

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA  
DE SIMULAÇÃO SISTÊMICA PARA O  
ESTUDO DE ALOCAÇÃO DE RECURSOS  
EM SISTEMAS MIMO/OFDM**

**Guilherme Silveira Rabelo**

Brasília, julho de 2008

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA  
DE SIMULAÇÃO SISTÊMICA PARA O  
ESTUDO DE ALOCAÇÃO DE RECURSOS  
EM SISTEMAS MIMO/OFDM**

**Guilherme Silveira Rabelo**

*Relatório submetido ao Departamento de Engenharia  
Elétrica como requisito parcial para obtenção  
do grau de Engenheiro Eletricista*

**Banca Examinadora**

Prof. Dr. Robson Domingos Vieira, ENE/UnB

*Orientador*

\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Paulo Henrique Portela de Carvalho, ENE/UnB

*Co-orientador*

\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Antônio José Martins Soares, ENE/UnB

*Examinador interno*

\_\_\_\_\_

Prof. Dr. André Noll Barreto, INdT

*Examinador externo*

\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Leonardo Aguayo, INdT

*Examinador externo*

\_\_\_\_\_

## **Dedicatória**

*Dedico este trabalho a todos aqueles que me ajudaram e apoiaram no seu desenvolvimento.*

*Guilherme Silveira Rabelo*

## **Agradecimentos**

*Agradeço a Deus, único digno de toda honra, glória e louvor, por seu amor, cuidado e sustento.*

*Agradeço à minha família, pelo suporte e acolhimento.*

*Agradeço à Luisa, pelo apoio, compreensão e paciência.*

*Agradeço aos meus orientadores, pelos conhecimentos e experiências compartilhados.*

*Por fim, agradeço aos meus colegas do LEMOM e do INdT, pela oportunidade de trabalho e pela ajuda nas dúvidas e dificuldades.*

*Guilherme Silveira Rabelo*

---

## RESUMO

Este trabalho propõe uma ferramenta de simulação sistêmica para o estudo de alocação de recursos em sistemas MIMO/OFDM. Baseado na tecnologia 3G LTE, o simulador desenvolvido inclui algumas das técnicas que vêm sendo propostas para as próximas gerações de sistemas celulares, entre elas escalonamento de usuários baseado em informações de rede, modulação e codificação adaptativa e utilização de múltiplas antenas na transmissão. Para ilustrar a utilização do simulador, foram realizadas simulações variando-se o algoritmo de alocação de recursos e o número de antenas na transmissão visando seleção de antenas. O primeiro algoritmo, que visa a maximização da taxa de transmissão total por célula, aloca os recursos aos usuários que possibilitam a transmissão com a maior taxa possível. O segundo algoritmo, que visa uma distribuição mais justa dos recursos entre os usuários, leva em conta não apenas a taxa de transmissão instantânea demandada pelos usuários, mas também o histórico de taxa de transmissão de cada usuário ao longo da simulação. Por fim, o terceiro algoritmo aloca os recursos de forma aleatória entre os usuários da rede. De acordo com os resultados de simulação, o segundo algoritmo, apesar de não obter os melhores resultados em termos de taxas de transmissão média por usuário e média por setor, apresentou o melhor compromisso entre desempenho de rede e igualdade na distribuição de recursos, justificando sua utilização em redes reais. Quanto à utilização de múltiplas antenas na transmissão visando seleção de antenas, foram observados ganhos expressivos apenas quando utilizado o algoritmo aleatório. Portanto, para os outros algoritmos, sugere-se o estudo de múltiplas antenas visando multiplexação espacial.

---

## ABSTRACT

This work proposes a simulation tool for resource allocation analysis in MIMO/OFDM communication systems. Based on the 3G LTE technology, the simulator includes some of the techniques that have been proposed for the next cellular system generations, such as user scheduling based on network parameters, adaptive modulation and coding and use of multiple transmit antennas. To illustrate the simulator's use, simulations have been done varying the resource allocation algorithm and the number of multiple antennas aiming antenna selection. The first algorithm, which targets cell throughput maximization, allocates the resources to the users that allow transmissions at the highest rate. The second algorithm, in an attempt to achieve a more fair resource distribution than the first one, takes into consideration not only users instantaneous demanded transfer rate but also its transfer rate along the simulation. Finally, the third algorithm distributes resources randomly amongst users. Simulations results have shown that, despite not achieving best results in terms of user average download rate and sector average throughput, the second algorithm presents the best trade off between network performance and resource allocation fairness, proving to be the most suitable method to be used in real cellular networks. As for the antenna selection, significant network performance gain have been noticed only when using the random algorithm. Therefore, for the other algorithms, an evaluation study of multiple antenna aiming spatial multiplexing is suggested.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	OS SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO MÓVEL CELULAR	1
1.2	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE REDES CELULARES	4
1.3	OBJETIVOS DO TRABALHO	5
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	6
<b>2</b>	<b>O 3G LTE</b>	<b>8</b>
2.1	INTRODUÇÃO	8
2.2	CAMADA FÍSICA NO ENLACE DIRETO	10
2.2.1	A ESTRUTURA DE QUADRO	10
2.2.2	CANAIS FÍSICOS	11
2.2.3	ELEMENTOS DE RECURSO	12
2.2.4	BLOCO DE RECURSOS FÍSICOS	12
2.2.5	MODULAÇÃO E CODIFICAÇÃO	12
2.3	PROCEDIMENTOS DE CAMADA FÍSICA	14
2.3.1	ESCALONAMENTO	14
2.3.2	ADAPTAÇÃO DE ENLACE - MODULAÇÃO E CODIFICAÇÃO ADAPTATIVAS	14
<b>3</b>	<b>TÉCNICAS AVANÇADAS EM SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO MÓVEL CE- LULAR</b>	<b>16</b>
3.1	INTRODUÇÃO	16
3.2	DIVERSIDADE	17
3.2.1	DIVERSIDADE MULTIUSUÁRIO	18
3.3	MÚLTIPLAS ANTENAS	19
3.4	MULTIPLEXAÇÃO POR DIVISÃO EM FREQUÊNCIAS ORTOGONAIS	21
3.5	ALOCAÇÃO DINÂMICA DE RECURSOS	24
3.5.1	ALGORITMO DE MAXIMIZAÇÃO DA TAXA DE TRANSMISSÃO	26
3.5.2	ALGORITMO PROPORTIONAL FAIR	26
3.5.3	ALGORITMO ALEATÓRIO	27
<b>4</b>	<b>CANAL DE RÁDIO MÓVEL</b>	<b>28</b>
4.1	INTRODUÇÃO	28
4.2	DESVANECIMENTO DE LARGA ESCALA	29
4.2.1	PERDAS DE PERCURSO	29
4.2.2	PROPAGAÇÃO EM ESPAÇO LIVRE	30
4.2.3	SOMBREAMENTO	31
4.3	DESVANECIMENTO DE PEQUENA ESCALA	32

4.3.1	CAUSAS DO DESVANECIMENTO DE PEQUENA ESCALA .....	32
4.3.2	PARÂMETROS DE CARACTERIZAÇÃO DE CANAL COM DESVANECIMENTO DE PEQUENA ESCALA.....	34
4.4	IMPLEMENTAÇÃO DO CANAL NO SIMULADOR .....	38
4.4.1	GERAÇÃO DE DESVANECIMENTO DE LARGA ESCALA .....	39
4.4.2	GERAÇÃO DE DESVANECIMENTO DE PEQUENA ESCALA .....	40
<b>5</b>	<b>O SIMULADOR .....</b>	<b>48</b>
5.1	SIMULAÇÃO DE REDES MÓVEIS.....	48
5.2	DESCRIÇÃO DO SIMULADOR .....	50
5.2.1	SUBSISTEMA DE FUNCIONALIDADES BÁSICAS .....	53
5.2.2	SUBSISTEMA DE GRID .....	53
5.2.3	SUBSISTEMA DE ENLACE .....	54
5.2.4	SUBSISTEMA DE MOBILIDADE .....	55
5.2.5	SUBSISTEMA DE PARÂMETROS .....	55
5.2.6	SUBSISTEMA DE CAMADA FÍSICA.....	58
5.2.7	SUBSISTEMA DE NÓ FÍSICO.....	59
5.2.8	SUBSISTEMA DE CANAL DE RÁDIO .....	61
5.2.9	SUBSISTEMA DE RESULTADOS.....	62
5.2.10	SUBSISTEMA DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS DE RÁDIO .....	64
5.2.11	SUBSISTEMA DE SIMULAÇÃO .....	72
5.2.12	SUBSISTEMA DE GERENCIADOR TEMPORAL .....	76
5.2.13	SUBSISTEMA DE TRANSMISSÃO .....	76
5.2.14	MODELO DE TRÁFEGO UTILIZADO NO SIMULADOR .....	76
<b>6</b>	<b>RESULTADOS DE SIMULAÇÃO .....</b>	<b>77</b>
6.1	INTRODUÇÃO .....	77
6.2	PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO .....	78
6.3	COMPARATIVO DE DESEMPENHO DE REDE VARIANDO-SE O ALGORITMO DE ALOCAÇÃO DE RECURSOS .....	81
6.4	COMPARATIVO DE DESEMPENHO DE REDE VARIANDO-SE O NÚMERO DE ANTENAS DE TRANSMISSÃO .....	89
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>98</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>102</b>



# LISTA DE FIGURAS

2.1	Estrutura de quadro para o LTE.....	11
2.2	<i>Grid</i> de recursos .....	13
3.1	Esquema de transmissão utilizando duas antenas.....	20
3.2	Transmissão em um sistema OFDM.....	23
3.3	Recepção em um sistema OFDM.....	23
3.4	Exemplo de canal seletivo em frequência e banda ocupada por subportadora.....	23
4.1	Ilustração de desvio Doppler .....	33
4.2	Resposta impulsiva para um canal multipercurso variante no tempo .....	35
4.3	Perfil de distribuição de potência .....	35
4.4	Perda de percurso para um <i>grid</i> de simulação de 19 células .....	40
4.5	Filtro Doppler .....	43
4.6	Diagrama de bloco para geração de canal seguindo o modelo de Clarke. ....	43
4.7	Amostras na frequência .....	44
4.8	Comparação de canal gerado com resultado teórico .....	45
4.9	Exemplo de canal seletivo em frequência para determinado instante de tempo .....	47
4.10	Exemplo de canal seletivo em frequência variante no tempo .....	47
5.1	Rodada de simulação .....	51
5.2	Campanha de simulação .....	52
5.3	Subsistemas do simulador .....	53
5.4	<i>Grid</i> de simulação .....	53
5.5	Célula com três setores.....	54
5.6	Diagrama de radiação de antena utilizada pelas estações rádio base.....	62
5.7	Curva de enlace para QPSK .....	67
5.8	Curva de enlace para 16QAM.....	68
5.9	Curva de enlace para 64QAM.....	68
5.10	Escalonamento no domínio temporal.....	71
5.11	Escalonamento no domínio da frequência.....	71
5.12	Escalonamento entre as antenas de transmissão .....	71
5.13	Campanha de simulação .....	73
5.14	Estrutura de simulação .....	75
6.1	Taxa de transmissão efetiva média por usuário.....	81
6.2	Taxa de transmissão efetiva média por setor.....	84
6.3	Porcentagem de transmissões com sucesso .....	84
6.4	Distribuição de MCS para algoritmo de maximização da taxa de transmissão.....	85

6.5	Distribuição de MCS para algoritmo <i>proportional fair</i> .....	85
6.6	Distribuição de MCS para algoritmo aleatório .....	85
6.7	Distribuição acumulada da distância dos usuários em relação à estação rádio base..	87
6.8	Taxa de transmissão efetiva média por usuário variando-se o número de antenas de transmissão e utilizando o algoritmo de maximização da taxa de transmissão ....	90
6.9	Taxa de transmissão efetiva média por usuário variando-se o número de antenas de transmissão e utilizando o algoritmo <i>proportional fair</i> .....	90
6.10	Taxa de transmissão efetiva média por usuário variando-se o número de antenas de transmissão e utilizando o algoritmo aleatório .....	91
6.11	Taxa de transmissão efetiva média por setor variando-se o número de antenas de transmissão e utilizando o algoritmo de maximização da taxa de transmissão .....	91
6.12	Taxa de transmissão efetiva média por setor variando-se o número de antenas de transmissão e utilizando o algoritmo <i>proportional fair</i> .....	92
6.13	Taxa de transmissão efetiva média por setor variando-se o número de antenas de transmissão e utilizando o algoritmo aleatório .....	92
6.14	Ganho percentual de taxa de transmissão efetiva média por usuário variando-se o número de antenas de transmissão e utilizando algoritmo de maximização da taxa de transmissão .....	93
6.15	Ganho percentual de taxa de transmissão efetiva média por usuário variando-se o número de antenas de transmissão e utilizando algoritmo <i>proportional fair</i> .....	93
6.16	Ganho percentual de taxa de transmissão efetiva média por usuário variando-se o número de antenas de transmissão e utilizando algoritmo aleatório .....	94
6.17	Comparação de desempenho entre algoritmos de alocação de recursos .....	96
6.18	Distribuição de MCS para algoritmo de maximização da taxa de transmissão utilizando quatro antenas de transmissão .....	97
6.19	Distribuição de MCS para algoritmo <i>proportional fair</i> utilizando quatro antenas de transmissão .....	97
6.20	Distribuição de MCS para algoritmo aleatório utilizando quatro antenas de transmissão .....	97

