. Inclusive o 3GPP já considera o uso de femtocélulas a partir do *release* 8 chamando de HeNB(*home eNodeB*) a estação rádio base referente às femtocélulas. Como a demanda para uma alta taxa de dados existe em pontos de acesso específicos

e em sua maioria em ambientes fechados, o LTE poderia ser introduzido no mercado com a implantação de femtocélulas nesses ambientes e, gradualmente, expandindo sua cobertura de acordo com o crescimento da demanda.

Vale ressaltar a importância das macrocélulas tradicionais para poder prover ampla cobertura. Entretanto, instalando primeiramente apenas femtocélulas, as operadoras evitariam gastos desnecessários tentando adivinhar a aceitação dos usuários para essa nova tecnologia.

### 3.5 MOTIVAÇÃO PARA AS OPERADORAS

Um dos maiores desafios para as operadoras é que a demanda por uma alta taxa de dados é muito maior do que sua geração de receita como podemos ver na Figura 3.2. Por isso é que a redução do custo por *bit*, um dos alicerces do LTE é tão importante.

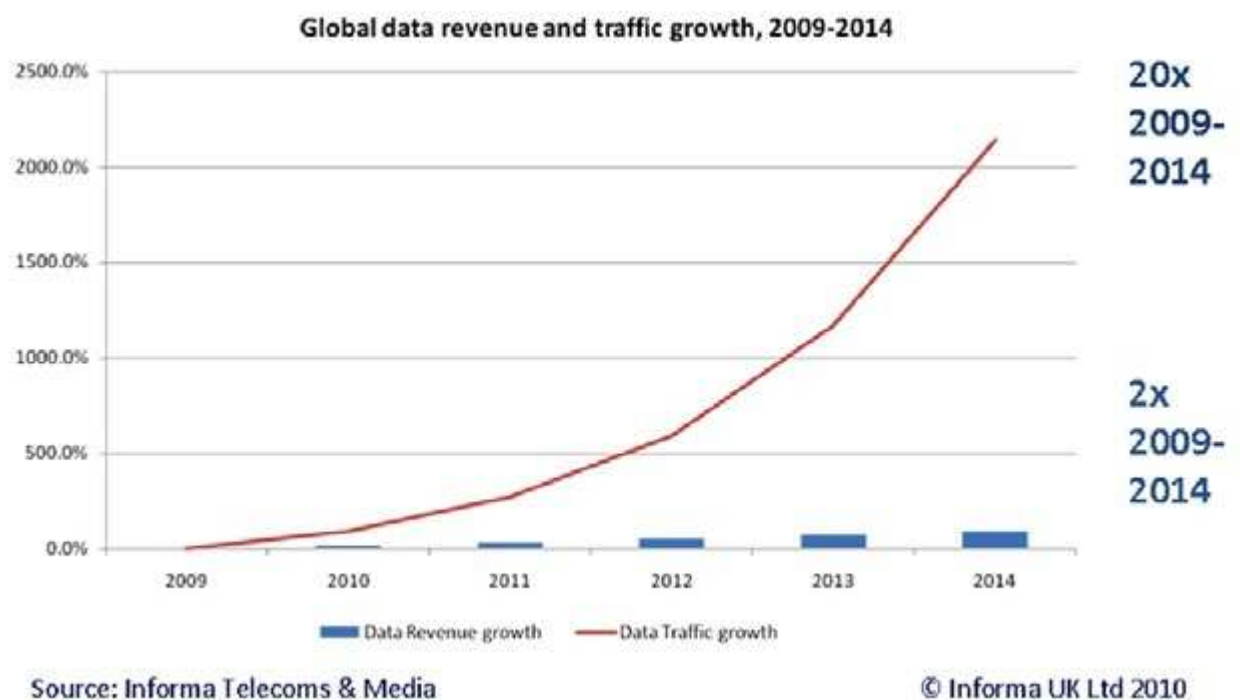


Figura 3.2: Crescimento da receita e do tráfego de dados [6]

Tendo em vista que as femtocélulas facilitariam a entrada do LTE no mercado, elas são de vital importância para a redução do custo por *bit*. Outros fatores que ajudariam nessa redução é que, com as femtocélulas, as operadoras não precisariam alugar novos sítios, no caso de femtocélulas residências, e poderiam oferecer e ao mesmo tempo obter benefícios comercializando contratos familiares.

### 3.6 ARQUITETURA

Visto que o LTE é baseado no protocolo IP, a arquitetura e as interfaces são as mesmas para as macrocélulas e femtocélulas. Entretanto, existem algumas possibilidades para conectar os HeNB com o núcleo da rede. Empregando um elemento opcional, o HeNB GW (*Home eNodeB Gateway*) é possível agregar vários HeNB visando obter uma maior escalabilidade. Todos os HeNB têm o gerenciamento de mobilidade feito pelo mesmo MME e se conectam à internet pelo mesmo SGW.

Existem 2 tipos de arquiteturas definidas pelo 3GPP que utilizam o HeNB GW. Como podemos ver na Figura 3.3 o HeNB GW agrega vários HeNB e somente ele se conecta com os elementos MME e o SGW do EPC.

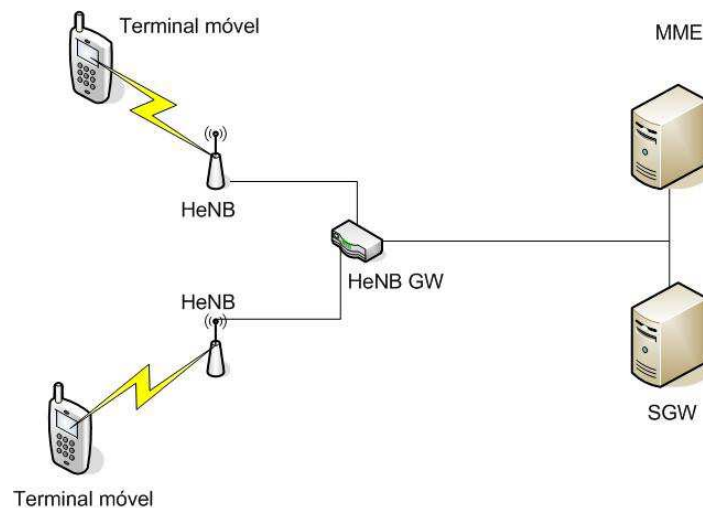


Figura 3.3: Arquitetura do uso de femtocélulas usando um HeNB GW

Já na Figura 3.4, o HeNB GW também agrega vários HeNB, porém ele só se conecta com o MME. Cada HeNB se conecta com o SGW individualmente. O gerenciamento de mobilidade é feito de forma agregada porém, cada HeNB pode se conectar com a internet por um SGW diferente.

### 3.7 PROBLEMAS

Apesar das muitas vantagens apresentadas pelas femtocélulas, alguns problemas devem ser levados em consideração.

Como as femtocélulas e as macrocélulas compartilham da mesma banda de frequência, a quantidade de sinais interferentes aumentam e podem prejudicar significativamente

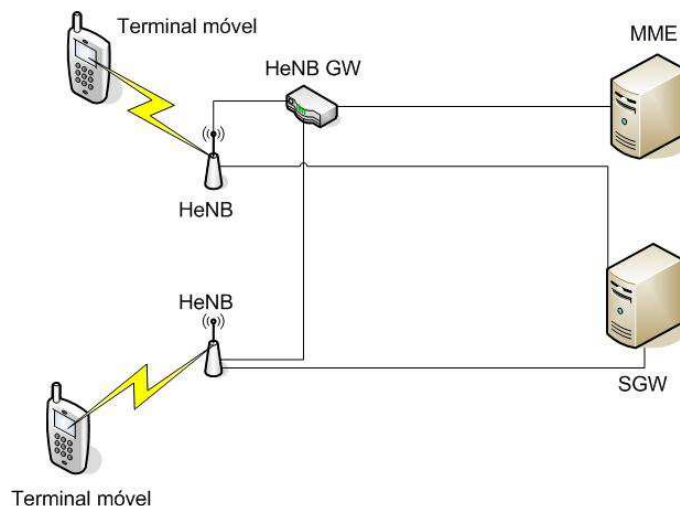


Figura 3.4: Arquitetura do uso de femtocélulas usando um HeNB GW

o desempenho da rede. Existem quatro cenários de interferências significantes tanto no sentido do enlace direto quanto no reverso:

- Usuário atendido por uma macrocélula sofre interferência de uma macrocélula adjacente;
- Usuário atendido por uma macrocélula sofre interferência de uma femtocélula;
- Usuário atendido por uma femtocélula sofre interferência de uma macrocélula;
- Usuário atendido por uma femtocélula sofre interferência de uma outra femtocélula próxima;

Os quatro cenários no sentido do enlace direto são analisados neste trabalho.

Outro fator é que o EPC, responsável por gerenciar as macrocélulas e femtocélulas, pode sofrer com 2 tipos de problemas:

- A conexão entre o EPC e os HeNBs é feita via internet banda larga. Conexão essa que nem sempre é confiável, principalmente em horário de pico em que a rede tende a ficar congestionada;
- Se o número de femtocélulas crescer sem um certo controle, não será possível o núcleo da rede gerenciar a rede completa e o desempenho, inclusive das macrocélulas, será prejudicado;

## 4 O SIMULADOR

Neste Capítulo, o simulador será descrito de forma breve enfatizando as mudanças feitas neste atual trabalho.

### 4.1 INTRODUÇÃO

Inicialmente, o simulador foi desenvolvido como descrito no trabalho [1] para o projeto chamado WiSil (Laboratório de Simulação Sem fio - *Wireless Simulation Lab*) que é uma parceria entre a UnB (Universidade de Brasília) e o INdT (Instituto Nokia de Tecnologia). O projeto tem como objetivo desenvolver simuladores à nível de enlace das tecnologias 3G LTE e IEEE 802.16 WiMax.

Para o estudo de femtocélulas, o objetivo principal deste trabalho, foram necessárias algumas mudanças como por exemplo a geração de usuários em ambientes fechados e a inserção dos HeNBs. Modificações no modelo de sombreado e a implementação de cenários de reuso de frequência também foram acrescentados.

O simulador em questão é:

- Sistêmico: avalia o desempenho da rede celular incluindo cenários de simulação, criação de usuários, perdas de percurso, sombreado, adaptação de enlace entre outros;
- Orientado no tempo: possui um módulo que define uma unidade de tempo e é encarregado de atualizar o tempo de simulação;
- Semi-estático: as posições dos usuários são fixas durante toda rodada;
- Implementado de acordo com as especificações 3G LTE;
- Focado no enlace direto;
- Não implementa modelo de tráfego;
- Desenvolvido na linguagem orientado a objeto C++;

Os resultados obtidos e apresentados nesse trabalho foram obtidos a partir da compilação do código pelo o compilador gcc 4.3.6 [13] executados em um sistema operacional Linux, distribuição Ubuntu 10.04 [14].

## 4.2 DESCRIÇÃO DO SIMULADOR

Como vemos na figura 4.1, o funcionamento do simulador se baseia na realização de uma campanha de simulação, incrementando o número de usuários em cada simulação de acordo com os parâmetros de entrada como, por exemplo, o número inicial e final de usuários em ambiente fechado e em espaço aberto e seus respectivos incrementos.

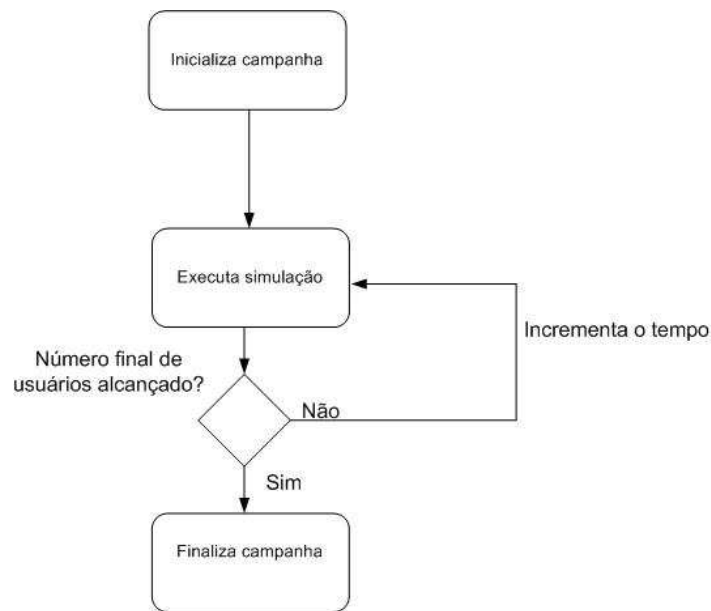


Figura 4.1: Fluxograma da campanha de simulação.

Para cada simulação, são realizadas diversas rodadas independentes no qual cada rodada, que corresponde à cenários diferentes (usuários possuem posições diferentes) é realizada a transmissão de diversos quadros. O funcionamento da simulação de cada rodada está descrito na forma de fluxograma como vemos na figura 4.2

O número de rodadas por simulação assim como o número de transmissões que ocorre em cada rodada são parâmetros de entrada.