# LISTA DE TABELAS

2.1	Valores possíveis de $N_{SC}^{RB}$ e $N_{simb}^{DL}$ .....	12
2.2	Esquemas de modulação para o LTE .....	13
2.3	Esquemas de codificação para o LTE.....	13
4.1	Expoente de perdas de propagação para diversos ambientes.....	30
4.2	Perfis de distribuição de potência.....	41
6.1	Parâmetros de antena de transmissão .....	78
6.2	Parâmetros de canal.....	78
6.3	Parâmetros de <i>grid</i> .....	78
6.4	Parâmetros de adaptação de enlace .....	79
6.5	Parâmetros de camada física.....	79
6.6	Parâmetros de escalonamento .....	79
6.7	Parâmetros de simulação .....	80
6.8	Parâmetros sistêmicos .....	80
6.9	Parâmetros do terminal móvel.....	80

# LISTA DE SÍMBOLOS

## SIGLAS E ABREVIACÕES DE LÍNGUA INGLESA

3G	<i>Third Generation</i>	Terceira geração
3GPP	<i>Third Generation Partnership Project</i>	Projeto de parceira da terceira geração
AMPS	<i>Advanced Mobile Phone System</i>	Sistema avançado de telefonia móvel
ARQ	<i>Automatic Repeat Query</i>	Solicitação automática de retransmissão
AWGN	<i>All White Gaussian Noise</i>	Ruído gaussiano branco
CQI	<i>Channel Quality Indicator</i>	Indicador de qualidade de canal
DSL	<i>Digital Subscriber Line</i>	Linha digital por assinatura
E-UTRA	<i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access</i>	Acesso universal de rádio evoluído terrestre
eNode B		Estação de rádio base relativo à tecnologia 3G LTE
EDGE	<i>Enhanced Data Rates for GSM Evolution</i>	Taxas de dados elevados para a evolução do GSM
EGPRS	<i>Enhanced General Packet Radio Service</i>	Serviço elevado de rádio para transmissão de pacotes em geral
EUL	<i>Enhanced Uplink</i>	Uplink elevado
FDD	<i>Frequency division duplex</i>	Duplexação por divisão em frequência
GMSK	<i>Gaussian Minimum Shift Keying</i>	Chaveamento por deslocamento mínimo utilizando filtro gaussiano
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>	Serviço de rádio para transmissão de pacotes em geral
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>	Sistema global para comunicações móveis
HSDPA	<i>High Speed Downlink Packet Access</i>	Acesso a pacotes no downlink em alta velocidade
HSPA	<i>High Speed Packet Access</i>	Acesso a pacotes em alta velocidade
ISI	<i>Intersymbol Interference</i>	Interferência intersimbólica
LAN	<i>Local Area Network</i>	Rede de área local
LTE	<i>Long Term Evolution</i>	Evolução à longo prazo
MCS	<i>Modulation/Coding Scheme</i>	Esquema de modulação e codificação
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>	Múltiplas entradas e múltiplas saídas
MISO	<i>Multiple Input Single Output</i>	Múltiplas entradas e uma saída

MRC	<i>Maximum Ratio Combining</i>	Combinação por razão máxima
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>	Multiplexação por divisão em frequências ortogonais
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>	Múltiplo acesso por divisão em 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>	Chaveamento por deslocamento de fase em quadratura
RE	<i>Resource element</i>	Elemento de recurso
RRM	<i>Radio Resource Management</i>	Gerenciamento de recursos de rádio
SIMO	<i>Single Input Multiple Output</i>	Uma entrada e múltiplas saídas
SINR	<i>Signal to Interference plus Noise Ratio</i>	Razão entre potência do sinal recebido e soma das potências de ruído e interferência
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>	Razão entre potência do sinal recebido e potência de ruído
TDD	<i>Time division duplex</i>	Duplexação por divisão no tempo
TTI	<i>Transmission Time Interval</i>	Intervalo de tempo de transmissão
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>	Sistema universal de telecomunicações móveis
UTRA	<i>Universal Terrestrial Radio Access</i>	Acesso de rádio terrestre universal
UTRAN	<i>Universal Terrestrial Radio Access Network</i>	Rede de acesso de rádio terrestre universal
V-BLAST	<i>Vertical - Bell Laboratories - Layered Space-time</i>	Algoritmo de detecção no tempo e espaço proposto por <i>Bell Laboratories</i>
WCDMA	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>	Múltiplo acesso por divisão no código utilizando portadora de banda larga

## SIGLAS E ABREVIações DE LÍNGUA PORTUGUESA

ERB Estação Rádio Base

## SÍMBOLOS

$N_{RB}^{DL}$  Número de blocos de recursos físicos disponíveis no *downlink* em cada *timeslot*

$N_{SC}^{RB}$  Número de subportadoras por bloco de recurso físico

$N_{simb}^{DL}$  Número de símbolos OFDM por subportadora em cada *timeslot*

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 OS SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO MÓVEL CELULAR

Nas últimas décadas, a complexidade dos sistemas de comunicações móveis aumentou de maneira expressiva [1]. Este aumento foi resultado da constante evolução dos sistemas visando suprir a crescente demanda por novos serviços, maiores taxas de transmissão, aumento da capacidade da rede, entre outros.

Pode-se dizer que os sistemas de comunicação móvel celular, cujos recursos físicos de rede são divididos em células, teve início na década de 80. Na América, o sistema precursor foi o AMPS (*Advanced Mobile Phone System* - Sistema avançado de telefonia móvel) e representou a chamada primeira geração de telefonia celular.

O maior benefício trazido pela evolução dos sistemas de comunicações do tipo *broadcast* para os sistemas do tipo celular foi a melhor utilização da banda disponibilizada para o sistema. No entanto, os serviços oferecidos pela rede resumiam-se basicamente à comunicação analógica de voz e envio de pequenos recados, também chamados de *paging*. Utilizando-se um *modem*, era capaz de alcançar taxas de transferência individual de até 2,4 kb/s.

No início da década de 90, a transição de transmissão analógica para transmissão digital de sinais deu início à chamada segunda geração de telefonia celular. No Brasil, os sistemas de telefonia celular de segunda geração mais conhecidos foram o IS-136, GSM (*Global System for Mobile Communications* - Sistema global para comunicações móveis) e IS-95 (popularmente conhecido como CDMA, devido à técnica de múltiplo acesso). Na segunda geração de telefonia celular, serviços como caixa de correio de voz e envios de pequenas mensagens de correspondência eletrônica (*e-mail*) já eram disponíveis. Era possível obter taxas de transferência de até 10 kb/s por usuário.

Entre a segunda e terceira geração, houve expressivas evoluções nos sistemas de telefonia celular que as levaram a ser classificadas em gerações intermediárias, como o 2,5G (segunda

geração e meia). Entre as evoluções, destaca-se o início da comutação por pacotes. Seguindo a linha evolutiva do GSM, esta evolução foi obtida por meio do GPRS (*General Packet Radio Service* - Serviço de rádio para transmissão de pacotes em geral), que possibilitava o tráfego de dados IP utilizando a estrutura de rede GSM, permitindo obter taxas de transferência individuais de até 144 kb/s.

Entre os novos serviços disponibilizados pelo 2,5G, estavam o envio de longas mensagens de correio eletrônico, visualização de páginas *web* e navegação na *Internet*. Adicionalmente, com os novos esquemas de modulação e codificação e melhorias nos receptores dos terminais móveis introduzidas pelo EGPRS (*Enhanced General Packet Radio Service* - Serviço elevado de rádio para transmissão de pacotes em geral), era possível obter taxas de transferências por usuário de até 384 kb/s.

Por volta do ano 2000, deu-se início ao sistema de telefonia celular de terceira geração, que perdura até o momento do desenvolvimento deste trabalho. Entre os novos serviços oferecidos pelo sistema 3G, destacam-se navegação em páginas *web* em alta velocidade, videoconferência e transmissão de vídeo e canais de televisão. Com os novos sistemas, é possível obter taxa de transferência de até 2 Mb/s por usuário.

O sistema de telefonia celular de terceira geração mais conhecido no Brasil é o UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System* - Sistema universal de telecomunicações móveis), que segue a linha evolutiva do GSM. Diferentemente do GSM, que permite múltiplo acesso por divisão no tempo, o UMTS utiliza técnica de múltiplo acesso por divisão em códigos utilizando portadoras de banda larga, também chamada de WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access* - Múltiplo acesso por divisão no código utilizando portadora de banda larga). Apesar de requerer novos terminais para ter acesso aos serviços da terceira geração, o sistema UMTS conserva o núcleo da estrutura de rede do GSM, proporcionando às operadoras de telefonia celular uma transição menos abrupta para a terceira geração.

Antecipando tendências da quarta geração de telefonia celular, propostas de evolução para o 3G já são discutidas há alguns anos. Uma das mais conhecidas é o 3G LTE (*Third Generation Long Term Evolution* - Evolução à longo prazo para a terceira geração de sistemas móvel celu-

lar), proposta de evolução para o UMTS. No LTE, utiliza-se como técnica de múltiplo acesso a divisão em frequências ortogonais, chamado de OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access* - Múltiplo acesso por divisão em frequência ortogonal). Adicionalmente, é prevista a utilização de múltiplas antenas na transmissão e recepção. Com estas evoluções, deseja-se obter taxas de transferência de até 100 Mb/s e redução significativa de latência de rede.

O breve histórico acima ratifica a afirmativa do início do texto. Observa-se que, em um período de aproximadamente 20 anos (início do AMPS em 1983 e início do UMTS em meados de 2000), as taxas de transferência demandadas pela introdução de novos serviços cresceu da ordem de poucos quilobits por segundo à ordem de dezenas de megabits por segundo. Adicionalmente, verifica-se o aumento no número de usuários do sistema de telefonia celular. De acordo com a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) [2], o número de assinantes do serviço móvel pessoal no Brasil passou de aproximadamente 1.000 em 1990 para mais de 120.000.000 em 2008.

A evolução dos sistemas de comunicações móveis ao longo dos anos abrange diversos aspectos da rede celular. No que concerne à tecnologia de acesso à rede, observou-se migração do FDMA para TDMA, quando da transição do AMPS para IS-136; do TDMA e FDMA para WCDMA, quando da transição do GSM para UMTS; e possivelmente do WCDMA para OFDMA, quando da provável transição do UMTS para o 3G LTE.

No que concerne a esquemas de modulação, observa-se uma tendência à utilização de modulações que portam uma quantidade maior de *bits* por símbolo. Entretanto, isso só é possível com melhorias nos receptores dos terminais móveis e em técnicas de combate à efeitos de ruído e interferência. Essas técnicas incluem novos tipos de codificação e exploração de diversidade espacial.

Para exemplificar, no AMPS utilizava-se a modulação analógica em frequência. No GSM, utiliza-se modulação GMSK (*Gaussian Minimum Shift Keying* - Chaveamento por deslocamento mínimo utilizando filtro gaussiano) para transmissão de sinal de voz, em que cada símbolo porta apenas um *bit*. No UMTS, utiliza-se modulação QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying* - Chaveamento por deslocamento de fase em quadratura), em que cada símbolo porta dois *bits*. Por fim, propõe-se para o LTE a utilização das modulações QPSK, 16QAM (*Quadrature Amplitude*



*Modulation* - Modulação por amplitude em quadratura) e 64QAM. Estas modulações portam 2 bits, 4 bits e 6 bits por símbolo, respectivamente.

## 1.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE REDES CELULARES

A utilização de simulações computacionais para o estudo de viabilidade de novas propostas para os sistemas de comunicação celular tem sido cada vez mais freqüente e imprescindível. Entretanto, simulações computacionais de redes celulares somente têm sido viáveis graças aos contantes avanços no poder de processamento e memória dos computadores. Com estes avanços, torna-se possível a modelagem e simulação dos diversos aspectos que envolvem uma rede celular, entre eles:

- Mobilidade de usuários;
- Tráfego de voz;
- Tráfego de dados;
- Ambiente de propagação;
- Procedimentos de camada física;
- Protocolos de camadas superiores.

É certo que muitas propostas para as tecnologias de rede celular em operação hoje no mundo foram padronizadas e implantadas em redes reais apenas após a comprovação de seus benefícios técnicos por meio de simulações computacionais. Diante dessa perspectiva, diversos fabricantes de equipamentos de rede celular, universidades e centros de pesquisa têm investido recursos financeiros e humanos no desenvolvimento de simuladores de rede celular.

Na Universidade de Brasília, o desenvolvimento de simuladores de sistemas de comunicação móvel celular tem se dado por meio do Laboratório Estruturas de Microondas e Ondas Milimétricas (LEMOM), pertencente ao Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade Tecnologia.

Diversos estudos e trabalhos têm sido feitos visando o desenvolvimento de simuladores para tecnologias que ainda não entraram em operação no Brasil, como o 3G LTE ou o WiMAX móvel.

Até o presente momento, em parceria com o Instituto Nokia de Tecnologia (INdT) [3], foi desenvolvido um simulador de enlace para a tecnologia 3G LTE, como parte de um projeto denominado WiSiL (*Wireless Simulation Laboratory* - Laboratório de simulação de redes sem-fio). Mais recentemente, deram-se início aos estudos de desenvolvimento de um simulador de enlace para a tecnologia WiMAX.

Este trabalho surge como um primeiro passo para o desenvolvimento de um simulador sistêmico 3G LTE.

### **1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO**

Os sistemas de comunicação modernos e aqueles ainda em estudo caracterizam-se pela grande quantidade de recursos de rede disponíveis para a transmissão de dados aos usuários. Sobretudo devido a técnicas de utilização de múltiplas antenas e divisão do espectro em subportadoras de largura de banda estreita, a alocação dinâmica dos recursos aos usuários é um desafio para os fabricantes de equipamentos de rede celular e para as operadoras de telefonia móvel.

Diversos estudos têm sido feitos visando explorar diversas formas de alocação de recursos aos usuários em sistemas com múltiplas antenas (MIMO) e com subportadoras de banda estreita (OFDMA) [4, 5, 6]. Em quase a totalidade deles, simulações sistêmicas são utilizadas para avaliação do desempenho de rede. Nestas simulações sistêmicas, observa-se o comportamento de uma rede celular em que diversos usuários demandam tráfego da rede, que se incumbe da tarefa de distribuir os recursos aos usuários de acordo com métodos de multiplexação de usuários e alocação de recursos.

Este trabalho tem como objetivo propor e desenvolver uma ferramenta de simulação sistêmica para avaliar a alocação dinâmica de recursos em sistemas celulares, sobretudo aqueles que utilizam múltiplas antenas e multiplexação por divisão em frequências ortogonais.

Deseja-se também que esta ferramenta de simulação sistêmica seja um auxílio para que no-

vas propostas para rede celulares, incluindo novos métodos de alocação de recursos, possam ser facilmente implementados e testados.

Espera-se, ao fim deste trabalho, obter uma ferramenta de simulação sistêmica sólida para a tecnologia 3G LTE, capaz de fornecer resultados expressivos que contribuam para o avanço nas pesquisas em sistemas de comunicação móvel celular.

## **1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

Este trabalho é dividido em sete capítulos.

No Capítulo 1, são apresentados um breve histórico dos sistemas de comunicação móvel celular e a importância de simulações computacionais para o estudo de redes móveis. Também são descritos os objetivos do trabalho.

No Capítulo 2, é apresentada uma descrição da tecnologia 3G LTE, adotada para o simulador desenvolvido neste trabalho. São descritos a estrutura de quadro, aspectos da camada física e procedimentos de camada física.

No Capítulo 3, são apresentadas algumas das técnicas utilizadas nos atuais sistemas de comunicação móvel e nos sistemas ainda em estudo, como o 3G LTE e WiMAX móvel. São apresentadas as técnicas de transmissão utilizando múltiplas antenas, multiplexação por divisão em frequências ortogonais e alocação dinâmica de recursos.

No Capítulo 4, é apresentada uma descrição sobre modelagem de canais de rádio móvel, incluindo parâmetros de caracterização de canal e modelos de desvanecimento de larga e pequena escala. Também são descritos os algoritmos utilizados para a geração de canal seletivo em frequência e variante no tempo no simulador.

No Capítulo 5, é apresentada uma descrição do simulador desenvolvido neste trabalho. São descritos todos os subsistemas, bem como a estrutura de funcionamento do programa.

No Capítulo 6, são apresentados os resultados de simulação, divididos em comparativos. O primeiro comparativo analisa o desempenho de rede variando-se o algoritmo de alocação de re-

curso. O segundo comparativo analisa o desempenho de rede variando-se o número de antenas de transmissão.

Por fim, no Capítulo 7, são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 O 3G LTE

*Este capítulo apresenta uma descrição sobre a tecnologia 3G LTE, adotada para o simulador apresentado neste trabalho. São descritos aqui a estrutura de quadro, aspectos da camada física e procedimentos de camada física.*

### 2.1 INTRODUÇÃO

O 3G LTE é uma proposta de evolução para o sistema de telefonia celular de terceira geração chamado UMTS. Elaborado e discutido por uma parceria denominada 3GPP (*Third Generation Partnership Project* - Projeto de parceira da terceira geração), o 3G LTE surge como uma tentativa de manter a competitividade da linha evolutiva que advém do sistema GSM.

O 3GPP é um acordo de colaboração estabelecido em 1998 com o objetivo de elaborar especificações e relatórios técnicos para a terceira geração de sistemas móveis baseados na rede GSM e nas tecnologias de acesso de rádio suportados pelo GSM, como o UTRA (*Universal Terrestrial Radio Access* - Acesso de rádio terrestre universal), nos modos FDD (*Frequency Division Duplex* - Duplexação por divisão na frequência) e TDD (*Time Division Duplex* - Duplexação por divisão no tempo) [7].

Já em 2005, de acordo com *World Cellular Information Service*, o número de assinantes da tecnologia de acesso de rádio WCDMA se aproximava dos 50 milhões no mundo e já se pensava em evoluções para tal tecnologia [8]. Os primeiros passos para essa evolução foram o desenvolvimento do HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access* - Acesso a pacotes em alta velocidade no enlace direto) e EUL (*Enhanced Uplink* - Uplink elevado) para o WCDMA, constituindo o HSPA (*High Speed Packet Access* - Acesso a pacotes em alta velocidade).

Entretanto, para contemplar a crescente demanda de novos assinantes dos serviços de telefonia móvel e oferecer um sistema competitivo frente às novas tecnologias de acesso de rádio (vide WiMAX [9]), o 3GPP deu início aos estudos de uma evolução à longo prazo.

Os estudos para a evolução do 3G iniciaram-se em 2004. Operadoras, fabricantes e institutos

de pesquisa apresentaram mais de 40 contribuições e propostas visando a evolução do UTRAN (*Universal Terrestrial Radio Access Network* - Rede de acesso de rádio terrestre universal)[7].

Os estudos visavam atender os seguintes requisitos:

- Diminuir custo por *bit*;
- Aumentar oferta de serviços por preço mais baixo;
- Flexibilizar uso da banda existente e aquisição novas bandas de frequência;
- Arquitetura simplificada;
- Baixo consumo de potência por partes dos terminais móveis.

Além das linhas gerais definidas acima, também foram especificados alguns requisitos técnicos, entre eles [8]:

- Alcançar taxas de transmissão com picos maiores que 100 Mb/s no enlace direto (*downlink*) e 50 Mb/s no enlace reverso (*uplink*);
- Aumentar taxa de transmissão média por usuário em duas vezes no enlace direto e três vezes no enlace reverso;
- Aumentar em duas vezes a taxa de transmissão média por usuário localizado em borda de célula;
- Aumentar a eficiência espectral em duas vezes no enlace direto e três vezes no enlace reverso;
- Reduzir significativamente a latência de rede.

Para atingir os objetivos acima, foram propostas novas tecnologias de transmissão e alterações na camada física da rede celular. Entre elas, novos esquemas de modulação e codificação, redução no TTI (*Time Transmission Interval* - Intervalo de tempo de transmissão) e novas técnicas de acesso ao sistema. A adoção do OFDMA como técnica de múltiplo acesso, juntamente com

esquemas de transmissão e recepção com múltiplas antenas, tiveram como objetivo o aumento da eficiência espectral da rede [10].

A seguir encontra-se uma descrição dos aspectos de camada física do LTE. É importante destacar que nem todos os aspectos da tecnologia estão descritos neste trabalho, mas apenas aqueles relevantes para o desenvolvimento do simulador. A descrição da camada física e dos procedimentos de camada física dizem respeito apenas ao enlace direto. Em [7] podem ser encontradas especificações técnicas completas a respeito do LTE.

## 2.2 CAMADA FÍSICA NO ENLACE DIRETO

A técnica de múltiplo acesso utilizada no 3G LTE é o OFDMA. Esta técnica permite o aumento da eficiência espectral dividindo a banda total do sistema em sub-bandas estreitas que serão distribuídas entre os usuários. Para alcançar altas taxas de transmissão, o TTI no LTE é definido de forma a permitir uma baixa latência de interface de rádio. Deste modo, definiu-se o TTI como a duração de um subquadro LTE, que é de 1 ms.

### 2.2.1 A ESTRUTURA DE QUADRO

São definidos dois tipos de estrutura de quadro para o LTE, um aplicável para FDD e outro para TDD. Como o simulador desenvolvido neste trabalho opera em FDD, a estrutura de quadro descrita nesta seção é do tipo 1.

A estrutura de quadro tem a forma apresentada na Figura 2.1, adaptada de [11]. Na figura,  $T_s$  é uma unidade básica de tempo definido para o LTE e vale  $1/(15.000 \times 1.024)$  s. Um quadro de rádio tem duração de 10 ms e é composto por 20 *timeslots*, numerados de 0 a 19. Dois *timeslots* compõem um subquadro, que tem 1 ms de duração. Transmissões em enlace direto e em enlace reverso são feitas em frequências diferentes.

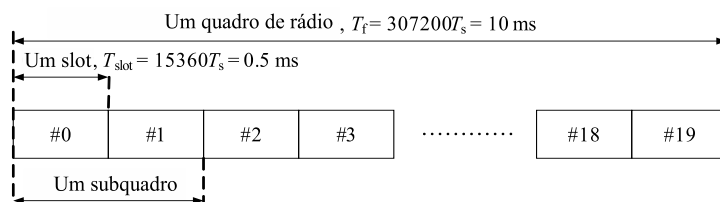


Figura 2.1: Estrutura de quadro para o LTE

## 2.2.2 CANAIS FÍSICOS

A menor unidade tempo-freqüência possível de ser transmitida denomina-se elemento de recurso ou RE (*resource element*). A estrutura física no enlace direto corresponde a um conjunto de RE carregando informações geradas em camadas superiores e transmitidos nos seguintes canais físicos:

- Canal físico de enlace direto compartilhado (PDSCH - *Physical Downlink Shared Channel*);
- Canal físico de *broadcast* (PBCH - *Physical Broadcast Channel*);
- Canal físico de transmissão do tipo *multicast* (PMCH - *Physical Multicast Channel*);
- Canal físico de controle de indicação de formato (PCFICH - *Physical Control Format Indicator Channel*);
- Canal físico de controle de enlace direto (PDCCH - *Physical Downlink Control Channel*);
- Canal físico de indicação de ARQ (*Automatic Repeat Query* - Solicitação automática de retransmissão) híbrido (PHICH - *Physical Hybrid ARQ Indicator Channel*).

O sinal transmitido em cada instante de tempo (ou *timeslot*) é um conjunto de  $N_{RB}^{DL} N_{SC}^{RB}$  subportadoras e  $N_{simb}^{DL}$  símbolos OFDM por subportadora, onde  $N_{RB}^{DL}$  é o número de PRB (*Physical Resource Block* - Bloco de recursos físicos) a ser transmitido no enlace direto,  $N_{SC}^{RB}$  é o número de subportadoras por PRB e  $N_{simb}^{DL}$  é o número de símbolos OFDM por subportadora. O número de PRB a ser transmitido,  $N_{RB}^{DL}$ , depende da largura de banda do sistema alocada para o enlace direto e deve estar entre 6 e 110 [11]. Em caso de utilização de múltiplas antenas, é definido um conjunto de  $N_{RB}^{DL}$  e  $N_{SC}^{RB}$  símbolos OFDM para cada antena.



### 2.2.3 ELEMENTOS DE RECURSO

Cada elemento no *grid* de recursos é denominado elemento de recurso e é identificado exclusivamente por um par de índices  $(k, l)$  em um *slot* onde  $k = 0, \dots, N_{RB}^{DL} N_{SC}^{RB} - 1$ , e  $l = 0, \dots, N_{simb}^{RB} - 1$  são os índices no domínio da frequência e tempo, respectivamente. O *grid* de recursos utilizado no enlace direto é ilustrado na Figura 2.2, adaptada de [11].

### 2.2.4 BLOCO DE RECURSOS FÍSICOS

Um bloco de recurso físico ou PRB é definido como um conjunto de  $N_{simb}^{DL}$  símbolos OFDM consecutivos no domínio do tempo e  $N_{SC}^{RB}$  subportadoras consecutivas no domínio da frequência. Logo, cada PRB é composto por diversos elementos de recurso, correspondendo a um *slot* no domínio do tempo e 180 kHz de banda no domínio da frequência, considerando que a largura de banda de cada subportadora é de 15 kHz e o número de subportadoras por bloco de recurso é 12. Os possíveis valores de  $N_{simb}^{DL}$  e  $N_{SC}^{RB}$  são mostrados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Valores possíveis de  $N_{SC}^{RB}$  e  $N_{simb}^{DL}$

Configuração	$N_{SC}^{RB}$	$N_{simb}^{DL}$
Prefixo cíclico normal	12	7
Prefixo cíclico estendido	12	6

### 2.2.5 MODULAÇÃO E CODIFICAÇÃO

Os possíveis esquemas de modulação propostas para o LTE são mostrados na Tabela 2.2. As codificações utilizadas para os canais físicos são codificação convolucional e codificação turbo [12]. As taxas utilizadas são mostradas na Tabela 2.3.