O simulador será descrito especificando o funcionamento básico de cada subsistema. Os subsistemas existentes são:

- FUNCIONALIDADES BÁSICAS



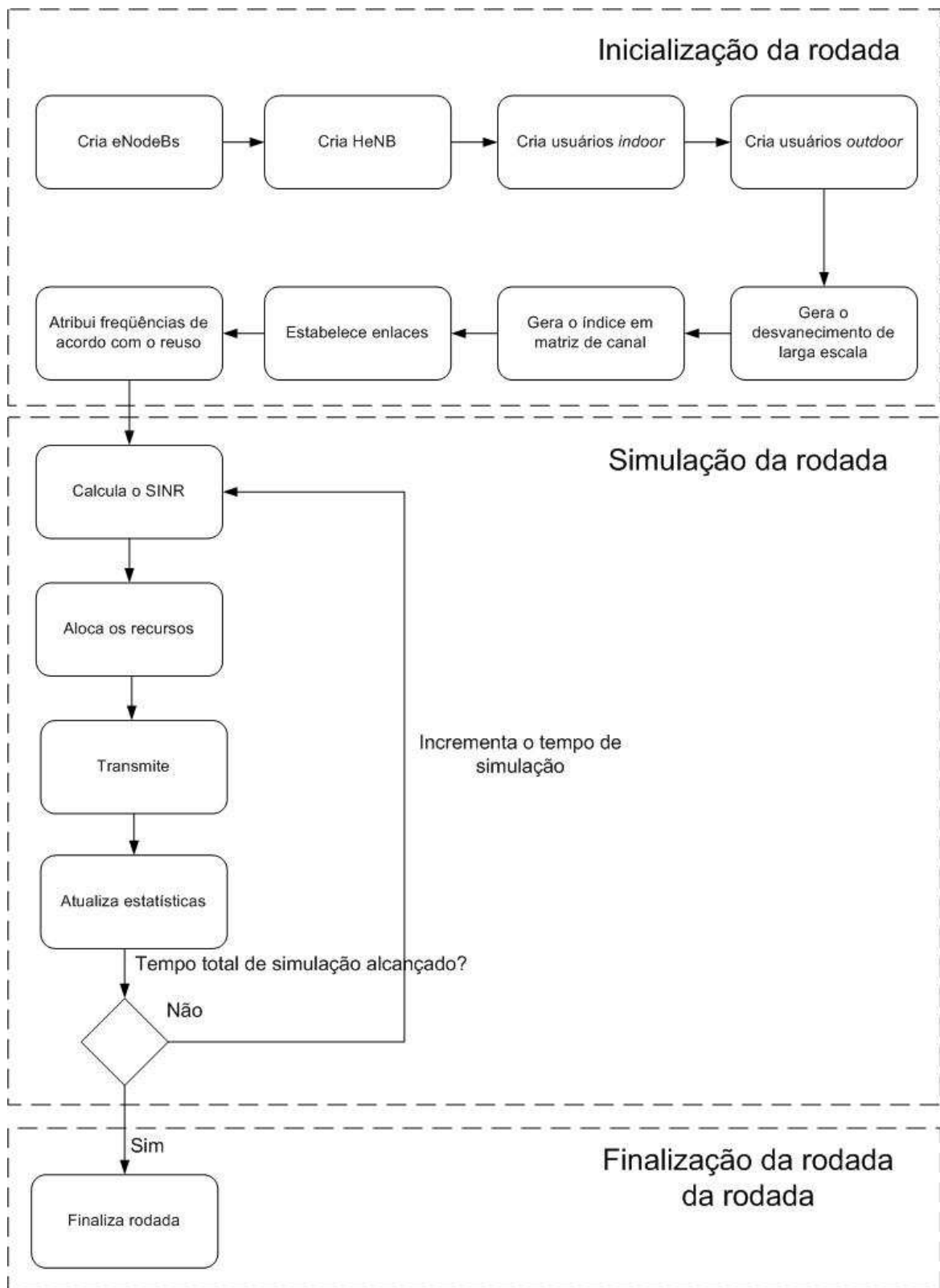


Figura 4.2: Fluxograma do funcionamento da simulação de cada rodada

- GRID
- MOBILIDADE
- ENLACE
- CAMADA FÍSICA
- NÓ FÍSICO
- CANAL DE RÁDIO
- GERENCIAMENTO DE RECURSOS DE RÁDIO
- SUBSISTEMA DE GERENCIADOR TEMPORAL
- TRANSMISSÃO
- RESULTADOS
- PARÂMETROS

#### **4.2.1 SUBSISTEMA DE FUNCIONALIDADES BÁSICAS**

Possui funções matemáticas, estatística e operações com vetores assim como classes relativas as posições físicas dos usuários e estações rádio base.

#### **4.2.2 SUBSISTEMA DE GRID**

O subsistema de grid é o responsável por especificar as posições físicas dos usuários e estações rádio base referentes às macrocélulas (eNodeB) e às femtocélulas(HeNB).

O grid de simulação é composto por 19 macrocélulas formato hexagonal espaçadas igualmente por uma distância definida pelo usuário em que cada uma é dividida em três setores como mostram as Figuras 4.3 e 4.4.

Três eNodeBs, um para cada setor, são posicionados no centro de cada macrocélula sendo um total de 57 eNodeBs.

As femtocélulas possuem um formato circular com um raio definido pelo usuário. Os HeNB são posicionados aleatoriamente (distribuição uniforme) no interior da macrocélula central e das 6 macrocélulas em volta da central. O número de femtocélulas por macrocélula é definido pelo usuário.

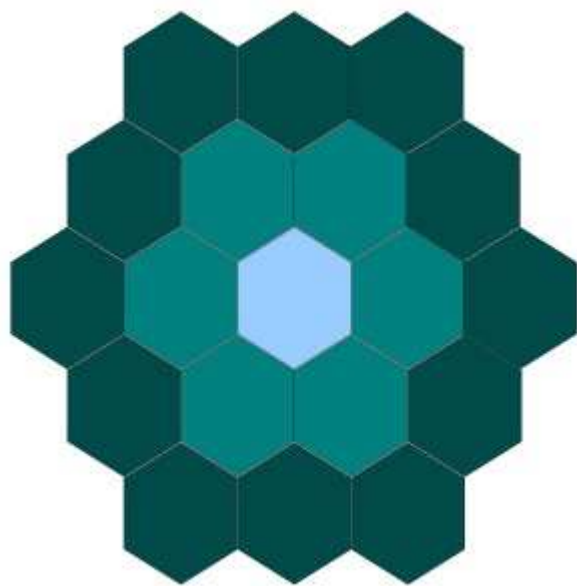


Figura 4.3: Grid de simulação: Macrocélulas [1].

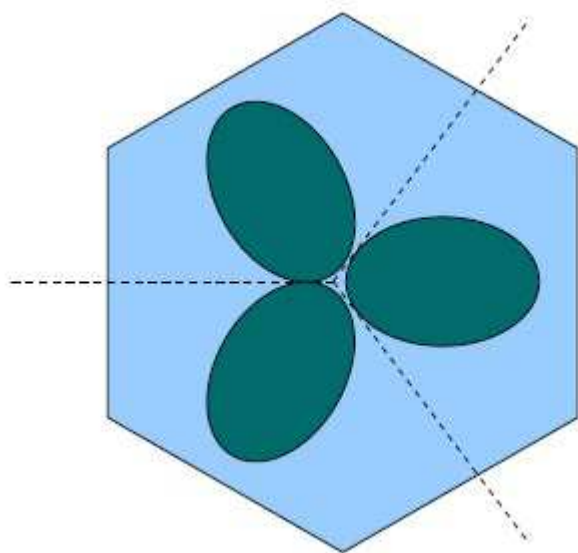


Figura 4.4: Célula de 3 setores [1].

Diferentemente do trabalho em [1], agora existem usuários em ambiente fechado e em espaço aberto. Os usuários em ambiente fechado serão distribuídos aleatoriamente dentro da circunferência das femtocélulas assim como os usuários em espaço aberto serão gerados aleatoriamente, mas fora das circunferências das femtocélulas.

### 4.2.3 SUBSISTEMA DE MOBILIDADE

Esse subsistema foi desenvolvido para futuras implementações de modelos de mobilidade. Atualmente ele não está em operação.

### 4.2.4 SUBSISTEMA DE ENLACE

É um dos subsistemas mais importantes pois é o responsável por estabelecer o enlace entre cada usuário e uma estação rádio base, eNodeB ou HeNB, assim como calcular o SINR (Razão Sinal Interferência mais Ruído - *Signal to Interference plus Noise Ratio*).

#### 4.2.4.1 O CÁLCULO DE ENLACE

O cálculo de enlace é feito da seguinte forma:

- Para cada usuário é calculada a perda de propagação entre cada ERB pela seguinte fórmula:

$$L_{dB} = -G_{TX} - G_{RX} + PL + S \quad (4.1)$$

em que  $G_{TX}$  e  $G_{RX}$  corresponde aos ganhos das antenas de transmissão e recepção respectivamente,  $PL$  é a perda de percurso e  $S$  corresponde ao sombreamento.

- A estação rádio base que oferecer a menor perda de propagação para o usuário será escolhida para servi-lo.

#### 4.2.4.2 O CÁLCULO DA SINR

A SINR é calculada entre cada usuário e ERB, para cada subportadora, antena e instante de tempo pela seguinte fórmula:

$$\gamma_j = \frac{P_j}{N + \sum_{i=0}^{N-1} P_i} \quad (4.2)$$

em que  $\gamma_j$  é a SINR calculada para o usuário  $j$ ,  $P_j$  é a potência do sinal recebido,  $P_i$  a potência do interferidor sendo ele eNodeB ou HeNB e  $N$  a potência do ruído dada pela equação:

$$N = kT_0BNF \quad (4.3)$$

em que  $k$  é a constante de Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-23} JK^{-1}$ ),  $T_0$  é a temperatura ambiente em Kelvin [K],  $B$  é a largura de banda de cada portadora em Hz e  $NF$  é a figura de ruído do receptor.

#### 4.2.5 SUBSISTEMA DE CAMADA FÍSICA

É o subsistema que modela a estrutura do quadro no simulador. De acordo com os parâmetros definidos pelo usuário, é definido o número de subportadoras por bloco físico (PRB), entre outras características.

#### 4.2.6 SUBSISTEMA DE NÓ FÍSICO

É o subsistema responsável por modelar os usuários, eNodeBs e HeNBs juntamente com os dispositivos que cada um contém (antenas, transmissores, receptores).

#### 4.2.7 SUBSISTEMA DE CANAL DE RÁDIO

É o sistema responsável por gerar e armazenar o canal no simulador. O subsistema contém módulos que geram os desvanecimento de pequena e larga escala.

No desvanecimento de pequena escala é considerado a geração de um percurso variante no tempo, seguido pelas gerações de multi percursos e geração do canal seletivo em frequência e variante no tempo.

No desvanecimento de larga escala é considerado a geração da perda de percurso e do sombreamento como veremos a seguir.

##### 4.2.7.1 PERDA DE PERCURSO

No simulador original, o cálculo para perda de percurso em dB era feito usando somente a seguinte fórmula [1]:

$$PL = 128.1 + 37.6 \log_{10}(R) \quad (4.4)$$

em que  $R$  é a distancia entre as duas antenas em quilômetros.

Esta fórmula que considera apenas um ambiente com usuários em ambiente aberto, sem a interferências de paredes.

No atual trabalho, temos quatro casos diferentes com modelos distintos como vemos em [15]. Os 4 casos são:

- Usuários em ambiente fechado e HeNB

$$PL = 38.46 + 20 \log_{10} R + 0.7R \quad (4.5)$$

em que  $R$  é a distancia entre as antenas em metros

- Usuários em ambiente em espaço aberto e HeNB

$$PL = \text{MAX}(15.3 + 37.6 \log_{10} R, 38.46 + 20 \log_{10}(R) + 0.7d_{2D,indoor} + L_{ow}) \quad (4.6)$$

em que  $R$  é a distância entre o as antenas em metros,  $d_{2D,indoor}$  é a distância entre o HeNB e a parede e  $L_{ow}$  é a perda de percurso devido a penetração do sinal pela parede.

- Usuários em ambiente fechado e eNodeB

$$PL = 15.3 + 37.6 \log_{10}(R) + L_{ow} \quad (4.7)$$

em que  $R$  é a distancia entre o as antenas em metros e  $L_{ow}$  é a perda de percurso devido a penetração do sinal pela parede.

- Usuários em ambiente em espaço aberto e eNodeB

$$PL = 128.1 + 37.6 \log_{10}(R) \quad (4.8)$$

em que  $R$  é a distancia entre as duas antenas em quilômetros.

#### 4.2.7.2 SOMBREAMENTO

O sombreamento no trabalho original foi modelado por uma variável aleatória que segue uma distribuição log-normal com média e desvio padrão definidos pelo usuário sem considerar a correlação espacial. Visando a obter resultados mais próximos da realidade fazendo com que os valores dos fatores de sombreamento tenham relação com a posição onde se encontra o usuário e a ERB, foi implementada no atual simulador a correlação espacial, considerando somente os eNodeBs, por meio de uma interpolação como sugerido em [11].

Para cada eNodeB, foi gerado uma grade uniformemente espaçada por um distancia de correlação ( $D_{cor}$ ) definida pelo o usuário. Tendo como base a Figura 4.5 cada ponto  $S_{n,l}$  no grid representa uma variável aleatória independente com distribuição log-normal para uma ERB  $l$  em uma localização geográfica  $n$ .

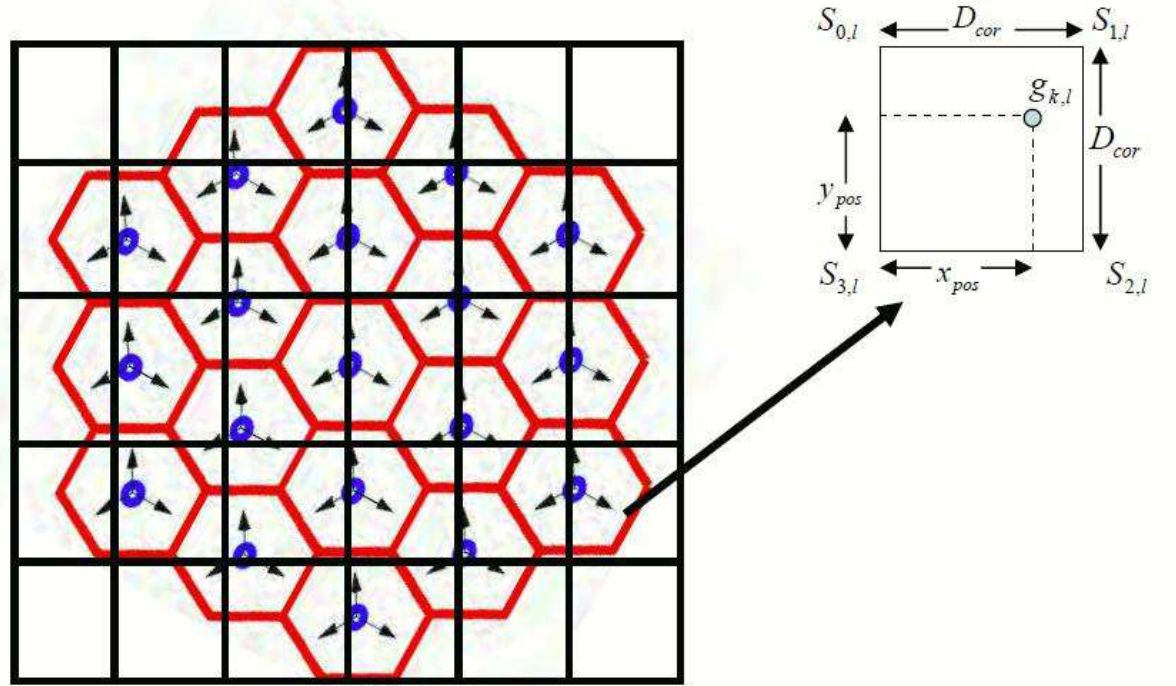


Figura 4.5: Grid de sombreamento

Então, o sombreamento entre uma ERB  $l$  e um usuário  $g_{k,l}$ , sendo atendido pela ERB  $l$  em uma posição geográfica  $z$ , é calculado pela a interpolação entre os quatro  $S_{n,l}$  mais próximos do usuário pela fórmula:

$$S(g_{z,l}) = \left( \sqrt{1 - \frac{x_{pos}}{D_{cor}}} \right) \left[ S_{0,l} \sqrt{\frac{y_{pos}}{D_{cor}}} + S_{3,l} \sqrt{1 - \frac{y_{pos}}{D_{cor}}} \right] + \left( \sqrt{\frac{x_{pos}}{D_{pos}}} \right) \left[ S_{1,l} \sqrt{\frac{y_{pos}}{D_{cor}}} + S_{2,l} \sqrt{1 - \frac{y_{pos}}{D_{cor}}} \right] \quad (4.9)$$

em que  $x_{pos}$  e  $y_{pos}$  são as coordenadas da posição do terminal móvel.