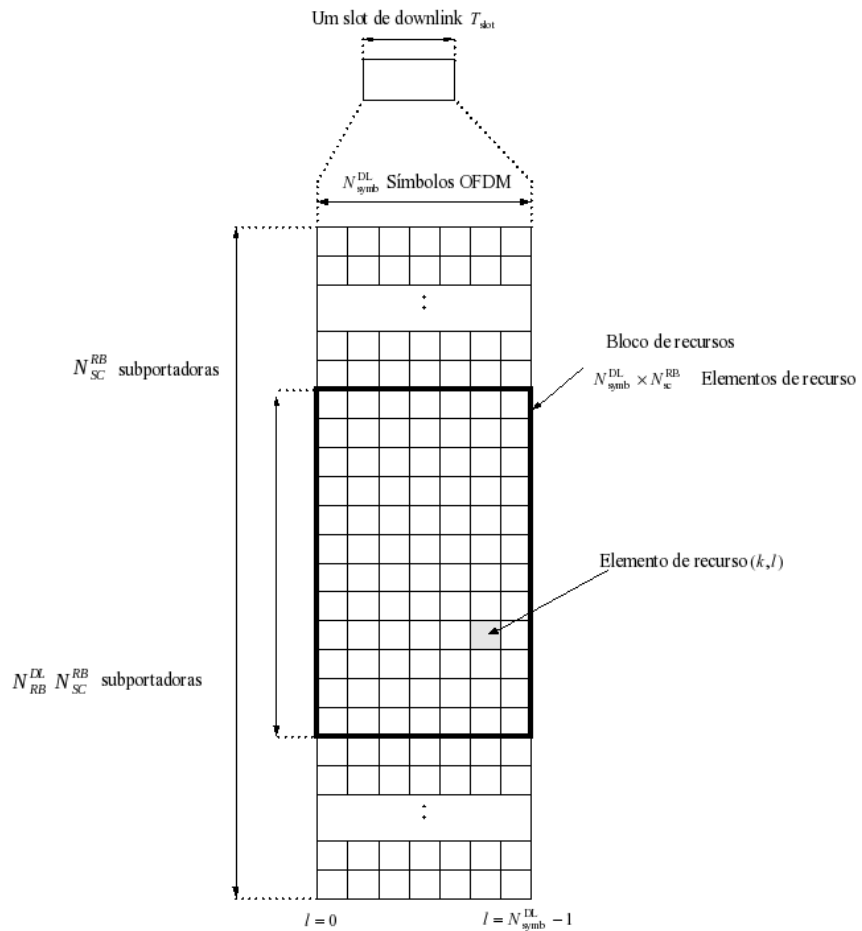


Figura 2.2: *Grid* de recursos

Tabela 2.2: Esquemas de modulação para o LTE

Canal físico	Esquema de modulação
PDSCH	QPSK, 16QAM, 64QAM
PMCH	QPSK, 16QAM, 64QAM

Tabela 2.3: Esquemas de codificação para o LTE

Canal físico	Esquema de codificação	Taxa de código
PDSCH	Turbo	1/3
PMCH	Turbo	1/3
PBCH	Convolucional	1/3

## **2.3 PROCEDIMENTOS DE CAMADA FÍSICA**

### **2.3.1 ESCALONAMENTO**

O escalonador presente na estação rádio base aloca dinamicamente os recursos tempo-frequência-espaço aos usuários na rede. A sinalização de controle informa aos terminais móveis que recursos e formatos de transmissão foram alocados.

É de responsabilidade do escalonador a escolha da estratégia de multiplexação a ser utilizada. A flexibilidade na escolha dos recursos e na multiplexação de usuários irá influenciar o desempenho do escalonador. O processo de escalonamento é estritamente ligado à adaptação de enlace e pode ser feito baseado nas seguintes informações [13]:

- Medições de QoS;
- Transmissões pendentes na estação rádio base;
- Informações de qualidade de enlace reportados pelos terminais móveis;
- Recursos do terminal móvel;
- Períodos de inativação do terminal móvel e intervalos entre medições;
- Parâmetros sistêmicos como largura de banda ou nível de interferência.

### **2.3.2 ADAPTAÇÃO DE ENLACE - MODULAÇÃO E CODIFICAÇÃO ADAPTATIVAS**

A adaptação de enlace ou AMC (*Adaptive Modulation and Coding* - Modulação e codificação adaptativas) é aplicada para o canal de dados compartilhado. Isto significa que, para instantes de tempo diferentes, pode-se transmitir para o mesmo usuário informações utilizando esquemas de modulação e codificação diferentes. A escolha do esquema pode ser feita com base nas informações de qualidade de canal informados pelo terminal móvel à estação rádio base.

O mesmo esquema de modulação e codificação deve ser utilizado para todos os PRB que contêm informações oriundas de um mesmo bloco de dados de camada superior para cada tempo

de intervalo de transmissão e para cada fluxo de dados (em caso de múltiplas antenas, diferentes MCS podem ser escolhidos) [13].

# 3 TÉCNICAS AVANÇADAS EM SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO MÓVEL CELULAR

*Este capítulo apresenta uma descrição sobre algumas das técnicas utilizadas nos atuais sistemas de comunicação móvel e nos sistemas ainda em estudo, como o 3G LTE e WiMAX móvel. São apresentadas aqui técnicas de transmissão utilizando múltiplas antenas, multiplexação por divisão em frequências ortogonais e alocação dinâmica de recursos.*

## 3.1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de comunicação móvel celular utilizam diversas técnicas para aumentar o desempenho do enlace físico e da rede como um todo. O aumento de desempenho pode dizer respeito tanto ao aumento na confiabilidade na transmissão ou um aumento efetivo na quantidade de informação transmitida em um mesmo recurso físico (espaço, frequência e tempo). Entretanto, o aumento na confiabilidade da transmissão também pode acarretar em aumento efetivo de taxa de transmissão.

Entre as técnicas que vêm sendo intensamente pesquisadas e propostas para as novas gerações de sistemas celulares, destacam-se:

- Utilização de múltiplas antenas na transmissão e recepção.
- Multiplexação por divisão em frequências ortogonais ou OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*).
- Alocação dinâmica de recursos.

Para a explicação das técnicas listadas anteriormente, é apresentado a seguir o conceito de diversidade.

## 3.2 DIVERSIDADE

Diversas técnicas utilizadas em sistemas de comunicação móvel visam explorar a diversidade. Tradicionalmente, esquemas de diversidade têm como objetivo aumentar a confiabilidade na transmissão, por meio do envio de símbolos de informação de forma repetida por percursos que experimentem desvanecimentos independentes.

A diversidade pode ser explorada de várias maneiras. As principais são [14]:

- Diversidade no domínio temporal

A diversidade no domínio temporal pode ser obtida por meio de codificação e emalhamento (*interleaving*). Nestas técnicas, o sinal é codificado e espalhado por diferentes períodos de coerência, de modo que diferentes partes da palavra de código transmitida sofram desvanecimentos independentes.

- Diversidade no domínio da frequência

A diversidade no domínio da frequência pode ser obtida aproveitando-se a seletividade em frequência para transmitir informações em frequências que experimentem desvanecimentos independentes.

- Diversidade no domínio espacial

A diversidade no domínio espacial pode ser obtida utilizando múltiplas antenas na transmissão ou recepção, desde que espaçadas suficientemente entre si, de modo a proporcionar independência entre os canais.

A distância requerida entre antenas para garantir independência entre os canais depende de vários fatores, como o ambiente de propagação e a frequência da portadora. Para um ambiente com o terminal móvel próximo ao chão, à medida que se aumenta a quantidade de objetos dispersores, a decorrelação entre canais é obtida à distâncias físicas menores, de forma que, em geral, distâncias de meio comprimento de onda a um comprimento de onda são suficientes [14].

### 3.2.1 DIVERSIDADE MULTIUSUÁRIO

Em sistemas de comunicação móvel com múltiplos usuários, pode-se obter ganhos de capacidade por meio da exploração da diversidade multiusuário. Diferentemente das técnicas tradicionais de diversidade, que visam combater os efeitos de desvanecimento de canal, a diversidade multiusuário ocorre graças à presença de percursos com desvanecimentos independentes apresentados pelos múltiplos usuários na rede. Em comparação a um sistema de transmissão com um único usuário, a diversidade multiusuário advém do aumento do ganho efetivo do canal de  $|h_1[m]|^2$  para  $\max_{1 < k < N} |h_k[m]|^2$ , onde  $N$  é o número de usuários na rede.

A diversidade multiusuário proporciona um aumento no desempenho da rede explorando os diferentes desvanecimentos apresentados pelos diferentes percursos na rede. Logo, flutuações no canal devido a fenômenos de desvanecimento permitem dizer que há uma grande probabilidade de que exista um usuário com um canal com intensidade maior que o valor médio apresentado na rede. Alocando adequadamente os recursos a este usuário, aproveitam-se as condições vantajosas do seu canal.

Em uma situação em que estatísticas de desvanecimento são iguais para todos os usuários, alocar recursos aos usuários com melhores condições de enlace maximizaria não só a taxa de transmissão total por célula mas também as taxas de transmissão individuais. Entretanto, o que se observa na prática é que as estatísticas de desvanecimento não são iguais. Por exemplo, usuários localizados mais próximos à estação rádio base terão grande probabilidade de apresentar um valor médio de SINR (*Signal to Interference plus Noise Ratio* - Razão entre potência do sinal recebido e soma das potências de ruído e interferência) maior que os usuários localizados nas bordas da célula. Além disso, existem usuários parados e usuários em movimento, usuários em ambientes altamente dispersores e em ambientes com pouca dispersão, fatores esses que influenciam nas estatísticas de desvanecimento.

### 3.3 MÚLTIPLAS ANTENAS

Um sistema que utiliza diversas antenas na transmissão e/ou na recepção pode ser classificado em:

- SIMO: apresenta apenas uma antena na transmissão e mais de uma antena na recepção;
- MISO: apresenta mais de uma antena na transmissão e uma antena na recepção;
- MIMO: apresenta mais de uma antena na transmissão e na recepção.

Existem diversas maneiras de explorar os esquemas de múltiplas antenas de forma a proporcionar ganhos no desempenho de um enlace. Três abordagens muito comuns são:

- Seleção de antenas;
- Múltiplas antenas visando ganhos de diversidade espacial;
- Múltiplas antenas visando ganhos de multiplexação espacial.

A seleção de antenas é a técnica de múltiplas antenas mais simples entre as listadas anteriormente e é aquela utilizada no simulador desenvolvido neste trabalho. Assim como a segunda abordagem, a técnica de seleção de antenas também explora a diversidade espacial, mas não pela transmissão repetida de informações.

Na seleção de antenas, escolhe-se, dentre as antenas disponíveis, apenas uma que será utilizada para a transmissão de determinado recurso. A escolha da antena pode ser feita com base em diversos critérios, como por exemplo maximização de taxa de transmissão. Desta forma, a seleção de antenas explora a diversidade espacial apenas para a escolha da antena que melhor atenda ao critério estabelecido.

Uma técnica muito conhecida de diversidade espacial que utiliza transmissão repetida de símbolos é o esquema de Alamouti [14]. Este esquema propõe ganho de diversidade na transmissão, sendo útil no enlace direto de um sistema celular. A Figura 3.1 ilustra o caso de duas antenas na transmissão.



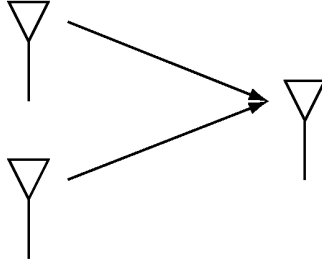


Figura 3.1: Esquema de transmissão utilizando duas antenas

Em um esquema de transmissão MISO, para um canal com desvanecimento plano, o sinal recebido tem a forma:

$$y[m] = h_1[m]x_1[m] + h_2[m]x_2[m] + w[m], \quad (3.1)$$

em que  $h_i[m]$  é o ganho do canal para a antena  $i$  e  $w[m]$  é o ruído.

No esquema Alamouti, utiliza-se duas antenas para transmitir dois símbolos complexos,  $u_1$  e  $u_2$ , em dois instantes de tempo de símbolo. No primeiro instante, transmite-se  $u_1$  na antena 1 e  $u_2$  na antena 2 e no segundo instante, transmite-se  $-u_2^*$  na antena 1 e  $u_1^*$  na antena 2, onde o operador  $*$  significa complexo conjugado. Se for assumido que o canal permanece constante durante os dois instantes de símbolo, pode-se escrever o sinal recebido da forma:

$$\begin{bmatrix} y[1] & y[2] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 & -u_2^* \\ u_2 & u_1^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w[1] & w[2] \end{bmatrix}, \quad (3.2)$$

em que  $h_1 = h_1[1] = h_1[2]$  e  $h_2 = h_2[1] = h_2[2]$ . Como se deseja detectar os sinais  $u_1$  e  $u_2$ , pode-se reescrever o sinal recebido da forma:

$$\begin{bmatrix} y[1] \\ y[2]^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^* & -h_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w[1] \\ w[2]^* \end{bmatrix}. \quad (3.3)$$

Observa-se que as colunas da matriz quadrada são ortogonais. Portanto, o problema da detecção dos símbolos  $u_1$  e  $u_2$  pode ser decomposto em dois problemas separados, ortogonais e escalares.

Para cada sinal recebido, tem-se:

$$r_i = \|\mathbf{h}\|u_i + w_i, \quad i = 1, 2 \quad (3.4)$$

em que  $h = [h_1 \quad h_2]$  e  $w_i$  é o ruído, sendo  $w_1$  e  $w_2$  independentes. Verifica-se que o ganho de diversidade é igual a 2 para a detecção de cada símbolo.

Utilizando um receptor MRC (*Maximum Ratio Combining* - Combinação por razão máxima), pode-se estender o esquema de Alamouti para múltiplas antenas também na recepção. Em um caso  $2 \times 2$ , pode-se obter um canal com ganho efetivo de  $\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 |h_{ij}|^2$  [14].

Na abordagem de múltiplas antenas visando ganhos de multiplexação espacial, utiliza-se as antenas para transmitir informações diferentes. Uma técnica conhecida de multiplexação espacial é o V-BLAST (*Vertical - Bell Laboratories - Layered Space-time* - Algoritmo de detecção no tempo e espaço proposto por *Bell Laboratories*) [14], onde fluxos independentes de dados são multiplexados no espaço por meio da transmissão de símbolos independentes em antenas diferentes e em instantes de símbolos diferentes. Neste esquema, pode-se mostrar que a probabilidade de se confundir um símbolo recebido  $x_1$  com o outro símbolo recebido  $x_2$ , quando utilizadas duas antenas na transmissão e recepção, segue a forma:

$$\begin{aligned} P(x_1 \rightarrow x_2) &\leq \left[ \frac{1}{1 + SNR \|x_1 - x_2\|^2/4} \right]^2 \\ &\leq \frac{16}{SNR^2 \|x_1 - x_2\|^4}, \end{aligned} \quad (3.5)$$

em que  $SNR$  é a relação sinal ruído e seu expoente é o ganho de diversidade [14].