No caso nos HeNB, o sombreamento é modelado somente por uma variável aleatória que segue uma distribuição log-normal com média e desvio padrão definidos pelo usuário.

#### 4.2.8 SUBSISTEMA DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS DE RÁDIO

É o subsistema relacionado a alocação de recursos de rádio para os usuários no simulador e é dividido em 3 módulos:

- Módulo de adaptação de enlace;
- Módulo de planejamento de frequência;
- Módulo de escalonamento;

##### 4.2.8.1 MÓDULO DE ADAPTAÇÃO DE ENLACE

É o módulo responsável pela a escolha do MCS que inclui o formato de modulação e codificação adequado de acordo com os valores de CQI das subportadoras alocadas para um determinado usuário.

Também é o modulo que mapeia um valor de SINR de uma subportadora para uma determinada taxa de erro de bloco (BLER) quando se usa um determinado tipo de modulação e codificação como mostras as Figuras 4.6, 4.7 e 4.8.

Os tipos de MCS implementados no simulador são descritos na tabela 4.1.

##### 4.2.8.2 MÓDULO DE PLANEJAMENTO DE FREQUÊNCIA

É o módulo que informa a todas as ERBs as frequências que elas podem operar. É o módulo responsável por implementar os diversos cenários de reuso de frequência levando em consideração os setores das células e a presença de femtocélulas. Os cenários são:



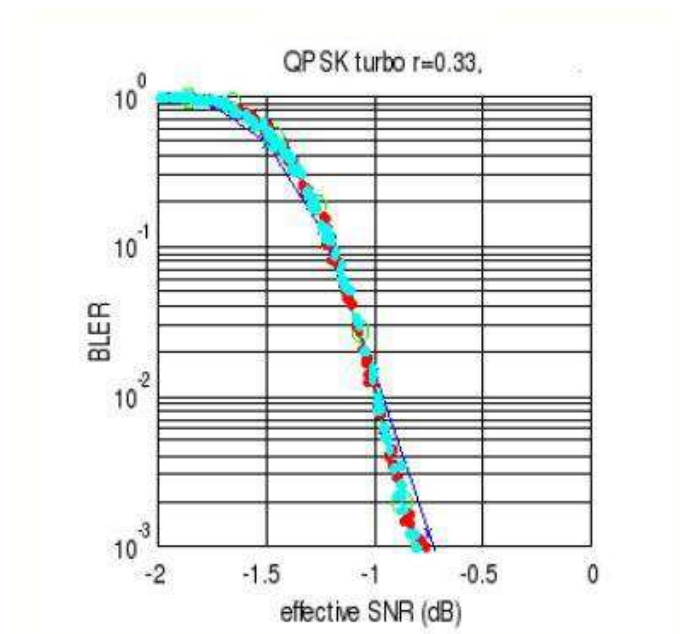


Figura 4.6: Curva de enlace para o QPSK [1]

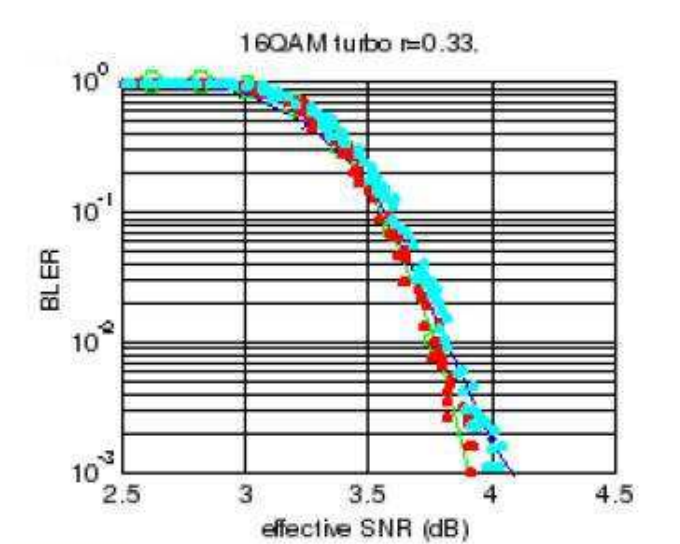


Figura 4.7: Curva de enlace para o 16QAM [1]

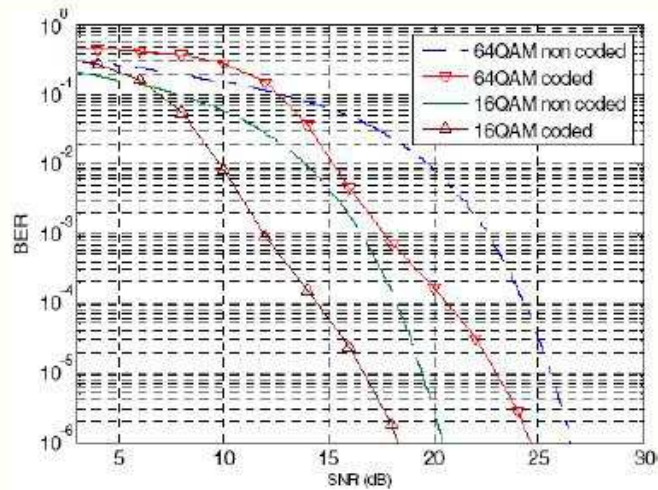


Figura 4.8: Curva de enlace para o 64QAM [1]

Tabela 4.1: MCS utilizadas no simulador

MCS	Modulação	Codificação
-1(Péssima qualidade de canal)	-	-
0	QPSK	Turbo com taxa de codificação de $\frac{1}{3}$
1	16QAM	Turbo com taxa de codificação de $\frac{1}{3}$
2	64QAM	Turbo com taxa de codificação de $\frac{1}{3}$

- Macro célula com fator de reuso 1/1 sem femtocélulas;
- Macro célula com fator de reuso 1/3 sem femtocélulas;
- Macro célula com fator de reuso 1/1 com femtocélulas com fator de reuso 1/3;
- Macro célula com fator de reuso 1/3 com femtocélulas com fator de reuso 1/1;
- Macro célula com fator de reuso 1/3 com femtocélulas com fator de reuso 1/3 utilizando uma parte da banda diferente da macro célula em questão;
- Macro célula com fator de reuso 1/3 com femtocélulas com fator de reuso 1/1 utilizando 2/3 da banda disponível diferente da banda utilizada pela macro célula em questão;
- Macro célula com fator de reuso 1/1 utilizando 2/3 da banda disponível diferente da banda utilizada pelas femtocélulas em questão com femtocélulas com fator de reuso 1/3;

#### 4.2.8.3 MÓDULO DE ESCALONAMENTO

É o módulo que contém os algoritmos para as alocações de recursos de rádio aos usuários. Os algoritmos disponíveis no simulador são :

- Algoritmo Aleatório: visa a igualdade na distribuição de recursos. É o único algoritmo utilizado neste trabalho.
- Algoritmo de Maximização da Taxa de Transmissão: visa a maximizar a taxa de transmissão média por célula;
- Algoritmo *Proportional Fair* (Justiça Proporcional): visa estabelecer uma justiça na alocação de recursos para que todos os usuários da célula possa desfrutar de uma taxa média de transmissão razoável.

#### 4.2.9 SUBSISTEMA DE GERENCIADOR TEMPORAL

É o subsistema responsável pelo gerenciamento do tempo de simulação. O tempo é incrementado ao final de cada transmissão e zerado no início de cada rodada.

#### 4.2.10 SUBSISTEMA DE TRANSMISSÃO

É onde ocorre a transmissão de todos os recursos de todas as estações rádio base. Para cada PRB de cada estação rádio base, é transmitida a quantidade de *bits* contida no recurso para o usuário escolhido. Se a MCS escolhida resultar em uma taxa de erro de *bit* maior do que a definida pelo usuário, a transmissão é considerada perdida.

#### 4.2.11 SUBSISTEMA DE RESULTADOS

É o subsistema responsável por coletar as informações da rede gerando estatísticas que nos permitem analisar os resultados. Atualmente, o simulador gera arquivos que contém um histograma e uma CDF dos seguintes valores:

- Valores de SINR de todas as subportadoras de todos os usuários - **Novo**;
- Valores de SINR de todas as subportadoras dos usuários em ambiente fechado - **Novo**;
- Valores de SINR de todas as subportadoras dos usuários em espaço aberto - **Novo**;

- Valores de taxa de transmissão bruta de todos os usuários - **Novo**;
- Valores de taxa de transmissão bruta dos usuários em ambiente fechado - **Novo**;
- Valores de taxa de transmissão bruta dos usuários em espaço aberto - **Novo**;
- Valores de taxa de transmissão efetiva de todos os usuários - **Novo**;
- Valores de taxa de transmissão efetiva dos usuários em ambiente fechado - **Novo**;
- Valores de taxa de transmissão efetiva dos usuários em espaço aberto - **Novo**;

Outros dois tipos de arquivo também são gerados. Um deles contém as informações discriminadas por rodada de simulação enquanto o outro discrimina os resultados por simulação. Os seguintes dados são gerados:

- Taxa de transmissão total média por usuário;
- Taxa de transmissão total média por usuário em ambiente fechado - **Novo**;
- Taxa de transmissão total média por usuário em espaço aberto - **Novo**;
- Taxa de transmissão efetiva média por usuário;
- Taxa de transmissão efetiva média por usuário em ambiente fechado - **Novo**;
- Taxa de transmissão efetiva média por usuário em espaço aberto - **Novo**;
- Taxa de transmissão total média por ERB;
- Taxa de transmissão total média por femtocélula - **Novo**;
- Taxa de transmissão total média por eNodeB - **Novo**;
- Taxa de transmissão efetiva média por ERB;
- Taxa de transmissão efetiva média por femtocélula - **Novo**;
- Taxa de transmissão efetiva média por eNodeB - **Novo**;
- Porcentagem de utilização dos esquemas de modulação e codificação;
- Porcentagem de utilização dos esquemas de modulação e codificação em ambiente fechado - **Novo**;

- Porcentagem de utilização dos esquemas de modulação e codificação em ambiente em espaço aberto - **Novo**;
- Porcentagem de transmissões com sucesso;
- Porcentagem de transmissões com sucesso em ambiente fechado - **Novo**;
- Porcentagem de transmissões com sucesso em espaço aberto - **Novo**;
- Porcentagem de transmissões com falha;
- Porcentagem de transmissões com falha em ambiente fechado - **Novo**;
- Porcentagem de transmissões com falha em espaço aberto - **Novo**;

Vale lembrar que a taxa de dados efetiva é aquela que não leva em consideração os *bits* de codificação. Os resultados marcados como **Novo** são resultados obtidos a partir deste atual trabalho.

#### 4.2.12 SUBSISTEMA DE PARÂMETROS

Subsistema responsável por ler os parâmetros de simulação. Devido as mudanças do simulador, alguns parâmetros tiveram que ser acrescentados. Atualmente os parâmetros são:

- Parâmetros de antena:
  - Ângulo de 3 dB;
  - Ganho mínimo em dB;
- Parâmetros de canal:
  - Média do sombreamento para eNodeB;
  - Média do sombreamento para HeNB - **Novo**;
  - Desvio padrão do sombreamento para eNodeB;
  - Desvio padrão do sombreamento para HeNB - **Novo**;
  - Velocidade do terminal móvel;
  - Perfil do canal;

- Distância de correlação para o grid de sombreamento - **Novo**;
- Perda de penetração da parede - **Novo**;
- Parâmetros de grid:
  - Distancia entre sítios;
  - Distância mínima entre terminal móvel e um eNodeB;
  - Raio da femtocélula - **Novo**;
  - Distância mínima entre terminal móvel e um HeNB - **Novo**;
- Parâmetros de enlace:
  - Número de MCS;
  - Valores de ajuste de curva para cada MCS;
  - Taxa de codificação;
  - Taxa de erro máximo permitida para transmissão;
  - Valores limiares de utilização de cada MCS
- Parâmetros de camada física:
  - Número de elementos de recurso (RE) por subportadora em um *timeslot*;
  - Número de subportadoras por recurso físico;
  - Número de *slots* por subquadro;
  - Duração de tempo de um *timeslot*;
  - Número de subquadros por quadro;
- Parâmetros de escalonamento:
  - Número máximo de usuários alocados por slot;
  - Tipo de algoritmo de alocação de recursos a ser utilizado;
  - Modo de alocação de usuário no subquadro;

- Parâmetros de simulação:
  - Número de transmissões por rodada;
  - Número de eNodeBs;
  - Número de HeNB por célula - **Novo**;
  - Temperatura ambiente;
  - Número de rodada por simulação;
  - Número inicial de usuários em ambiente fechado - **Novo**;
  - Número inicial de usuários em espaço aberto - **Novo**;
  - Número final de usuários em ambiente fechado - **Novo**;
  - Número final de usuários em espaço aberto - **Novo**;
  - Número incremental de usuários em ambiente fechado - **Novo**;
  - Número incremental de usuários m espaço aberto - **Novo**;
  
- Parâmetros de sistema:
  - Largura de banda total do sistema;
  - Frequência toral de operação;
  - Largura de banda de cada subportadora;
  - Potência total do transmissor do eNodeB;
  - Potência total do transmissor do HeNB - **Novo**;
  - Número de antenas de transmissão;
  - Presença de femtocélula - **Novo**;
  - Opção de reuso fracionado de frequência - **Novo**;
  
- Parâmetros do terminal móvel:
  - Figura de ruído do receptor;
  - Atraso no envio do CQI;
  - Período de atualização do CQI;
  - Número de *bits* a ser utilizado na quantização do CQI;
  - Valor mínimo de SINR considerados no cálculo do CQI;

- Valor máximo de SINR considerados no cálculo do CQI;
- Desvio padrão da variável aleatória utilizada para modelar a imprecisão do CQI;

Os parâmetros marcados como **Novo** são parâmetros criados a partir deste atual trabalho.



## 5 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Neste Capítulo são apresentados os parâmetros de simulação, assim como os resultados e suas análises.

### 5.1 INTRODUÇÃO

Visando a analisar o desempenho da rede considerando usuários em ambientes fechados bem como o uso de femtocélulas e o reuso de frequência, alguns cenários de simulações foram executados como mostra a Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Cenários de simulação

Nomenclatura	Cenário
M 1/1	Macro célula reuso 1/1 sem femtocélulas
M 1/3	Macro célula reuso 1/3 sem femtocélulas
M 1/1 F 1/1	Macro célula reuso 1/1 femtocélula reuso 1/1
M 1/1 F 1/3	Macro célula reuso 1/1 femtocélula reuso 1/3
M 1/3 F 1/1	Macro célula reuso 1/3 femtocélula reuso 1/1
M 1/3 F 1/3	Macro célula reuso 1/3 femtocélula reuso 1/3 usando frequências diferentes
M 1/3 F 2/3	Macro célula reuso 1/3 femtocélula reuso 1/1 usando 2/3 da banda
M 2/3 F 1/3	Macro célula reuso 1/1 usando 2/3 da banda femtocélula reuso 1/3

Vale ressaltar os cenários M 1/3 F 1/3, M1/3 F 2/3 e M 2/3 F 1/3, explicados no Capítulo 4, tentam reduzir ao máximo as interferências fazendo com que eNodeBs e HeNBs de um mesmo setor não utilizem a mesma banda de transmissão.

Cada cenário possui a mesma quantidade de usuários, o mesmo número de antenas transmissoras e o mesmo algoritmo de alocação de recursos, variando-se a opção de ter ou não uma HeNB e a opção do tipo de reuso de frequência.

Assim, neste capítulo são apresentados comparativos entre cada cenário de diversas estatísticas conforme descrito no Capítulo 4.

## 5.2 PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Os parâmetros de simulação, em sua maioria foram os mesmos das simulações realizadas em [1]. Entretanto, muitos novos parâmetros foram acrescentados. Nas Tabelas a seguir, os principais parâmetros são apresentados bem como são comentados os novos parâmetros criados.

Tabela 5.2: Parâmetros de antena de transmissão

Parâmetros	Valor	Comentário
Ângulo de 3 dB	70°	Vide [1]
Ganho mínimo	20 dB	Vide [1]

Tabela 5.3: Parâmetros de canal

Parâmetros	Valor	Comentário
Média do sombreamento para eNodeB	0	Vide [11]
Média do sombreamento para HeNB	0	Vide [11]
Desvio padrão do sombreamento para eNodeB	8 dB	Vide [11]
Desvio padrão do sombreamento para HeNB	4 dB	Vide [11]
Distância de correlação para o grid de sombreamento	200 metros	Vide [11]
Perda de penetração da parede	20 dB	Vide [15]
Velocidade do terminal móvel	3 km/h	Vide [1]
Intervalo entre amostras no tempo	90 ms	Vide [1]
Intervalo entre amostras na frequência	9.765,63 Hz	Vide [1]

Tabela 5.4: Parâmetros de *grid*

Parâmetros	Valor	Comentário
Distância entre sítios	700 m	Vide [15]
Distância mínima entre terminal móvel e um eNodeB	35 m	
Raio da femtocélula	10 m	Vide [15]
Distância mínima entre terminal móvel e um HeNB	0,2 m	Vide [15]

Tabela 5.5: Parâmetros de adaptação de enlace

Parâmetros	Valor	Comentário
Número de MCS	3	Vide [1]
MCS 0	QPSK e codificação turbo	Vide [1]
MCS 1	16QAM e codificação turbo	Vide [1]
MCS 2	64QAM e codificação turbo	Vide [1]
Fator de ajuste ( $\beta$ ) para o MCS 0	1,513	Vide [1]
Fator de ajuste ( $\beta$ ) para o MCS 1	3,620	Vide [1]
Fator de ajuste ( $\beta$ ) para o MCS 2	3,620	Vide [1]
Taxa de código	1/3	Vide [1]

Tabela 5.6: Parâmetros de camada física

Parâmetros	Valor	Comentário
Número de elementos de recurso(RE) por subportadora	7	Vide [3]
Número de subportadora por recurso físico(PRB)	12	Vide [3]
Tempo de duração de um <i>slot</i>	0,5 ms	Vide [3]
Número de <i>slot</i> por subquadro	2	Vide [3]

Tabela 5.7: Parâmetros de escalonamento

Parâmetros	Valor	Comentário
Número máximo de usuários alocados por subquadro	6	Vide [1]
Alocar o mesmo usuário nos dois <i>slots</i> do subquadro	Sim	Vide [1]
Algoritmo de alocação	0	Aleatório

Tabela 5.8: Parâmetros de simulação

Parâmetros	Valor	Comentário
Transmissões por rodada	450	27° C
Número de setores	57	
Número de femtocélulas por macrocélula	15	
Temperatura ambiente	300 K	
Rodadas por simulação	200	
Número de usuários <i>indoor</i> por femtocélula	10	
Número de usuários <i>outdoor</i>	30	

Tabela 5.9: Parâmetros do terminal móvel

Parâmetros	Valor	Comentário
Figura de ruído	9 dB	Vide [1]
SINR mínimo para quantização	-10 dB	Vide [1]
SINR máxima para quantização	30 dB	Vide [1]
Atraso no envio do CQI	2 ms	Vide [1]
Desvio padrão do CQI	1 dB	Vide [1]

Tabela 5.10: Parâmetros sistêmicos

Parâmetros	Valor	Comentário
Largura de banda do sistema	10 MHz	Vide [3]
Frequência central de operação	2 GHz	Vide [3]
Largura de banda de subportadora	15 kHz	Vide [3]
Potência total de transmissão do eNodeB	46 dBm	Vide [15]
Potência total de transmissão do HeNB	-20 dBm	Vide [15]
Número de antenas de transmissão	1	
Presença de femtocélulas	0,1	0= Não 1=sim
Cenário de reuso	0, 1 ,2 ,3, 4, 5, 6	Cenários descritos no Capítulo 4

### 5.3 RESULTADOS INTRODUTÓRIOS

Primeiramente, são apresentados alguns dados que são de serventia para futuras análises. A Tabela 5.11 contém a porcentagem do número dos usuários que são servidos por eNodeBs e por HeNBs. A Tabela 5.12 contém a porcentagem da quantidade de usuários em ambiente fechado servido por eNodeBs e a quantidade de usuários em espaço aberto servidos por HeNBs.

Tabela 5.11: Porcentagem dos usuários servidos por HeNBs e eNodeBs.

Usuários servidos por HeNB	Usuários servidos por eNodeB
89%	11%

Tabela 5.12: Porcentagem dos usuários servidos por HeNBs e eNodeBs.

Usuários em espaço aberto servidos por HeNB	Usuários em ambiente fechado servidos por eNodeB
33%	2%

As Tabelas 5.11 e 5.12 mostram que uma quantidade significativas de usuários em espaço aberto são atendidos por HeNBs.

### 5.4 COMPARATIVO DA QUALIDADE DO CANAL

Para realizar a análise da qualidade do canal, foram geradas as médias e as curvas da CDF dos valores de SINR para os diversos cenários, como pode ser visto nas Figuras 5.1 e 5.2.

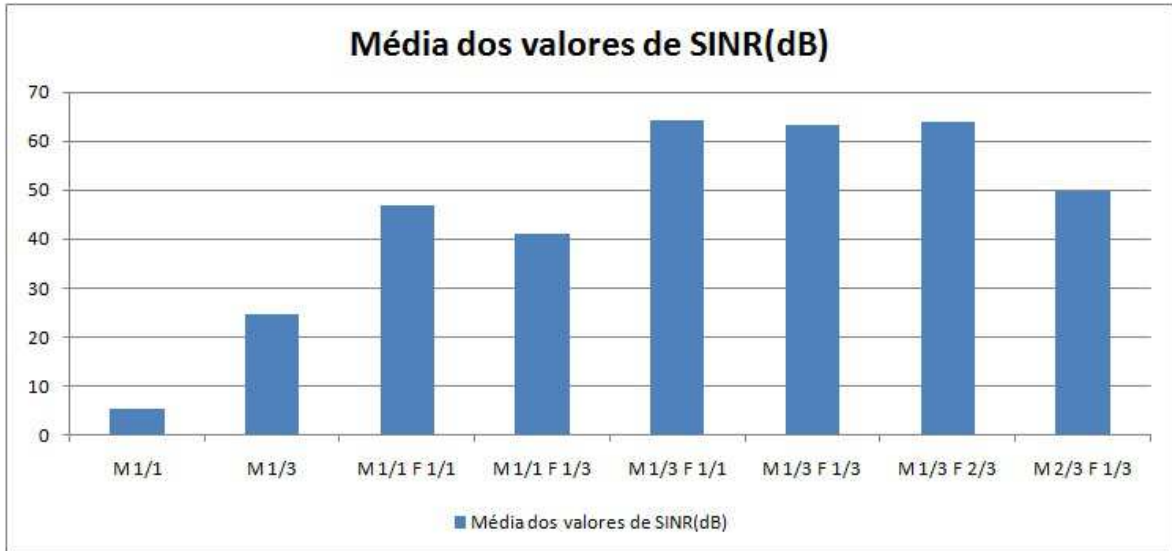


Figura 5.1: Média dos valores de SINR.

Podemos ver que nos casos sem a presença de femtocélulas, no M 1/3, a média dos valores de SINR aumenta consideravelmente em relação ao caso M 1/1 devido ao fato de que a interferência causada pelas transmissões para outros usuários em setores diferentes não existe mais.

Nos casos com femtocélulas, os valores de SINR aumentam bastante em relação aos casos sem femtocélulas como o esperado. Analisando os diferentes cenários de reuso de frequência, vemos os melhores resultados nos casos M 1/3 F 1/1, M 1/3 F 2/3 e M 1/3 F 1/3 com médias e variâncias bem próximas.

A explicação é que como os eNodeBs são os grandes responsáveis pelos sinais interferentes, por transmitir em uma potência bem mais elevada tendo um raio de alcance maior do que os HeNBs, com o fator de reuso 1/3, somente os usuários de um mesmo setor se interferem fazendo com que o número de sinais interferentes diminua bastante aumentando os valores de SINR.

Nos casos restantes, como o reuso utilizado pelos eNodeBs é o 1/1, o número de sinais interferentes é maior fazendo com que os valores de SINR sejam menores do que nos casos citados anteriormente.

Como a escolha dos MCS depende diretamente dos valores de SINR(quanto maior o SINR, melhor a qualidade do canal e o MCS que oferece número de informação a ser transmitida é escolhido), as mesmas explicações valem para a Figura 5.3 que representa

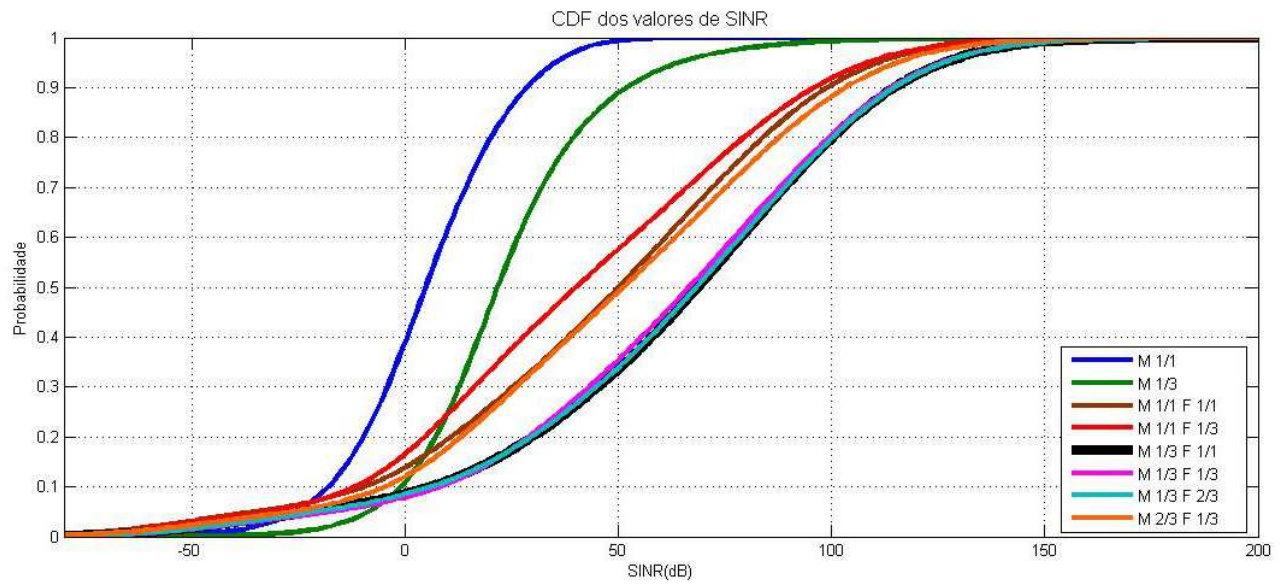


Figura 5.2: CDF dos valores de SINR.

a porcentagem do uso de MCS para cada cenário de simulação.

Analisando agora a qualidade do canal para os usuários em ambientes fechados e em espaço aberto separadamente como mostram as figuras 5.4, 5.5, 5.6 e 5.7,

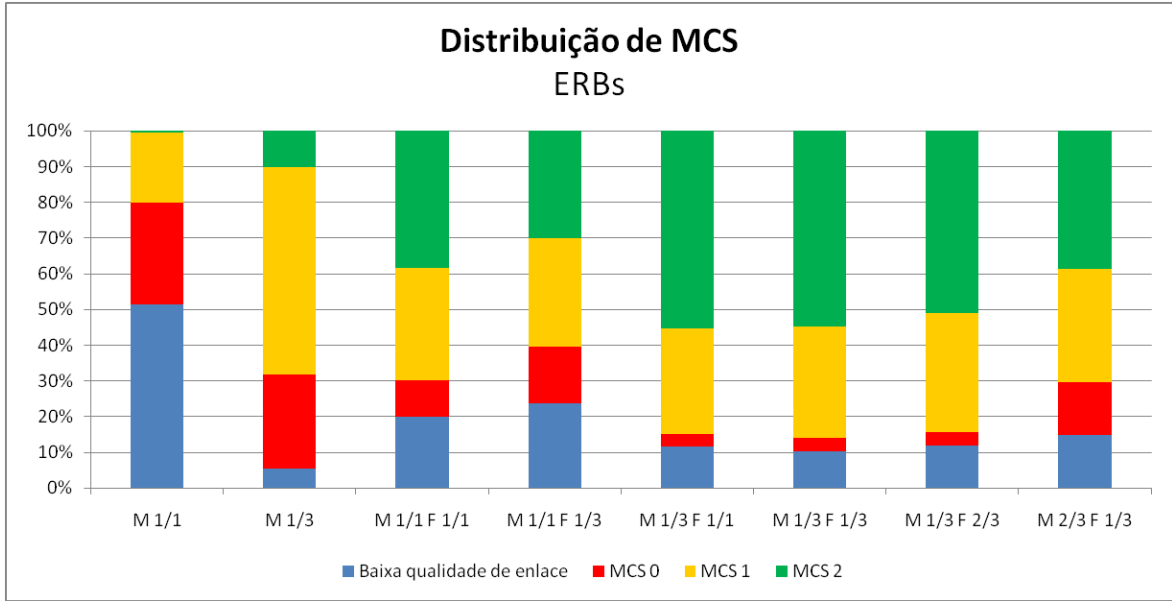


Figura 5.3: Distribuição de MCS das ERBs.

podemos ver que em ambientes fechados, os melhores desempenhos são observados na presença de femtocélulas nos casos em que o reuso da macrocélula é de 1/3 com curvas bem semelhantes, em seguida temos o caso M 2/3 F 1/3 no meio termo dos casos M 1/1 F 1/1 e M 1/1 F 1/3. Como o esperado, os piores desempenhos foram notados nos casos M 1/1 e M 1/3 em que não há presença de femtocélulas e os usuários são atendidos somente por eNodeBs.