### 3.4 MULTIPLEXAÇÃO POR DIVISÃO EM FREQUÊNCIAS ORTOGONAIS

A multiplexação por divisão em frequências ortogonais é uma técnica de modulação multiportadora que tem sido extensivamente adotada em sistemas de comunicação de banda larga e

com demanda de altas taxas de transmissão, LAN (*Local Area Network* - Rede de área local), transmissão digital de vídeo em *broadcast*, WiMAX e 3G LTE [15].

A recente popularidade do OFDM, entre outros motivos, deve-se a sua maneira eficiente e flexível de combater interferência intersimbólica em canais altamente dispersivos [15].

A idéia básica da modulação multiportadora é simples e é fruto imediato da demanda de altas taxas de transmissão e canais sem ISI (*Intersymbol Interference* - Interferência intersimbólica). Para que a segunda condição ocorra, é necessário que o tempo do símbolo seja significativamente maior que a dispersão por atraso do canal, explicada no Capítulo 4. Sistemas de comunicações digitais sofrem severamente na presença de ISI e com a crescente demanda por taxas de transmissão, a duração de tempo de símbolo torna-se cada vez menor, agravando ainda mais o problema.

Para resolver isto, a técnica de multiplexação OFDM divide o fluxo de dados de alta taxa em diversos subfluxos paralelos com taxas a uma fração de  $1/L$  da taxa original, onde  $L$  é o número de subfluxos. Dessa forma, para cada subfluxo, a duração do tempo de símbolo pode ser aumentada por um fator de  $L$ , reduzindo a ISI. Com o acréscimo de intervalo de guarda ao símbolo transmitido, é possível eliminar os efeitos da ISI [15].

As Figuras 3.2 e 3.3 ilustram de maneira simples o transmissor e receptor de um sistema OFDM. Na Figura 3.2, observa-se que o fluxo original, a uma taxa de  $R$  b/s, é dividido em  $L$  subfluxos paralelos com taxas de  $\frac{R}{L}$  b/s e ocupando uma banda passante de  $\frac{B}{L}$  Hz, onde  $B$  é a largura de banda do sinal original. O bloco S/P é um conversor série para paralelo. Verifica-se que cada subfluxo modula uma senóide  $\cos(2\pi f_c + i\Delta f)$ ,  $i = 1 \dots L$ , ortogonal às demais. Após passar pelo canal  $H(f)$ , o sinal é recebido conforme a Figura 3.3. Na recepção, as diversas senóides são demoduladas e filtradas por um filtro passa-baixo. Finalmente, o fluxo é reconstruído por meio do conversor paralelo para série.

Além do combate à ISI, a técnica OFDM apresenta outra grande vantagem. Devido ao fato de cada subportadora ocupar uma largura de banda estreita, o canal visto pela subportadora pode ser aproximado por um canal plano em frequência. Dessa forma, os efeitos do canal podem ser combatidos em cada subportadora utilizando multiplicadores simples, ao invés de equalizadores complexos. Uma ilustração de um canal seletivo em frequência e a banda ocupada por subporta-

dora é mostrada na Figura 3.4.

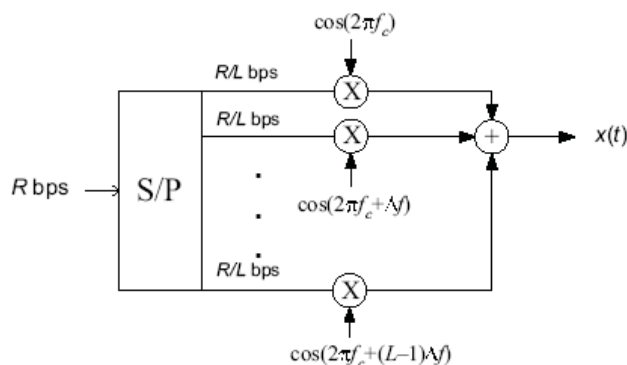


Figura 3.2: Transmissão em um sistema OFDM

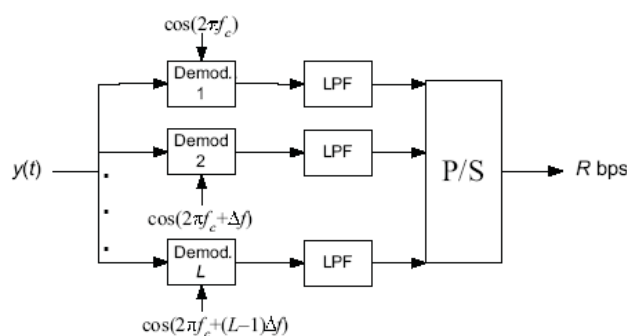


Figura 3.3: Recepção em um sistema OFDM

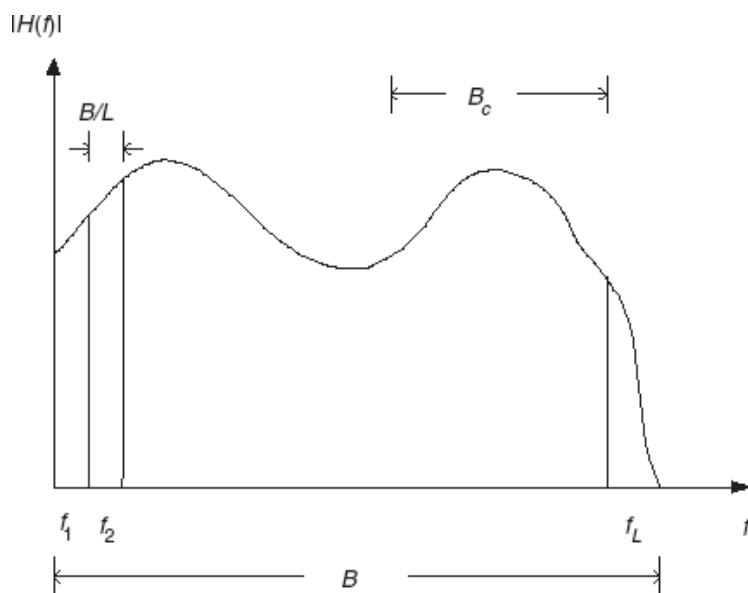


Figura 3.4: Exemplo de canal seletivo em frequência e banda ocupada por subportadora

É importante lembrar que a redução da ISI e o combate à seletividade em frequência não são fenômenos independentes. De fato, o aumento da duração do tempo de símbolo de forma a tornar-se significativamente maior que a dispersão por atraso do canal no domínio do tempo pode

ser visto no domínio da frequência como uma diminuição da largura de banda ocupada pelo sinal transmitido de tal forma que a largura de banda coerente do canal seja significativamente maior. Assim, o canal visto por cada subportadora é aproximadamente plano.

### **3.5 ALOCAÇÃO DINÂMICA DE RECURSOS**

A alocação dinâmica de recursos é uma das técnicas mais importantes em sistemas de comunicação móvel celular para atender a demanda explosiva de novos serviços móveis. Sem uma utilização eficiente dos recursos de rádio dos sistemas celulares (largura de banda, por exemplo), estes seriam demasiadamente inadequados e insuficientes para atender à crescente demanda de serviços.

A abordagem tradicional de alocação estática de recursos resulta em utilização ineficiente de espectro e potência, sobretudo porque visa manter desempenhos aceitáveis de enlace mesmo em condições extremas de desvanecimento. Por isso, a alocação dos recursos de forma dinâmica torna-se imprescindível à medida que proporciona aumento de eficiência espectral e de potência, recursos estes limitados em redes celulares.

Um dos fundamentos da alocação dinâmica de recursos é a exploração da diversidade inerente aos sistemas celulares por meio do gerenciamento inteligente de alocação de banda, múltiplo acesso, escalonamento de usuários e adaptação de enlace e potência. A diversidade na transmissão em sistemas celulares resultam da variação temporal e seletividade na frequência de canais de rádio móvel, desvanecimento independentes de múltiplos usuários, demanda de tráfego aleatório e mobilidade de usuários, entre outros.

O escalonamento de usuários e adaptação de enlace possibilitam ganhos de capacidade em sistemas de comunicação móvel em que diversos usuários compartilham os mesmos recursos de rádio.

No escalonamento de usuários, um agente escalonador distribui os recursos de rede entre os diversos usuários. Os recursos de uma rede celular podem dividir-se nos domínios do tempo, frequência e espaço. É possível existir outros domínios, como o de código, entretanto estes não

são explorados neste trabalho. Denomina-se um recurso de rede mínimo como a menor unidade possível de ser alocada para um usuário. Por exemplo, para o LTE, o recurso de rede mínimo alocado para um usuário é um PRB, que corresponde a 0,5 ms no domínio do tempo (um *timeslot*), 180 kHz no domínio da frequência (12 subportadoras de largura de banda de 15 kHz cada) e 1 antena de transmissão.

Na adaptação de enlace, escolhe-se um esquema de modulação e codificação utilizado para transmissão de informações para determinado usuário de acordo com as informações de canal reportadas pelo mesmo. Tendo conhecimento do canal, é possível transmitir utilizando um esquema que proporcione a maior taxa de transmissão possível, no entanto sem exceder determinada taxa de erro permitida.

Para obter ganhos de capacidade utilizando escalonamento de usuários e adaptação de enlace, alguns requisitos do sistema celular são exigidos:

- Cada terminal móvel deve ser capaz de mensurar a condição do seu enlace (por meio da relação sinal ruído mais interferência de canais piloto, por exemplo) e retornar o indicador de qualidade ao agente escalonador, que pode ser a estação rádio base.
- O agente escalonador, por sua vez, deve ser capaz de escalonar transmissões entre usuários assim como adaptar a taxa de transferência como função do indicador de qualidade de canal de cada usuário.

O escalonamento de usuários nos domínios do tempo, frequência e espaço segue determinado critério estabelecido para o processo de alocação. Diversos algoritmos de escalonamento são propostos na literatura [16, 17, 18], dentre os quais destacam-se:

- Algoritmo de maximização da taxa de transmissão.
- Algoritmo *proportional fair*.
- Algoritmo aleatório.

### 3.5.1 ALGORITMO DE MAXIMIZAÇÃO DA TAXA DE TRANSMISSÃO

O algoritmo de maximização da taxa de transmissão visa maximizar a vazão total de dados por célula (*throughput*), em bits por segundo. Para isso, utiliza-se como critério para a alocação a maior taxa de transmissão possível em cada recurso. Em outras palavras, o recurso é alocado ao usuário que permita a transmissão com maior taxa, que é calculada utilizando a fórmula de Shannon para capacidade de um canal AWGN, dada por:

$$C = B \times \log_2(1 + SNR) \quad [b/s], \quad (3.6)$$

em que  $B$  é a largura de banda do canal e  $SNR$  é a relação sinal-ruído do enlace. Como a capacidade do enlace aumenta à medida que  $SNR$  aumenta, o recurso é alocado ao usuário com maior valor de SNR, ou seja, com melhores condições de enlace.

### 3.5.2 ALGORITMO PROPORTIONAL FAIR

O algoritmo *proportional fair* (justiça proporcional) visa estabelecer um compromisso entre taxa de transmissão e equilíbrio na distribuição de recursos. Para isso, utiliza como critérios para a alocação a taxa de transmissão requerida pelo usuário e a taxa de transferência média do usuário ao longo de um período de tempo passado. Em outras palavras, o recurso é alocado ao usuário que apresentar a maior métrica de alocação, dada por:

$$\frac{R_k[m]}{T_k[m]}, \quad (3.7)$$

em que  $R_k[m]$  é a taxa requerida pelo usuário  $k$  no instante  $m$  e  $T_k[m]$  é a taxa de transferência média do usuário  $k$  no passado até o instante  $m$ .

No simulador desenvolvido neste trabalho, o modelo de tráfego implementado para todos os usuários é do tipo *best effort full buffer*. Neste modelo, o usuário requisita constantemente *bits* a uma taxa máxima possível que a rede possa oferecer, no entanto sem demandar um valor de taxa de transferência específica. Dessa forma, o valor de  $R_k[m]$  na Equação 3.7 é aproximado

para a capacidade instantânea do enlace calculado pela fórmula de Shannon (Equação 3.6). Tal aproximação também é utilizada em [6].

### **3.5.3 ALGORITMO ALEATÓRIO**

O algoritmo aleatório é o mais simples dentre os abordados neste trabalho e visa a igualdade na distribuição de recursos. Neste método, os recursos são distribuídos de forma uniforme e aleatória entre os usuários de rede e não há critério para alocação recursos.



# 4 CANAL DE RÁDIO MÓVEL

*Este capítulo apresenta uma descrição sobre modelagem de canais de rádio móvel, incluindo parâmetros de caracterização de canal e modelos de desvanecimento de larga e pequena escala. Também são descritos os algoritmos utilizados para a geração de canal seletivo em frequência e variante no tempo no simulador.*

## 4.1 INTRODUÇÃO

O canal de rádio desempenha papel fundamental nas comunicações móveis. Seu comportamento, por tantas vezes imprevisível, exerce influência direta sobre o enlace entre transmissor e receptor. A imprevisibilidade do canal e sua variação, tanto no domínio do tempo, frequência e espaço, exige cuidados e esforços adicionais para a análise e modelagem, de tal forma que diversos modelos de canal utilizados em simulação computacional baseiam-se em informações estatísticas coletadas ao longo dos anos de um canal real.