Em ambientes abertos, podemos ver como a presença de femtocélulas pode prejudicar a qualidade do canal. O melhor resultado é observado na ausência de femtocélula com reuso 1/3 seguido dos casos M 1/3 F 1/3, M 1/1 e M 2/3 F 1/3. Esses casos possuem um bom desempenho devido ao fato de que as femtocélulas não interferem nos usuários atendidos pelos eNodeBs. O caso M 1/3 F 2/3 merece uma atenção. Apesar da baixa média, levando em consideração que os HeNBs não interferem nos eNodeBs, vemos uma variância bastante ampla principalmente para valores altos de SINR. Isso significa que apesar de ter valores baixos de SINR provavelmente causados pela interferência proveniente de outras células, existem valores altos que são refletidos na variância.

Por último, temos os casos M 1/1 F 1/3, M 1/1 F 1/1 e M 1/3 F 1/1. O cenário M 1/1 F 1/3 possui a melhor média e uma menor variância devido ao fato de que as femtocélulas utilizam apenas 1/3 da banda de transmissão disponível. O caso M 1/3 F 1/1 possui uma melhor média em comparação ao caso M 1/1 F 1/1 devido ao fato do fator de reuso 1/3. Ambos possuem uma alta variância.



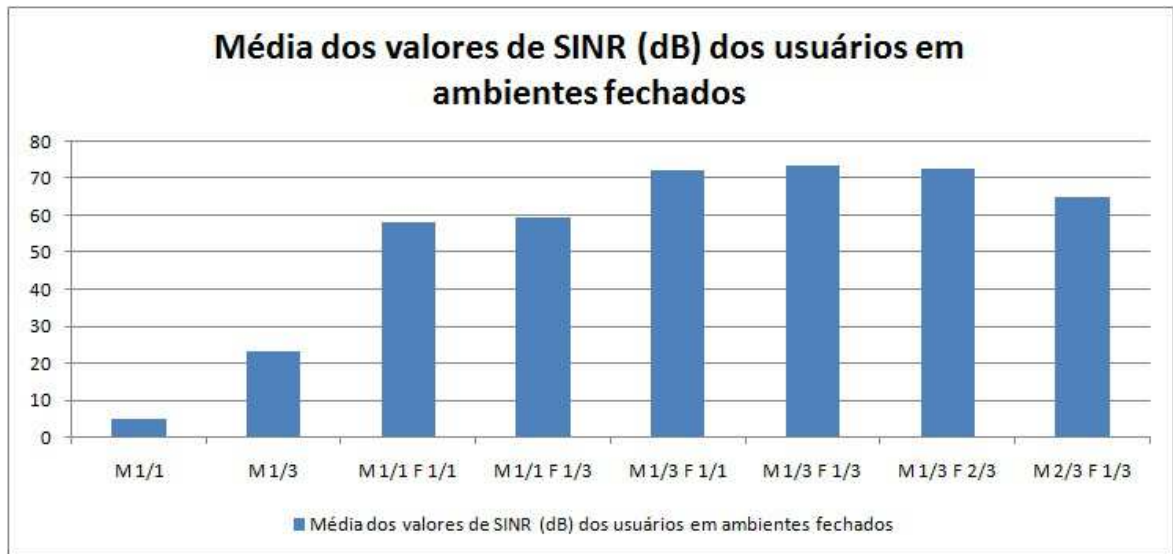


Figura 5.4: Média dos valores de SINR em ambientes fechados.

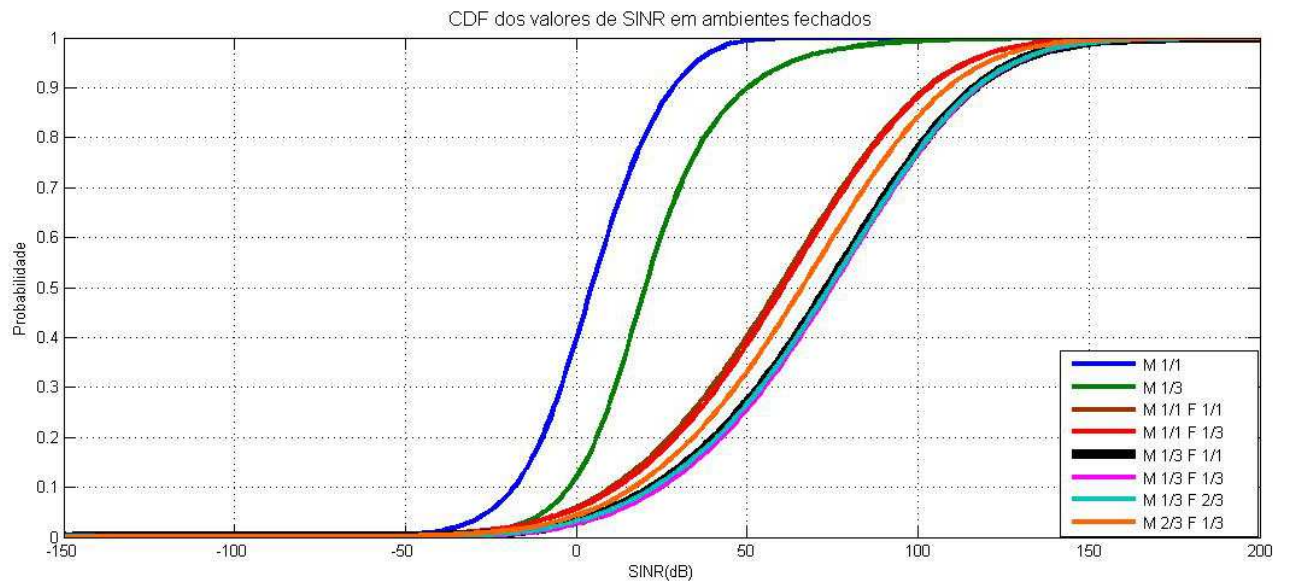


Figura 5.5: CDF dos valores de SINR em ambientes fechados.

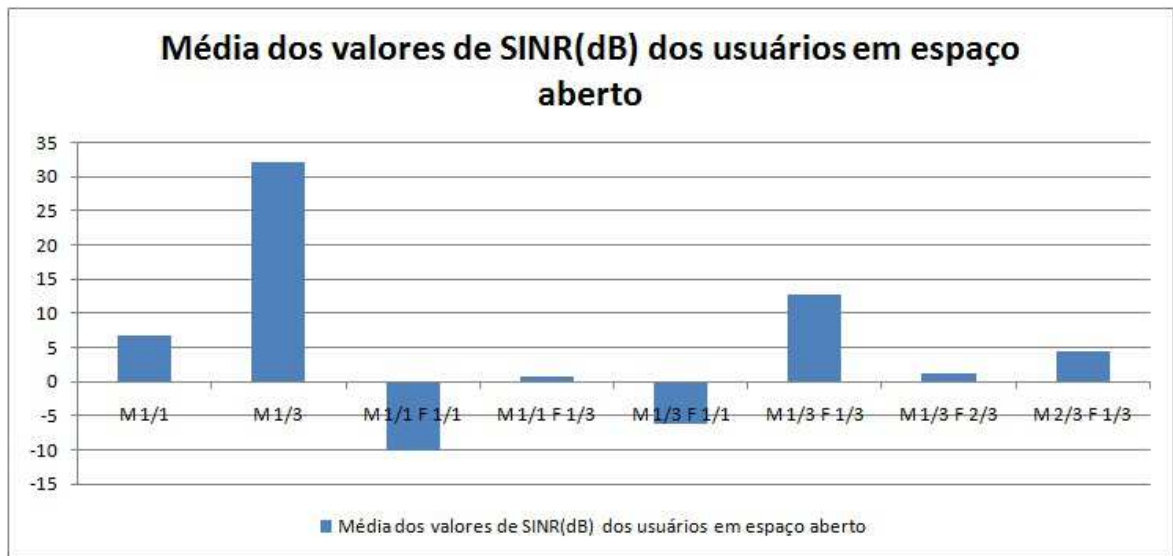


Figura 5.6: Média dos valores de SINR em espaço aberto.

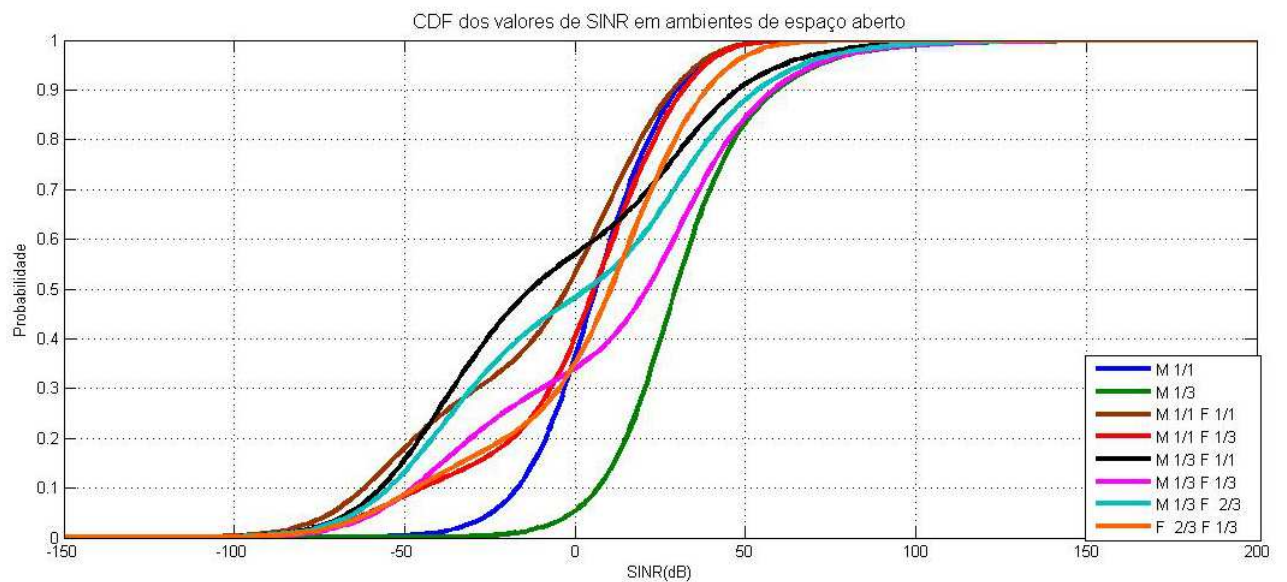


Figura 5.7: CDF dos valores de SINR em espaço aberto.

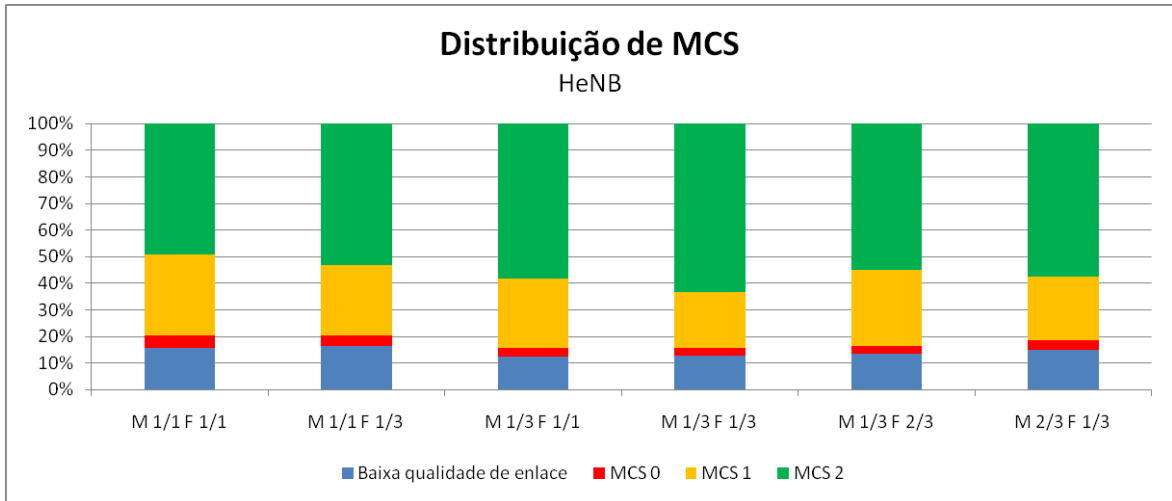


Figura 5.8: Distribuição de MCS dos HeNBs.

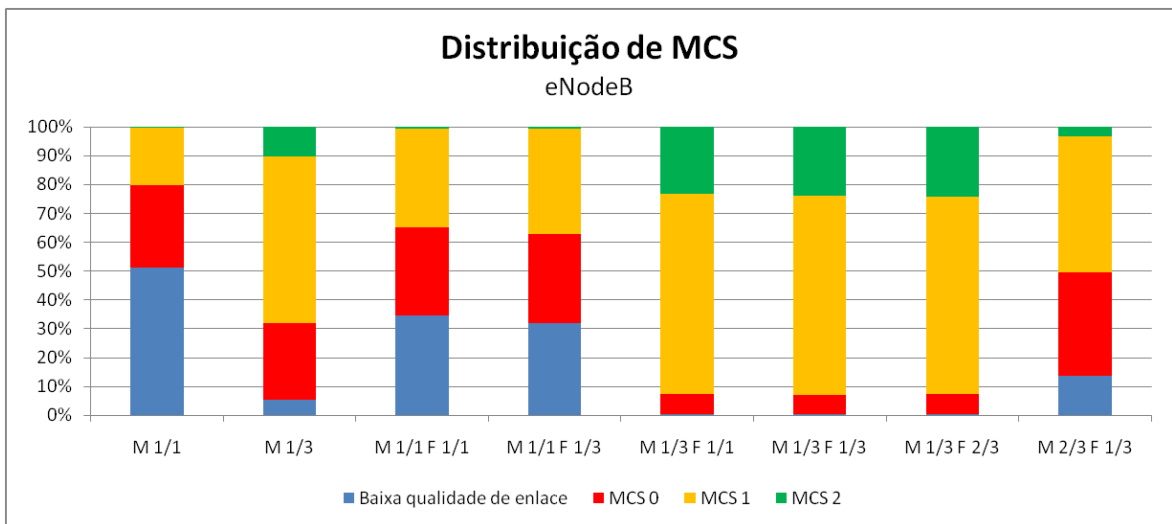


Figura 5.9: Distribuição de MCS dos eNodeBs.