A perda de potência na transmissão de um sinal em um canal de rádio móvel é inevitável. Apenas a separação física entre transmissor e receptor já é motivo para que apenas parte da potência transmitida chegue ao receptor. A soma total de perdas que ocorrem na transmissão de um sinal de comunicação móvel denomina-se *perda de propagação*. Pode-se expressar matematicamente a perda de propagação como a razão entre potência transmitida e potência recebida. Se considerarmos o ganho das antenas de transmissão e recepção, tem-se:

$$L = \frac{P_{TX}G_{TX}G_{RX}}{P_{RX}}, \quad (4.1)$$

em que  $L$  é a perda de propagação,  $P_{TX}$  é a potência transmitida,  $G_{TX}$  e  $G_{RX}$  são os ganhos das antenas de transmissão e recepção, respectivamente, e  $P_{RX}$  é a potência recebida. Frequentemente são encontrados na literatura modelos de perdas de propagação em unidades de decibel (dB) [19, 14], modificando a equação acima para a forma:

$$L_{dB} = 10 \log_{10}(P_{TX}) + 10 \log_{10}(G_{TX}) + 10 \log_{10}(G_{RX}) - 10 \log_{10}(P_{RX}). \quad (4.2)$$

Tradicionalmente, a modelagem das perdas de propagação em sistemas de comunicação móvel se divide em duas partes, de acordo com a natureza do desvanecimento sofrido pelo sinal transmitido: modelos de desvanecimento de larga escala e modelos de desvanecimento de pequena escala [14]. Denomina-se *desvanecimento* a alteração das características do sinal transmitido devido à propagação pelo canal de rádio móvel [19]. Esta alteração pode ser na amplitude, fase ou mesmo na frequência da portadora do sinal transmitido.

## 4.2 DESVANECIMENTO DE LARGA ESCALA

Os modelos de desvanecimento de larga escala preocupam-se em caracterizar a distribuição espacial do sinal transmitido. Adicionalmente, têm como objetivo prever a intensidade do sinal médio no domínio do tempo. Logo, são úteis para estimar área de cobertura de determinado transmissor.

Em geral, o desvanecimento de larga escala é composto por dois fatores: as perdas de percurso e o sombreamento.

### 4.2.1 PERDAS DE PERCURSO

As *perdas de percurso* são causadas pela separação física entre o transmissor e o receptor. A distância física existente entre os dois elementos da comunicação acarreta em uma redução da intensidade do sinal transmitido.

Diversos modelos de perda de percurso são uma combinação de métodos analíticos e empíricos. São tomadas medidas ao longo dos anos para determinadas condições de canal e estes dados são traduzidos para a forma de curvas ou expressões analíticas. A vantagem de se utilizar medidas experimentais para a modelagem de canais é que fatores desconhecidos ou difíceis de serem modelados matematicamente já estão incluídos nos valores obtidos em medições.

Entretanto, medidas experimentais perdem validade à medida que as condições do canal que se deseja modelar distanciam-se das condições do canal medidos, sendo necessárias novas medições. Estas novas condições não significam necessariamente um novo meio físico, podendo ser simplesmente uma alteração na frequência de transmissão.

Em geral, a relação entre perda de percurso e separação física entre transmissor e receptor não é linear e varia de acordo com o ambiente. Assim, para cada ambiente pode-se atribuir um expoente de perda de propagação, onde este expoente caracteriza a relação entre a perda de propagação e a distância da forma:

$$PL \sim \left(\frac{1}{d}\right)^n, \quad (4.3)$$

em que  $PL$  é a perda de percurso,  $d$  é a distância entre transmissor e receptor e  $n$  é o expoente de perda de propagação. Na Tabela 4.1 encontram-se diversos valores de expoente de perda de propagação relacionados à ambientes variados [19].

Tabela 4.1: Expoente de perdas de propagação para diversos ambientes

<b>Ambiente</b>	<b>Expoente</b>
Espaço livre	2
Área urbana	2,7 a 3,5
Área urbana com sombreamento	3 a 5
Interior de edifício com linha de visada	1,6 a 1,8
Interior de edifício com obstrução	4 a 6
Interior de indústria com obstrução	2 a 3

#### 4.2.2 PROPAGAÇÃO EM ESPAÇO LIVRE

O modelo de propagação em espaço livre é utilizado para prever a potência recebida para uma situação em que não há obstrução física entre o transmissor e o receptor. Como exemplo de aplicação do modelo de propagação no espaço livre pode-se citar comunicações via satélite e enlace de microondas. O modelo segue a equação de enlace no espaço livre descrito por Friis para regiões de campo distante [19]:

$$P_{RX} = \frac{P_{TX} G_{TX} G_{RX} \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L_{outros}}, \quad (4.4)$$

em que  $P_{RX}$  é a potência recebida,  $P_{TX}$  é a potência transmitida,  $G_{TX}$  é o ganho da antena de transmissão,  $G_{RX}$  é o ganho da antena de recepção,  $\lambda$  é o comprimento de onda do sinal,  $d$  é a distância entre transmissor e receptor e  $L_{outros}$  são perdas não relacionadas à propagação.

Considerando que não há perdas não relacionadas à propagação ( $L = 1$ ), o valor de  $PL$  para o espaço livre é dado por

$$PL = \frac{P_{TX} G_{TX} G_{RX}}{P_{RX}} = \frac{(4\pi)^2 d^2}{\lambda^2}. \quad (4.5)$$

### 4.2.3 SOMBREAMENTO

A presença de objetos no meio físico altera a distribuição espacial da potência transmitida, de forma que dois receptores equidistantes do transmissor não receberão necessariamente sinal com mesma intensidade. Este fenômeno denomina-se *sombreamento*.

O sombreamento pode ser modelado como uma variável aleatória somada à perda de propagação, quando esta é calculada em decibéis. A distribuição probabilística da variável aleatória pode ser determinada com base em valores medidos. Segundo [19], resultados experimentais indicam que a variável aleatória segue uma distribuição log-normal com média zero e desvio padrão  $\sigma$ . Assim, acrescentando o fenômeno de sombreamento, tem-se:

$$L_s(d) = PL(d) + S_\sigma \quad [dB], \quad (4.6)$$

em que  $L_s(d)$  é a perda incluindo o sombreamento,  $PL(d)$  é a perda de percurso calculada com base na distância entre transmissor e receptor e  $S_\sigma$  é a variável aleatória com distribuição log-normal de média zero e desvio padrão  $\sigma$ .

## 4.3 DESVANECIMENTO DE PEQUENA ESCALA

O desvanecimento de pequena escala descreve flutuações do sinal recebido em um pequeno período de tempo observado [19]. Este é causado pela sobreposição de diversas amostras do sinal transmitido que chegam com amplitudes diferentes e em instantes diferentes no receptor. A principal característica do desvanecimento de pequena escala é a presença de multipercursos, que ocasionam a chegada das amostras defasadas no tempo.

Entretanto, outros fatores influenciam no desvanecimento de pequena escala. Entre eles, destacam-se a velocidade do terminal móvel, velocidade de objetos entre o transmissor e receptor e largura de banda do sinal transmitido.

### 4.3.1 CAUSAS DO DESVANECIMENTO DE PEQUENA ESCALA

#### 4.3.1.1 MULTIPERCURSOS

A presença de multipercursos é observada sobretudo em cenários urbanos, onde prédios, carros, residências e outros objetos atuam como objetos refletoras e/ou dispersores, proporcionando diversos caminhos físicos pelos quais o sinal pode chegar ao receptor. Dessa forma, o sinal no receptor é um somatório de sinais que percorrem os diversos caminhos, com diferentes amplitudes, fases e ângulos de chegadas. A diferença de fase justifica-se pela diferença de tempo de chegada entre os sinais. Este somatório pode se dar de forma construtiva ou destrutiva.

Os multipercursos causam, entre outros efeitos, variações bruscas na intensidade do sinal em intervalos de espaço ou de tempo pequenos, alteração da frequência central da portadora e dispersão temporal.

#### 4.3.1.2 DESVIO DOPPLER

A velocidade do terminal móvel traduz em movimento relativo do receptor em relação ao transmissor. O movimento relativo entre estes causam desvios em frequência de cada componente de multipercurso. Este desvio é chamado de *desvio Doppler*. Ainda que o receptor esteja parado em relação ao transmissor, a velocidade de objetos entre ambos também pode ocasionar este

efeito. Na Figura 4.1, extraída de [19], observa-se um receptor deslocando-se pelo eixo com uma velocidade  $v$ . A diferença entre as distâncias percorridas por um sinal transmitido quando o receptor percorre uma distância  $d$  pode ser aproximado por  $\Delta l = d \cos \theta = v \Delta t \cos \theta$ . A alteração da fase do sinal recebido devido à diferença entre as distâncias percorridas pelo sinal transmitido segue a equação

$$\Delta \phi = \frac{2\pi \Delta l}{\lambda} \Rightarrow \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = \frac{2\pi}{\lambda} v \cos \theta \quad (4.7)$$

A equação acima relaciona o desvio Doppler à velocidade do receptor e o ângulo entre a direção de movimento e a direção de chegada do sinal transmitido. Assim, se o receptor se move em direção ao transmissor, o desvio é positivo, ao passo que se o receptor se move em direção contrária ao transmissor, o desvio é negativo.

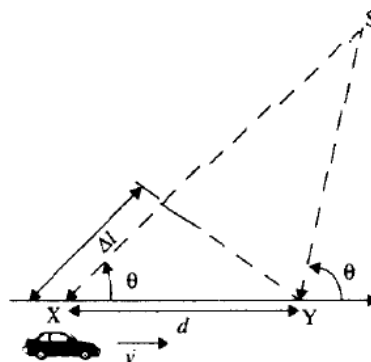


Figura 4.1: Ilustração de desvio Doppler

#### 4.3.1.3 LARGURA DE BANDA DO CANAL

Devido aos multipercursos, a resposta do canal em frequência é seletiva. No domínio do tempo, isto pode ser explicado pelo fato de que um sinal transmitido chega ao receptor em várias amostras defasadas. Essa defasagem causa dispersão temporal do sinal. Logo, se a taxa de transmissão for tal que o próximo sinal chegue antes que todos os componentes do sinal anterior cheguem ao receptor, o sinal irá sofrer interferência inter-simbólica. Estatisticamente, define-se largura de banda coerente do canal como o intervalo no domínio da frequência em que o sinal

sofre alteração constante na amplitude e linear na fase. Se a largura de banda do sinal transmitido for maior do que a largura de banda coerente do canal, então será observada a seletividade.

### 4.3.2 PARÂMETROS DE CARACTERIZAÇÃO DE CANAL COM DESVANECIMENTO DE PEQUENA ESCALA

Essencialmente, o canal multipercurso comporta-se como um somatório de diversos sinais defasados no tempo e com amplitudes diferentes. Assim, este pode ser modelado como um filtro linear variante no tempo, causado pelo movimento relativo do receptor em relação ao transmissor. Por meio de sua resposta impulsiva, é possível caracterizá-lo completamente, uma vez que esta possui informações necessárias para conhecer a resposta do canal para qualquer sinal de entrada. Logo, a resposta impulsiva de um canal torna-se ferramenta útil para a comparação e predição de sistemas de comunicação móvel e verificação de largura de banda do canal sob determinadas condições.

Para um canal que se comporta como um somatório de diversas amostras do sinal de entrada defasadas no tempo e com amplitudes diferentes, é esperado que a resposta impulsiva seja similar a um trem de impulsos, defasados temporalmente, com diferentes amplitudes e fases. De fato, em [19], mostra-se que a resposta impulsiva de um canal multipercurso variante no tempo tem a forma:

$$h(t, \tau) = \sum_{i=0}^{N-1} a_i(t, \tau) e^{j(2\pi f_c \tau_i(t) + \phi_i(t, \tau))} \delta(t - \tau_i(t)), \quad (4.8)$$

em que:

- O índice  $i$  corresponde a cada multipercurso;
- $a_i(t, \tau)$  é a amplitude do impulso correspondente ao multipercurso  $i$ ;
- $\tau_i(t)$  é o atraso do impulso no instante  $t$ ;
- $f_c$  é a frequência da portadora;
- $\phi_i(t)$  é a defasagem adicional na fase devido ao canal.

É importante ressaltar a diferença entre domínio do tempo e domínio do atraso. O domínio do tempo serve para caracterizar o canal variante no tempo, devido ao movimento relativo do receptor em relação ao transmissor. O domínio do atraso serve para caracterizar a resposta impulsiva do canal quanto à sua dispersão temporal, em um dado instante de tempo.

Deste modo, se o canal for invariante no domínio do tempo, para cada instante  $t$ , a resposta impulsiva será exatamente a mesma. Em contra-partida, se o canal não apresentar multipercursos, a resposta impulsiva no domínio do atraso apresentará apenas um impulso. A Figura 4.2, extraída de [19], ilustra um exemplo de resposta impulsiva de um canal multipercursos variante no tempo.

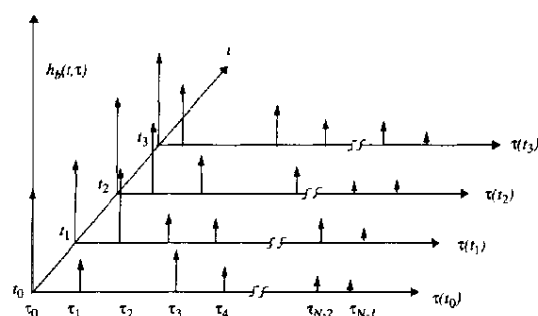


Figura 4.2: Resposta impulsiva para um canal multipercursos variante no tempo

Alguns dos principais parâmetros de caracterização de canal multipercursos dizem respeito ao seu perfil de distribuição de potência no domínio do atraso. Este perfil mostra como a potência recebida é distribuída entre os diversos multipercursos. Um exemplo de perfil de distribuição de potência no domínio do atraso é mostrado na Figura 4.3, adaptada de [19].