As mesmas explicações das curvas de SINR separadas em ambientes fechados e em espaço aberto são válidas para as escolhas de MCS como vemos nas Figuras 5.8 e 5.9.

Outro fator a ser analisado é a porcentagem da quantidade de transmissões realizadas com sucesso como podemos ver na Figura 5.10.

Partindo do princípio de que quanto maior é a quantidade de *bits* transmitidos em um único símbolo OFDM, maior é a probabilidade de erro de *bit* que causaria uma falha de uma transmissão. Por isso, quanto maior a porcentagem do uso de MCSs que oferecem um número maior de informação por símbolos, maior será a porcentagem de falhas de transmissões. Porém a taxa média total e efetiva de dados, considerando um número de recursos de rádio reduzido, compensa uma maior taxa de falhas como veremos na

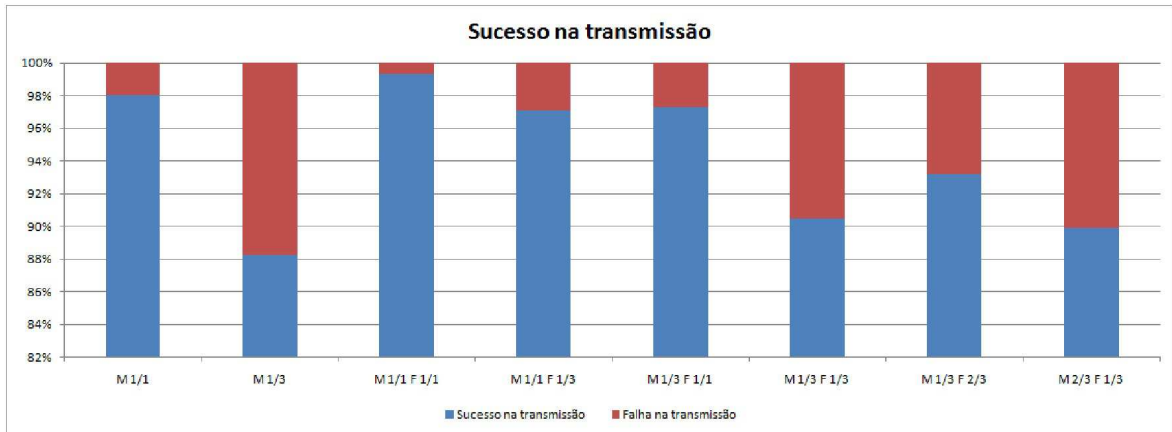


Figura 5.10: Porcentagem do número de transmissões com sucesso.

próxima Seção.

Nos casos sem femtocélulas, no cenário M 1/3 a porcentagem de melhores MCSs são escolhidos devido a uma melhor qualidade do canal fazendo com que o número de transmissões com falha é maior do que no cenário M 1/1.

Nos casos com femtocélulas, como a qualidade do canal é bem melhor, mesmo com MCS de maior aproveitamento espectral, a taxa de falha de transmissão é baixa. Vale ressaltar a baixa porcentagem de falha de transmissão em comparação aos outros casos no caso M 1/1 F 1/1. Tamanho sucesso de transmissão pode ser explicado pelo fato de que a blindagem das paredes dos ambientes fechados fazem com que as interferências causadas pelas células adjacentes e pelas próprias femtocélulas não seja tão prejudicial.

## 5.5 COMPARATIVO DE DESEMPENHO

Objetivando fazer comparações entre os cenários simulados do desempenho da rede, dados como a taxa de transmissão média (total e efetiva) e curvas de CDF das taxas de transmissão dos usuários (total e efetiva) foram obtidos como podemos ver nas Figuras 5.11 5.12 5.13.

Considerando os cenários sem femtocélulas, obtemos uma maior média de taxa de transmissão no cenário M 1/1 devido ao fato de que a quantidade de banda disponível é maior. Entretanto, a variância também é maior do que no caso M 1/3. Isso significa que existem usuários com uma taxa muito alta e usuários com taxas muito baixas, não há uma distribuição justa. No cenário M 1/3, a variância é menor, ou seja existem mais usuários com uma taxa de transmissão mais próximas da média.

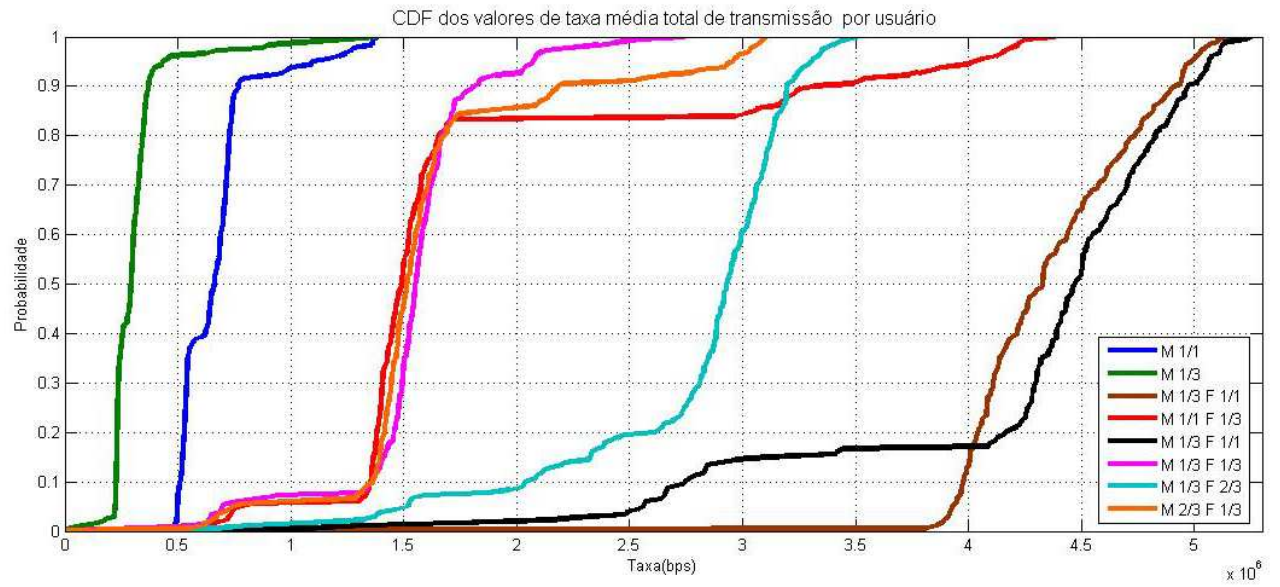


Figura 5.11: CDF dos valores de taxa de transmissão total dos usuários

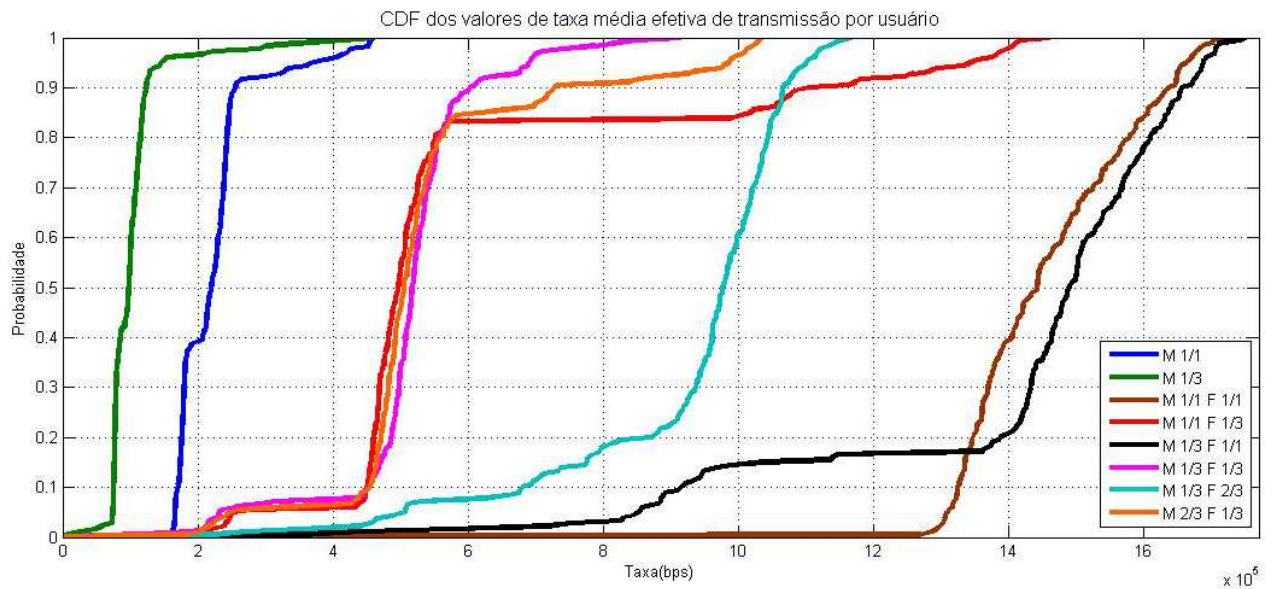


Figura 5.12: CDF dos valores de taxa de transmissão efetiva dos usuários

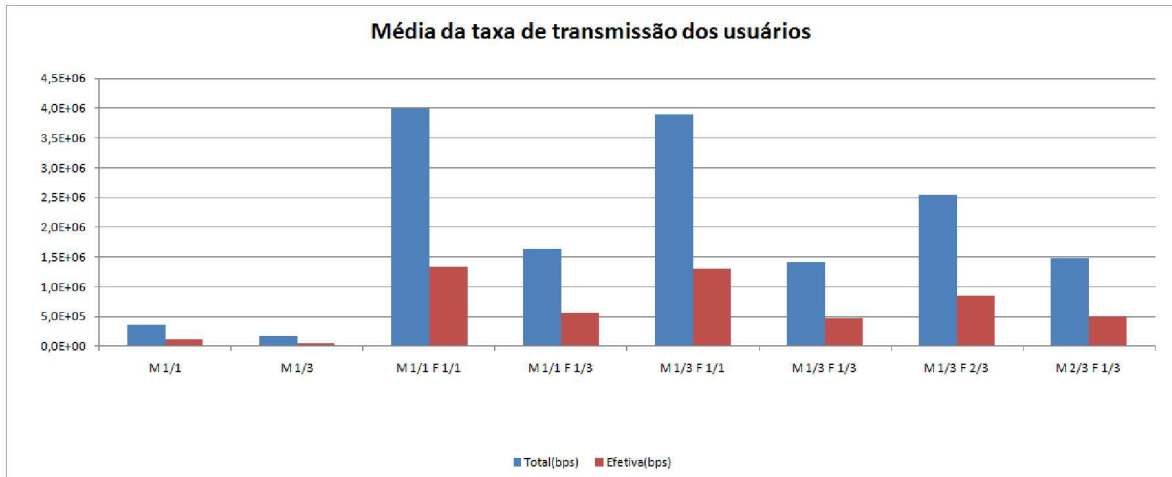


Figura 5.13: Média da taxa de transmissão dos usuários

Nos cenários com femtocélulas, os melhores resultados foram observados nos casos que o reuso aplicado aos HeNB foram o 1/1. Como a maioria dos usuários está em ambientes fechados, a maioria dos usuários é contemplada com toda a banda disponível. Vemos que o melhor desempenho em média de todos é o cenário M 1/1 F 1/1 que possui toda a banda disponível seguido do cenário M 1/3 F 1/1 em que as macrocélulas possuem reuso 1/3 e, por isso, interferem menos nos usuários que são servidos pelas femtocélulas. Porém, observamos uma variância que reflete valores mais baixos por conta dos usuários em espaço aberto contemplados com 1/3 da banda. O cenário M 1/3 F 2/3 em que o reuso do HeNB é o 1/1 usando 2/3 da banda, tem uma média de taxa de transmissão inferior, pois utiliza apenas 2/3 da banda.

Nos demais casos, os cenários possuem média bastante próximas e o que varia são as variâncias. O caso que possui a menor variância é o caso M 1/3 F 1/3 como o esperado já que teoricamente é o cenário que possui o menor número de sinais interferentes. Em seguida temos o caso M 2/3 F 1/3 onde os eNodeBs, assim como no caso M 1/3 F 1/3, não interferem nos HeNBs de um mesmo setor. Porém, 1/3 das subportadoras sempre interferem nos setores das células adjacentes fazendo com que a média seja um pouco menor e uma variância um pouco maior do que no caso M 1/3 F 1/3. O cenário M 1/1 F 1/3 possui uma maior média e variância comparando com os cenários M 1/3 F 1/3 e M 2/3 F 1/3, visto que a banda disponível para usuários em espaço aberto é maior, proporcionando maiores taxas para os mesmos, porém causando mais interferências em toda a rede.

Para ampliar a análise, foram obtidos os mesmos dados anteriores, porém separadamente para usuários em ambientes fechados, como vemos nas Figuras: 5.14 5.15 5.16,



e em espaço aberto como vemos nas Figuras: 5.17 5.18 5.19.

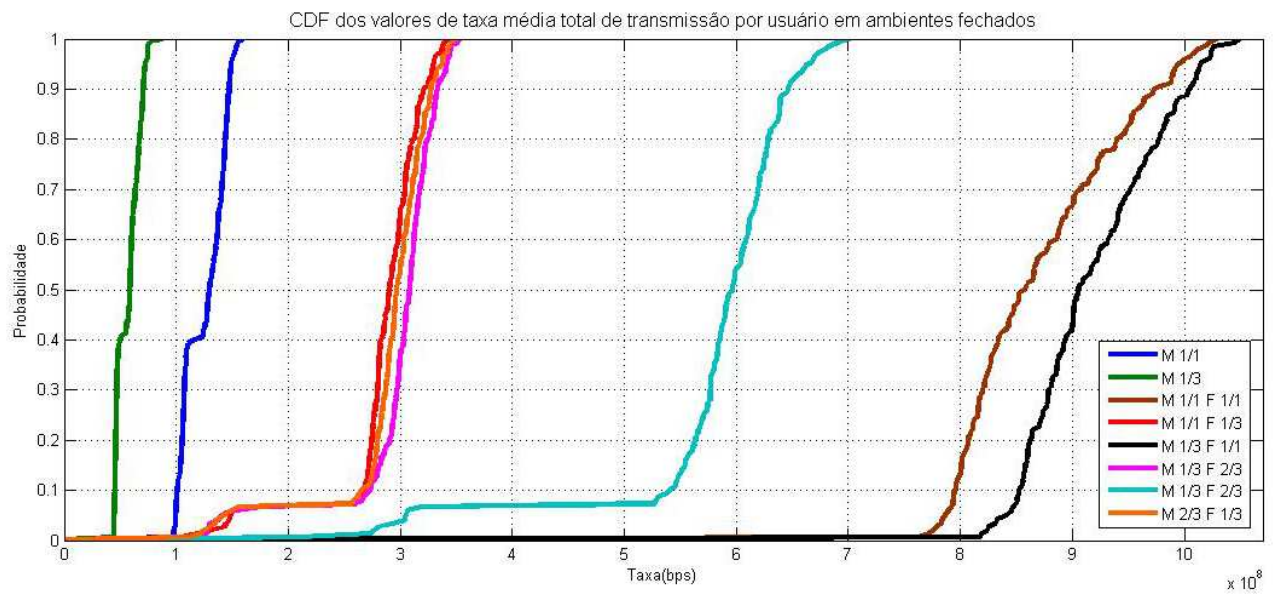


Figura 5.14: CDF dos valores de taxa de transmissão total dos usuários em ambientes fechados

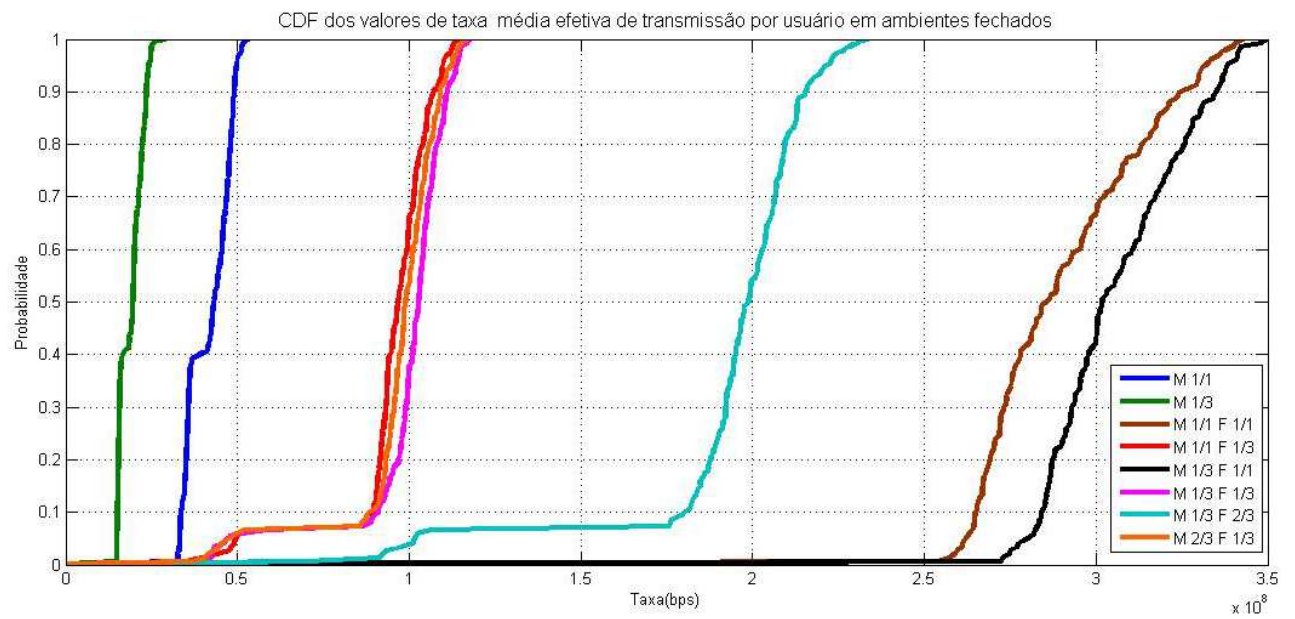


Figura 5.15: CDF dos valores de taxa de transmissão efetiva dos usuários em ambientes fechados

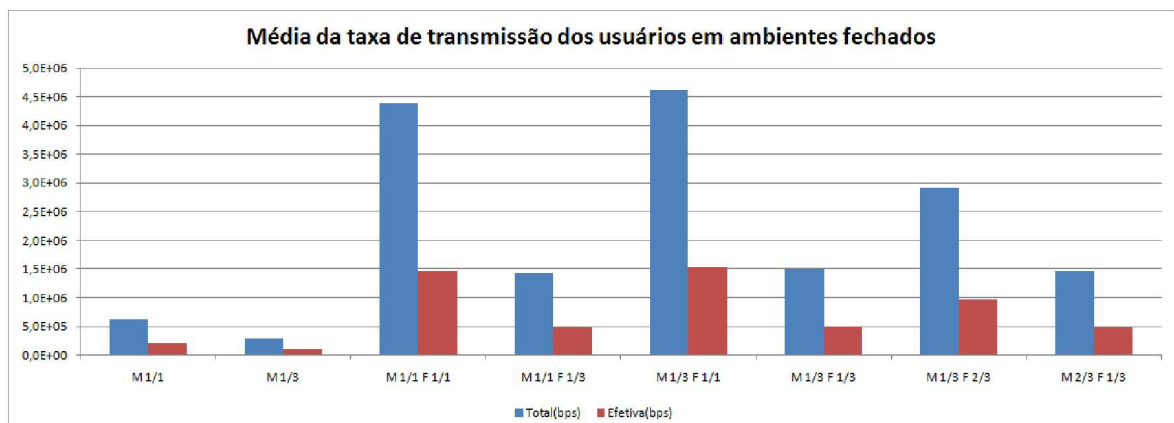


Figura 5.16: Média das taxas de transmissão dos usuários em ambientes fechados



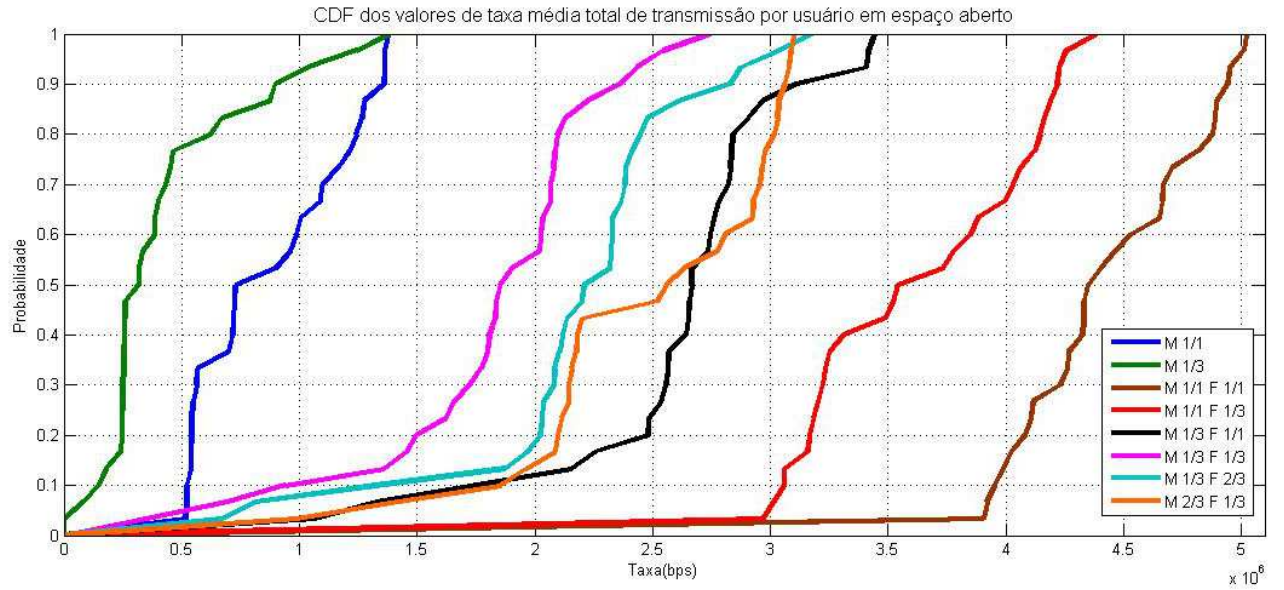


Figura 5.17: CDF dos valores de taxa de transmissão total dos usuários em espaço aberto

Para os usuários em ambientes fechados, que correspondem a maioria dos usuários, vemos que a classificação por desempenho das curvas são as mesmas, com exceção do cenário M 1/3 F 1/1 que agora possui um melhor desempenho devido ao reuso 1/3 das macrocélulas, quando olhamos as CDFs correspondente a todos os usuários, porém com uma média bem mais elevada e uma variância bem menor. Isso explica, nos casos com presença de femtocélulas, que a melhor qualidade do canal em ambientes fechados devido a presença de HeNBs e a blindagem contra as interferências causadas pelos eNodeBs favorece e muito elevadas taxas de transmissão.

Para o caso dos usuários em espaço aberto, podemos ver que os melhores desempenhos em média são nos casos em que os reusos das macrocélulas é o 1/1 devido à maior quantidade de banda disponível. O fato de o cenário M 1/1 F 1/1 ter um desempenho inferior ao cenário M 1/1 F 1/3 pode causar uma certa estranheza, porém pode ser explicado pelo fato de que a taxa de sucesso de transmissão foi bem superior no cenário M 1/1 F 1/1. Outra explicação possível é que, de acordo com as Tabelas 5.11 e 5.12, existem um número considerável de usuários em espaço aberto sendo atendidos por HeNBs.

Em seguida, vemos os cenários M 1/3 F 1/1 e M 2/3 F 1/3 com médias bem próximas e variâncias bem distintas. Podemos ver que no cenário M 2/3 F 1/3, a variância é menor pois os eNodeBs não interferem nos HeNBs de um mesmo setor.

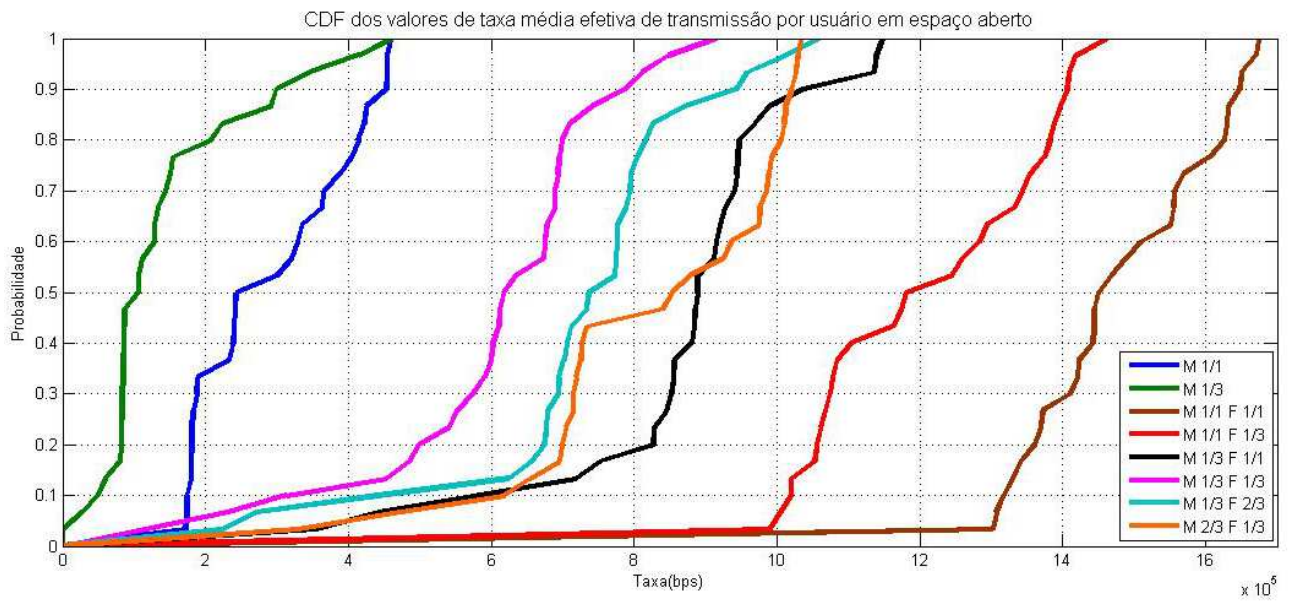


Figura 5.18: CDF dos valores de taxa de transmissão efetiva dos usuários em espaço aberto

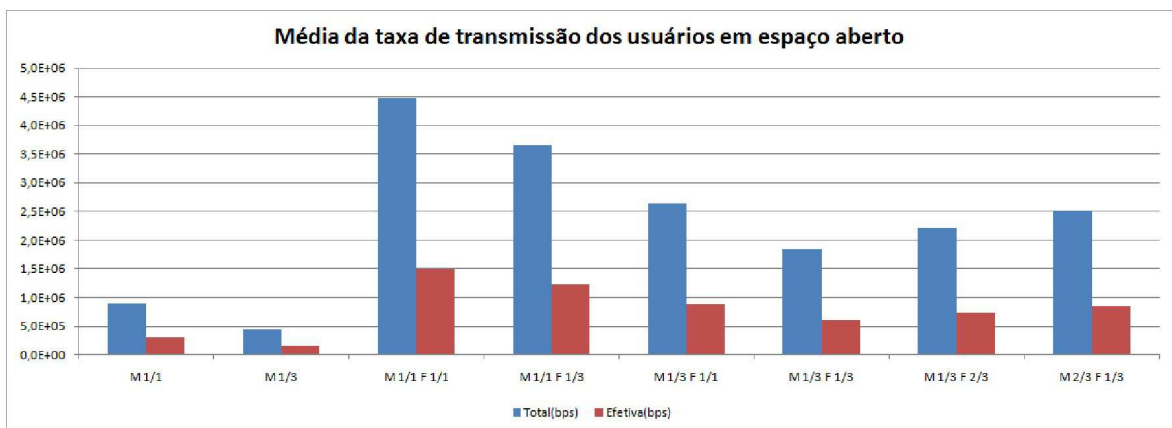


Figura 5.19: Média das taxas de transmissão dos usuários em espaço aberto

Por ultimo temos os casos M 1/3 F 1/3 e M 1/3 F 2/3 com variâncias bem parecidas porém com a média superior no caso M 1/3 F 2/3. Isso reforça a explicação da influência da quantidade de usuários em espaço aberto serem atendidos por HeNBs.