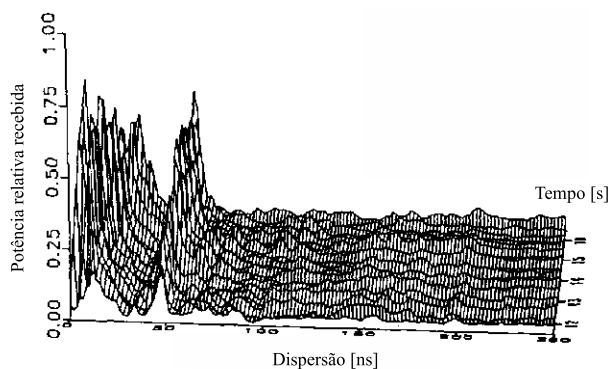


Figura 4.3: Perfil de distribuição de potência

A potência instantânea de um canal multipercursos é definido por



$$P(t_0) = \sum_{k=0}^{N-1} a_k^2(t_0, \tau_k), \quad (4.9)$$

em que  $P(t_0)$  é a potência instantânea e  $a_k$  são os coeficientes da resposta impulsiva do canal.

Alguns dos principais parâmetros para caracterização de canal multipercurso são: *atraso médio em excesso* (*mean excess delay*), *espalhamento RMS por atraso* (*excess RMS delay*), e *espalhamento médio por atraso* (*excess delay spread*) ( $X$  dB). Estes três parâmetros constituem parâmetros de dispersão temporal (no domínio do atraso) e dizem respeito à natureza dispersiva do canal multipercurso. No entanto, nada afirmam a respeito da natureza variante no tempo do canal. Para caracterizar o canal quanto ao movimento relativo do receptor em relação ao transmissor, os principais parâmetros são o *espalhamento Doppler* e o *tempo de coerência*.

Por definição, o *atraso médio em excesso* é o primeiro momento do perfil de distribuição de potência e segue a equação

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k^{N-1} a_k^2 \tau_k}{\sum_k^{N-1} a_k^2}. \quad (4.10)$$

O *espalhamento RMS por atraso* é a raiz quadrada do segundo momento central do perfil de distribuição de potência e é definido por

$$\sigma_\tau = \sqrt{\overline{\tau^2} - \bar{\tau}^2}, \quad (4.11)$$

em que

$$\overline{\tau^2} = \frac{\sum_k^{N-1} a_k^2 \tau_k^2}{\sum_k^{N-1} a_k^2}. \quad (4.12)$$

O *espalhamento médio por atraso* ( $X$  dB) é definido como o período de tempo entre o instante de chegada do primeiro impulso da resposta impulsiva do canal e o instante em que a potência de um multipercurso está  $X$  dB abaixo do multipercurso com maior potência.

A *largura de banda de coerência* é análogo ao *espalhamento RMS por atraso* e serve para

caracterizar o canal no domínio da frequência. Entretanto, enquanto o espalhamento por atraso é um fenômeno natural causado por reflexões e dispersões ao longo do caminho de propagação, a *largura de banda de coerência* é uma medida estatística, que mede o intervalo de frequências na qual o canal apresenta resposta em amplitude constante e resposta em fase linear. Em outras palavras, é o intervalo no qual duas frequências apresentarão forte correlação de amplitude. Se esta correlação for acima de 0,9, então tem-se [19]:

$$B_c \approx \frac{1}{50\sigma_\tau}. \quad (4.13)$$

O *espalhamento Doppler* e *tempo de coerência*, como já mencionado anteriormente, servem para caracterizar o canal quanto à sua variação temporal. O *espalhamento Doppler* é o intervalo de frequências na qual o espectro Doppler é diferente de zero. No caso de uma portadora de frequência central  $f_c$ , o espalhamento Doppler é o intervalo que se estende desde  $f_c - f_d$  até  $f_c + f_d$ , onde  $f_d$  é o desvio doppler, calculado com base na velocidade relativa do receptor em relação ao transmissor e o ângulo entre a direção do movimento relativo e a direção de chegada do sinal.

O *tempo de coerência* é o análogo ao espalhamento Doppler e refere-se ao comportamento do canal no domínio do tempo. Assim como largura de banda de coerência, o tempo de coerência é uma medida estatística e quantifica o período de tempo em que o canal apresenta forte correlação de amplitude. Se esta correlação for acima de 0,5, então tem-se [19]:

$$T_c \approx \frac{9}{16\pi f_m}, \quad (4.14)$$

em que  $f_m$  é o desvio Doppler máximo dado por  $\frac{v}{\lambda}$ , onde  $v$  é a velocidade do terminal móvel e  $\lambda$  é o comprimento de onda da portadora.

Os mecanismos de dispersão temporal e de frequência e seus efeitos proporcionam a classificação de um canal com desvanecimento de pequena escala em quatro subtipos, dependendo da natureza do sinal transmitido, das características do canal em si e do movimento relativo entre transmissor e receptor. A presença de multipercursos acarreta em dispersão temporal no domínio

do atraso. De acordo com a relação entre os parâmetros de dispersão temporal, pode-se classificar o desvanecimento em:

1. Desvanecimento plano: a largura de banda do sinal transmitido é menor que a *largura de banda de coerência* do canal. Analogamente, o *espalhamento por atraso* é menor que o período de um símbolo transmitido;
2. Desvanecimento seletivo em frequência: a largura de banda do sinal transmitido é maior que a *largura de banda de coerência* do canal. Analogamente, o *espalhamento por atraso* é maior que o período de um símbolo transmitido;

O espalhamento Doppler acarreta em variação do canal no domínio do tempo. De acordo com a relação entre os parâmetros de variação temporal (ou dispersão em frequência), pode-se classificar o desvanecimento em:

1. Desvanecimento rápido: o tempo de coerência é menor que o período de um símbolo transmitido;
2. Desvanecimento lento: o tempo de coerência é maior que o período de um símbolo transmitido.

#### 4.4 IMPLEMENTAÇÃO DO CANAL NO SIMULADOR

O modelo de canal utilizado no simulador é uma composição de modelos com desvanecimento de grande escala e de pequena escala. Para observar o comportamento da rede celular utilizando técnica de multiplexação OFDM e algoritmos de adaptação de modulação/codificação, o modelo de pequena escala é seletivo em frequência e varia no domínio do tempo, conforme a velocidade estabelecida para o terminal móvel. A potência recebida no terminal móvel é composta pelos seguintes fatores:

$$P_{RX} = \frac{G_{TX}G_{RX}P_{TX}||H(f, t)||^2}{L}, \quad (4.15)$$

em que  $P_{TX}$  e  $P_{RX}$  são as potência transmitida e recebida, respectivamente,  $G_{TX}$  e  $G_{RX}$  são os ganhos das antenas de transmissão e recepção, respectivamente,  $L$  são as perdas relativos ao desvanecimento de larga escala e  $H(f, t)$  é uma matriz de canal seletivo em frequência e variante no tempo relativo ao desvanecimento de pequena escala. Por sua vez, o desvanecimento de larga escala é dado por:

$$L = PL(d)S(\sigma), \quad (4.16)$$

em que  $PL(d)$  é a perda de percurso para uma dada distância  $d$ , e  $S(\sigma)$  é a perda associada ao sombreamento para dado desvio padrão  $\sigma$ .

#### 4.4.1 GERAÇÃO DE DESVANECIMENTO DE LARGA ESCALA

O procedimento para geração do desvanecimento de larga escala consiste no cálculo da perda de propagação de acordo com a separação entre o terminal móvel e estação rádio base e na geração de um valor aleatório atribuído ao sombreamento.

##### 4.4.1.1 MODELO DE PERDA DE PERCURSO

O modelo de perda de propagação utilizado no simulador é proposto em [13] para simulações sistêmicas macro-celulares. O modelo segue:

$$PL = 128,1 + 37,6 \log_{10}(R), \quad (4.17)$$

em que  $R$  é a separação entre transmissor e receptor, em quilômetros. A Figura 4.4 ilustra a distribuição de perda de percurso para o *grid* de simulação utilizado no simulador desenvolvido neste trabalho.

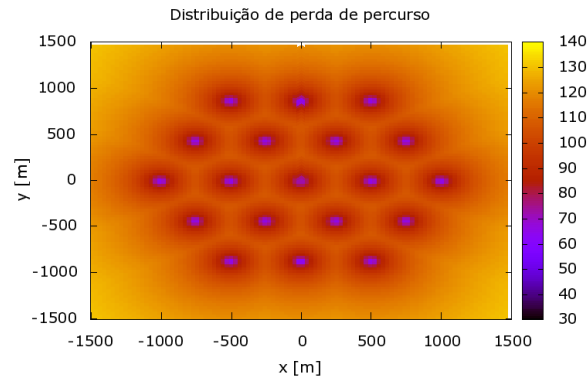


Figura 4.4: Perda de percurso para um *grid* de simulação de 19 células

#### 4.4.1.2 MODELO DE SOMBREAMENTO

O sombreamento (em decibéis) é modelado no simulador como uma variável aleatória com distribuição log-normal de média zero e desvio padrão 8 dB.

#### 4.4.2 GERAÇÃO DE DESVANECIMENTO DE PEQUENA ESCALA

O procedimento para a geração de desvanecimento de pequena escala consiste em três etapas:

1. É escolhido um perfil de distribuição de potência desejado;
2. Para cada multipercurso presente no perfil, é gerada uma resposta impulsiva  $h(t)$ , segundo o algoritmo proposto por Clarke [19]. Esta resposta impulsiva é variante no domínio do tempo;
3. Para cada instante de tempo, efetua-se uma transformada de Fourier em  $h(\tau)$  para obter  $H(f)$ .

##### 4.4.2.1 PERFIS DE DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA

O simulador permite ao usuário escolher um perfil entre os listados na Tabela 4.2 para a geração do canal. Estes perfis estão disponibilizados na biblioteca IT++ [20], utilizada no desenvolvimento do simulador.

Tabela 4.2: Perfis de distribuição de potência

Perfil	Número de multipercursos	Atraso médio em excesso [ms]	Espalhamento RMS por atraso [ms]
ITU Vehicular A	6	0,254351	0,37039
ITU Vehicular B	6	1,49808	4,00141
ITU Pedestrian A	4	0,0144276	0,0459944
ITU Pedestrian B	6	0,409099	0,633421
COST207 Rural Area	4	0,0989062	0,126382
COST207 Rural Area	6	0,0637443	0,0976956
COST207 Typical Urban	6	0,704381	1,06782
COST207 Aternative Typical Urban	6	0,674499	1,0616
COST207 Typical Urban	12	0,959855	1,00001
COST207 Aternative Typical Urban	12	0,963264	1,00921
COST207 Bad Urban	6	2,1476	2,3915
COST207 Aternative Bad Urban	6	2,07974	2,40837
COST207 Bad Urban	12	2,57799	2,48824
COST207 Aternative Hilly Terrain	12	2,61576	2,55317
COST207 Hilly Terrain	6	2,06783	5,03525
COST207 Aternative Hilly Terrain	6	1,21503	3,92394
COST207 Hilly Terrain	12	3,13164	4,984
COST207 Aternative Hilly Terrain	12	2,70226	5,09775
COST259 Typical Urban	20	0,500428	0,500056
COST259 Rural Area	10	0,0885376	0,100008
COST259 Hilly Terrain	20	0,8939	3,03983

#### 4.4.2.2 ALOGRITMO DE GERAÇÃO DE UM MULTIPERCURSO

Para a geração das amostras variantes no tempo de cada multipercurso, foi utilizado o modelo de Clarke para canal. Este modelo é desenvolvido a partir das características do campo eletromagnético do sinal recebido por um terminal móvel em movimento e originado por dispersão [19]. A direção de chegada do sinal é medida a partir da direção de movimento do terminal em relação à base. O movimento relativo do terminal móvel em relação ao transmissor proporciona variação temporal no canal.

Para a análise do campo elétrico recebido, considera-se que apenas a componente  $E_z$  é não-nula. Esta componente é resultado da combinação do diversos sinais que chegam ao receptor em direções diferentes e com diferentes atenuações, da forma:

$$E_Z = E_0 \sum_{k=0}^N a_k \cos(2\pi f_c t + \theta_n), \quad (4.18)$$

em que  $E_0$  corresponde ao valor médio do campo elétrico, os termos  $a_k$  representam os valores individuais dos campos,  $f_c$  é a frequência central de transmissão e  $\theta_n$  é o atraso sofrido por cada componente. Os valores de  $E_0$  e  $a_k$  são tomados de tal forma que o somatório do quadrado de todos os coeficientes  $a_k$  resulte em valor unitário.

Quando  $N$  tende a um valor suficientemente alto, a componente  $E_Z$  pode ser aproximada por uma variável aleatória gaussiana, considerando que  $\theta_n$  é uma variável aleatória com distribuição uniforme entre 0 e  $2\pi$ . Podemos então representar  $E_Z$  por

$$E_Z = T_f(t) \cos(2\pi f_c t) - T_q(t) \sin(2\pi f_c t), \quad (4.19)$$

em que  $T_f(t)$  e  $T_q(t)$  são processos estocásticos gaussianos. Por fim, é possível mostrar [19] que a envoltória do campo elétrico recebido segue uma distribuição *Rayleigh*, ou seja,

$$p(|E_Z| = r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} & 0 < r < \infty \\ 0 & r < 0 \end{cases}, \quad (4.20)$$

em que  $\sigma^2 = E_0^2/2$ .