Os casos sem femtocélulas possuem comportamentos semelhantes às análises anteriores.

Um outro dado gerado pelo simulador é o das médias das taxas de transmissões das ERBs como um todo bem como dos HeNBs e eNodeBs separados.

Esses dados resumem todas as análises anteriores esclarecendo alguns dados duvidosos como o cenário M 1/1 F 1/1 possuir um melhor desempenho do que o cenário M 1/1

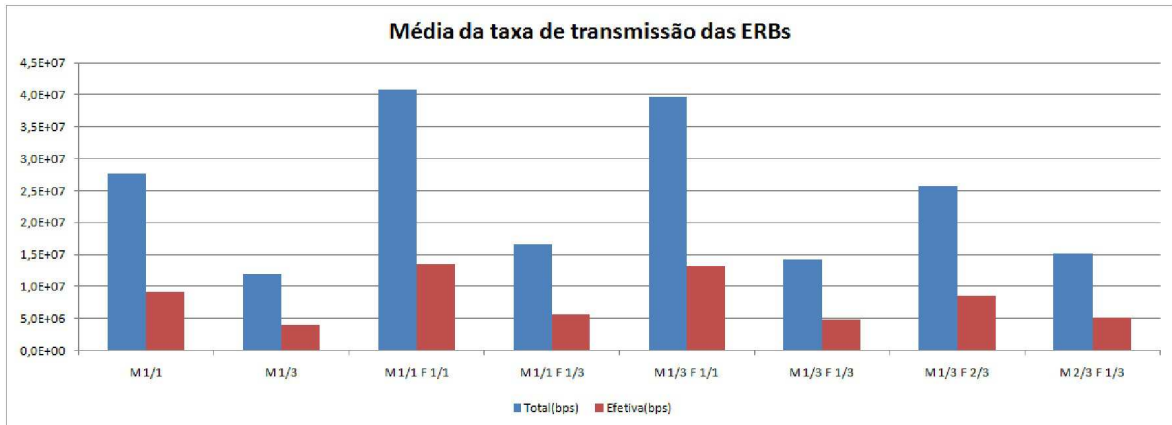


Figura 5.20: Média das taxas de transmissão das ERBs

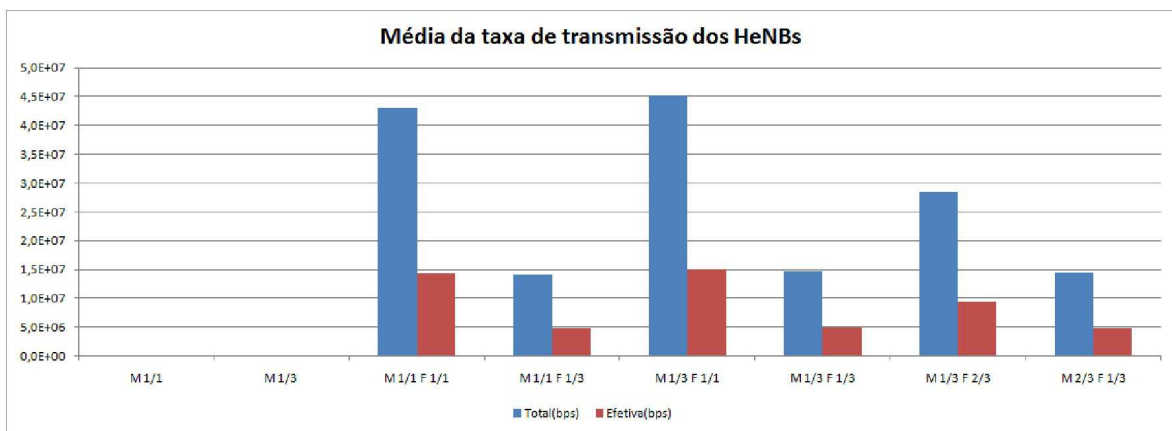


Figura 5.21: Média das taxas de transmissão das HeNBs

F 1/3 para os usuários em espaço aberto devido ao fato de que agora é considerado a quantidade de *bits* transmitido pelas ERBs em geral não importando a localização do usuário. Vale ressaltar que na Figura 5.22, os casos M 1/1 F 1/1 e M 1/1 F 1/3 apresentam resultados praticamente idênticos com uma leve superioridade no caso M 1/1 F 1/3. O caso M 1/1 tem o seu alto valor explicado pelo fato de que somente os eNodeBs servem todos os usuários.

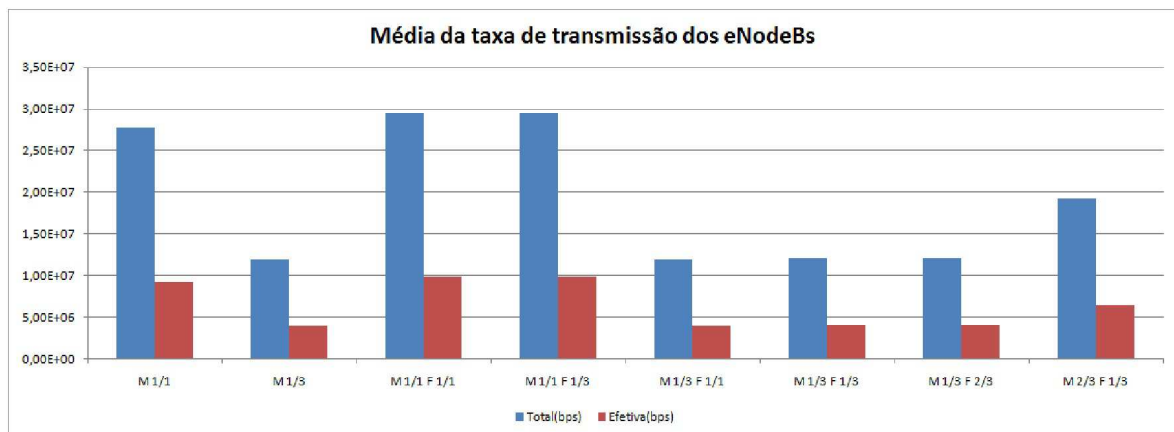


Figura 5.22: Média das taxas de transmissão dos eNodeBs

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho busca realizar um estudo sobre femtocélulas a partir do aprimoramento de uma ferramenta já existente de simulação sistêmica para sistemas MIMO/OFDM. Foram inseridas novas funcionalidades no simulador que objetivaram propor novas análises bem como a geração de novos resultados. Um melhor modelo de sombreado, geração de usuários em ambientes aberto e fechados, opções de reuso de frequência assim como a opção do uso de femtocélulas em ambientes fechados contribuíram para uma melhor ferramenta de simulação.

Com a crescente demanda de tráfego de dados móvel pelo mundo, a atual tecnologia para redes celulares precisa evoluir para acompanhar tal crescimento. Tendo como certo o 3G LTE como a evolução das redes celulares, uma solução para driblar o elevado custo de implantação assim como a melhoria da cobertura de ambientes fechados, o uso de femtocélulas se mostra bastante interessante.

Visando demonstrar as vantagens e desvantagens das femtocélulas, oito cenários, como mostra a Tabela 6.1, com os mesmos parâmetros variando apenas a presença de femtocélulas e o reuso de frequência foram executados: Comparando os casos sem fem-

Tabela 6.1: Cenários de simulação

Nomenclatura	Cenário
M 1/1	Macro célula reuso 1/1 sem femtocélulas
M 1/3	Macro célula reuso 1/3 sem femtocélulas
M 1/1 F 1/1	Macro célula reuso 1/1 femtocélula reuso 1/1
M 1/1 F 1/3	Macro célula reuso 1/1 femtocélula reuso 1/3
M 1/3 F 1/1	Macro célula reuso 1/3 femtocélula reuso 1/1
M 1/3 F 1/3	Macro célula reuso 1/3 femtocélula reuso 1/3 usando frequências diferentes
M 1/3 F 2/3	Macro célula reuso 1/3 femtocélula reuso 1/1 usando 2/3 da banda
M 2/3 F 1/3	Macro célula reuso 1/1 usando 2/3 da banda femtocélula reuso 1/3

tocélulas, foi observado que apesar de uma maior taxa de transmissão obtida no cenário M 1/1 devido ao fato de uma maior banda de transmissão disponível, uma distribuição mais justa dos valores de taxa de transmissão é encontrada no cenário M 1/3 devido

a uma melhora na qualidade do canal em função da redução da interferência proveniente do reuso implementado. Os cenários com femtocélulas, taxas bastantes superiores foram observadas como o esperado principalmente nos cenários M 1/3 F 1/1, M 1/1 F 1/1 e M 1/1 F 2/3 em que os HeNBs possuem a totalidade ou a grande maioria da banda de transmissão disponível. Vale ressaltar que o melhor desempenho foi observado no cenário M 1/3 F 1/1 visto que as macrocélulas possuem reuso 1/3 e, por isso, interfere menos nos usuários que são servidos pelas femtocélulas.

Analisando os cenários com femtocélulas, quando se observa a qualidade do canal (SINR) em ambientes de espaço aberto, vemos como as femtocélulas podem ser prejudiciais. O melhores valores de SINR foram observados no cenário M 1/3. Cenário que não possui femtocélulas e aplica o reuso de frequência com fator 1/3. O segundo melhor cenário é o M 1/3 F 1/3 em que as femtocélulas não interferem nos usuários de um mesmo setor. O cenário M 1/1 foi o terceiro melhor visto que não há a presença de femtocélulas. Os cenários M 1/1 F 1/1 e M 1/3 F 1/1 foram os cenários que apresentaram o pior resultado visto que os HeNBs interferem nos usuários atendidos pelos eNodeBs de um mesmo setor.

Como mostra este trabalho, o uso de femtocélulas está ficando cada vez mais em evidência e por esse motivo são sugeridos alguns estudos futuros como:

- Algoritmos de alocação de recursos levando em consideração as femtocélulas;
- Controle de potência para as femtocélulas;
- *Handover* levando em consideração as femtocélulas;

Em relação à ferramenta utilizada neste trabalho, são sugeridas algumas futuras implementações como:

- Otimização do código fonte do simulador;
- Implantação do enlace reverso;
- Geração da matriz de canal que simula o desvanecimento em pequena escala levando em consideração os ambientes fechados e quando o sinal se propaga pelos ambientes fechados e em espaço aberto;
- Melhoria na interface Enlace - Sistema;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Guilherme Silveira Rabelo. Desenvolvimento de um Ferramenta de simulação Sistêmica para o Estudo de alocação de recursos em sistemas MIMO/OFDM, 2008.
- [2] Mahmoodi, disponível em <http://www.ualberta.ca/~mahmoodi/thesis.html>, Acessado em agosto 2011.
- [3] Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Sköld, and Per Beming. *3G EVOLUTION: HSPA and LTE FOR MOBILE BROADBAND*. Elsevier, 84 Theobalds Road, London WC1X 8RR, UK, 2007.
- [4] Radio Electronics, disponível em <http://www.radio-electronics.com>, Acessado em agosto 2011.
- [5] Femto Forum, disponível em <http://www.femtoforum.org>, Acessado em agosto 2011.
- [6] Femto Forum, The Best That LTE can be, 2010.
- [7] Noticias da Cisco, disponível em <http://globalnewsroom.cisco.com/easyir/br/pt/local/press-release/trafego-de-dados-moveis-no-brasil-deve-crescer-39-vezes-ate-2015-743877.html>, Acessado em agosto 2011.
- [8] Bytemobile, disponível em <http://www.bytemobile.com>, Acessado em agosto 2011.
- [9] 3GPP, disponível em <http://www.3gpp.org>, Acessado em agosto 2011.
- [10] Theodore S. Rappaport. *Wireless Communications Principles and Prattice Second Edition*. Prentice Hall, 2002.
- [11] Louay Jeff Zhuang, Jalloul Robert Novak, and Jeongho Park. IEEE 802.16m Evaluation Methodology Document EMD, janeiro 2009.

- [12] Femto Forum, Femtocell Market Status Issue 7, junho de 2011, junho 2011.
- [13] GCC, disponível em <http://gcc.gnu.org>, Acessado em agosto 2011.
- [14] Ubuntu, disponível em <http://www.ubuntu-br.org>, Acessado em agosto 2011.
- [15] Femto Forum, Interference Management in OFDMA Femtocells, 2010.
- [16] Simon R. Saunders and Alejandro Aragón Zavala. *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems, 2nd Ed.* Prentice Hall.
- [17] ITPP, disponível em <http://itpp.sourceforge.com>, Acessado em agosto 2011.
- [18] Femto Forum, femtocells Natural Solution for Offload, 2010, 2010.
- [19] Signals Research Group, LLC, The Business Case for Femtocells in the Mobile Broadband era, março 2010.
- [20] Atsushi Harada, Yoshiaki Ofuji, and Naoto Okubo. Overview of Super 3G LTE System and Experimental Results, 2008.
- [21] Moray Rumney BSc. 3GPP LTE: Introducing Single-Carrier FDMA, 2008.
- [22] Dr Wajih A and Abu-Al-Saud. Lecture 10: Frequency Reuse Concepts, 2008.
- [23] Comércio eletrônico, disponível em <http://www.comercioeletronico.blog.br/?p=765>, Acessado em agosto 2011.
- [24] Tecnologia IG, disponível em <http://tecnologia.ig.com.br/noticia/2011/06/29/com+smartphone>, Acessado em agosto 2011.
- [25] Cisco, disponível em <http://www.cisco.com/web/pt/press/articles/110215.html>, Acessado em agosto 2011.
- [26] Gente e mercado, disponível em <http://genteemercado.com.br/estudo-preve-crescimento-exponencial-das-vendas-de-smartphones-e-tablets/>, Acessado em agosto 2011.
- [27] Deloitte, disponível em <http://www.deloitte.com>, Acessado em agosto 2011.
- [28] Poongup Lee, Taeyoung Lee, Jangkeun Jeong, and Jitae Shin. Interference management in LTE femtocell systems using Fractional Frequency. *Advanced Communication Technology (ICACT), 2010 The 12th International Conference on*, fevereiro 2010.



- [29] Fujii H and Yoshino H. Theoretical Capacity and Outage Rate os OFDMA cellular system with Fractional Frequency Reuse. *Vehicular Technology Conference, 2008. VTC Spring 2008 IEEE*, maio 2008.
- [30] Assaad M. Optimal fractional frequency reuse FFR in Multicellular OFDMA System. *Vehicular Technology Conference, 2008. VTC 2008-Fall. IEEE 68th*, setembro 2008.

**OUTROS TRABALHOS EM**  
**[www.projetoderedes.com.br](http://www.projetoderedes.com.br)**