Também é possível mostrar por [19] que a densidade espectral do campo elétrico é da forma:

$$S_{E_z}(f) = \frac{1,5}{\pi f_m \sqrt{1 - \left(\frac{f - f_c}{f_m}\right)^2}}, \quad (4.21)$$

em que  $f_c$  é a frequência da portadora,  $f_m$  é desvio doppler máximo. A Figura 4.5 ilustra a densidade espectral do processo estocástico  $E_Z(t)$ , centrado em 0 Hz e com desvio máximo de 100 Hz. Nota-se que a densidade espectral tende ao infinito à medida que a frequência aproxima-se de  $f_c + f_m$  ou  $-f_c - f_m$ .

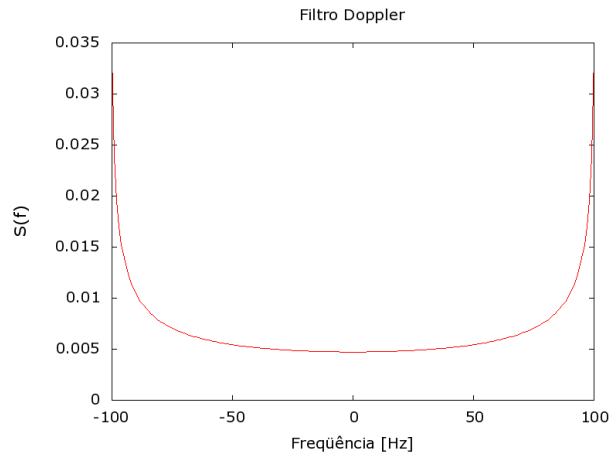


Figura 4.5: Filtro Doppler

Para implementar o modelo de Clarke, utiliza-se um algoritmo com os procedimentos descritos a seguir, cujo diagrama de bloco é ilustrado na Figura 4.6.

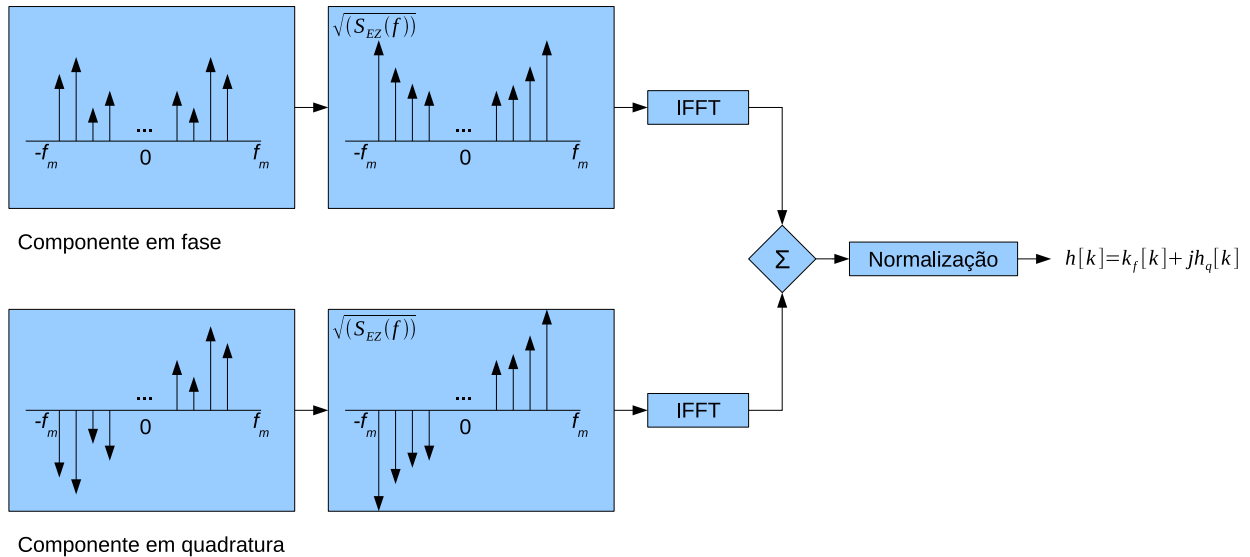


Figura 4.6: Diagrama de bloco para geração de canal seguindo o modelo de Clarke.

1. Especifica-se o número de pontos utilizados para representar a densidade espectral ( $N$ ) e o desvio doppler máximo. Para facilitar futuros cálculos, recomenda-se que  $N$  seja potência de 2;
2. Calcula-se a distância entre cada ponto. Considerando que a densidade espectral estende-se por uma largura de  $2f_m$ , a distancia é dada por  $\Delta f = \frac{2f_m}{N}$ . A partir da separação entre pontos consecutivos é possível calcular a duração da forma de onda no tempo,  $T = \frac{1}{\Delta f}$ ;



3. Geram-se variáveis aleatórias complexas gaussianas para cada uma das frequências positivas;
4. O espectro negativo é construído tomando-se, para cada valor de frequência negativa, o conjugado do valor gerado para a respectiva frequência positiva. Entretanto, é importante frisar que para as frequências positivas é atribuído um número maior de pontos, porque é atribuído um ponto para a frequência zero. Assim, existem  $\frac{N}{2}$  pontos de frequência positiva,  $\frac{N}{2} - 1$  pontos de frequência negativa e 1 ponto em zero, totalizando  $N$  pontos especificados no passo 1, conforme Figura 4.7;

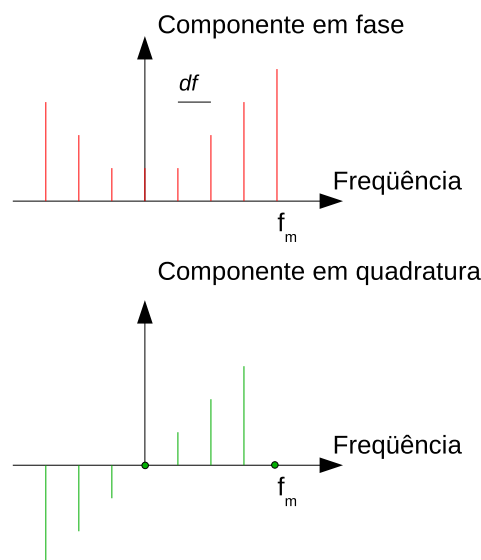


Figura 4.7: Amostras na frequência

5. As partes reais e imaginárias das variáveis são multiplicadas por  $S_{E_z}(f)$ , onde  $f$  é a frequência respectiva de cada ponto;
6. Assume-se a parte imaginária dos pontos na frequência zero e na última frequência positiva igual a zero;
7. Efetua-se a transformada discreta de Fourier inversa às partes reais e imaginárias das amostras resultantes. A seqüência gerada a partir da IFFT da parte real ( $h_f[k]$ ) será puramente real, enquanto a seqüência resultante da IFFT da parte imaginária ( $j h_q[k]$ ) será puramente imaginária;

No final do algoritmo, obtém-se uma seqüência  $h[k] = h_f[k] + jh_q[k]$ . Cada amostra corresponde à resposta impulsiva do canal em um determinado instante de tempo. Para obter a envoltória do campo elétrico resultante do modelo de Clarke, toma-se o valor absoluto de  $h[k]$ , chegando a  $r(kT) = |h(kT)|$ , onde  $h(kT) = h[k]$ . Para obter a resposta do canal para um sinal de entrada  $s(t)$ , basta multiplicar o sinal de entrada por  $r(t)$  [19].

Para testar a implementação do algoritmo de Clarke, foram geradas 16.384 amostras de canal. A partir destas amostras, foi gerada uma curva de função densidade de probabilidade acumulada e comparada com uma função densidade de probabilidade acumulada de Rayleigh, utilizando como parâmetro o mesmo desvio padrão. O resultado, mostrado na Figura 4.8, indica que a envoltória do canal gerado segue uma distribuição de Rayleigh, conforme esperado.

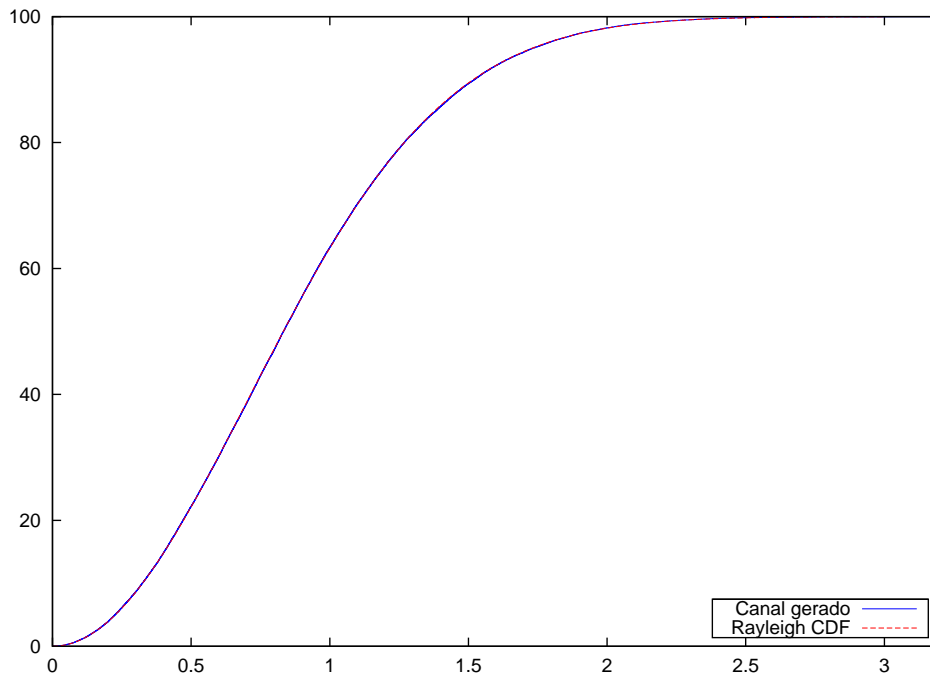


Figura 4.8: Comparação de canal gerado com resultado teórico

#### 4.4.2.3 GERAÇÃO DE CANAL SELETIVO EM FREQUÊNCIA

Ao final da geração dos multipercursos, tem-se um modelo de canal com a da Figura 4.2, onde cada impulso possui determinada fase e amplitude. Efetua-se uma normalização do canal, de forma que a energia média no tempo de  $h(\tau)$  tenha valor unitário. Finalmente, efetua-se uma transformada de Fourier em  $h(t, \tau)$  para cada instante de tempo. O resultado desta transformada é a resposta em frequência do canal  $H(f, t)$ . A transformada de Fourier é realizada de tal modo que a largura de banda resultante seja no mínimo do tamanho da largura de banda total definido para a simulação e o espaçamento entre amostras na frequência seja no máximo do tamanho da largura de banda de cada subportadora também definida nas configurações do simulador. Na Figura 4.9, observa-se um exemplo de canal gerado pelo simulador para determinado instante de tempo. Na Figura 4.10, observa-se um exemplo de canal variante no tempo também gerado pelo simulador.

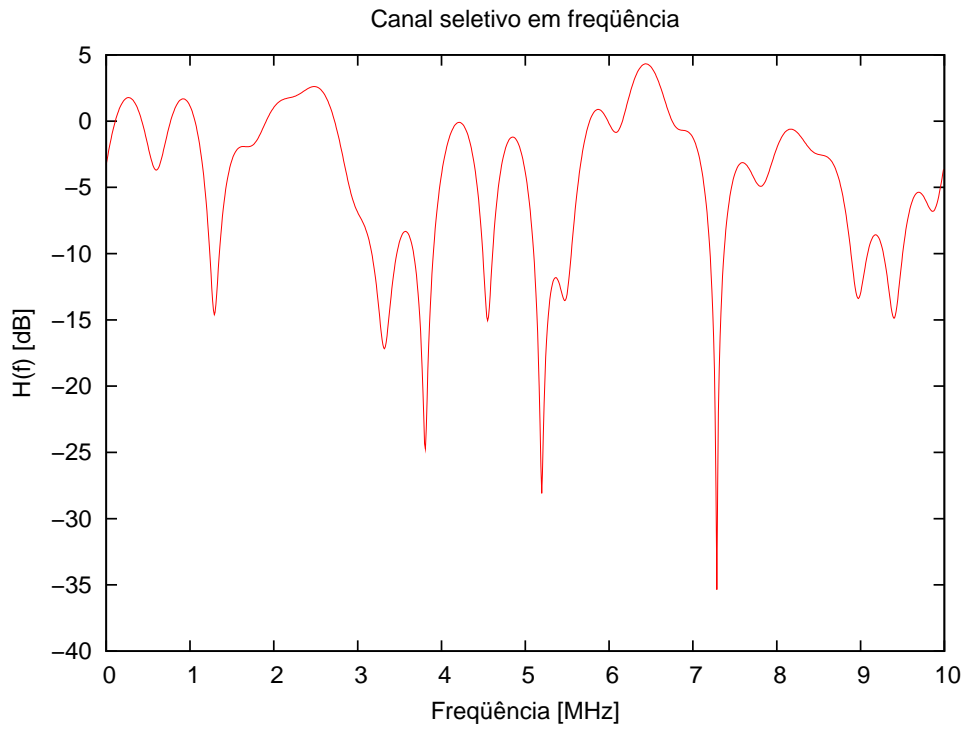


Figura 4.9: Exemplo de canal seletivo em frequência para determinado instante de tempo

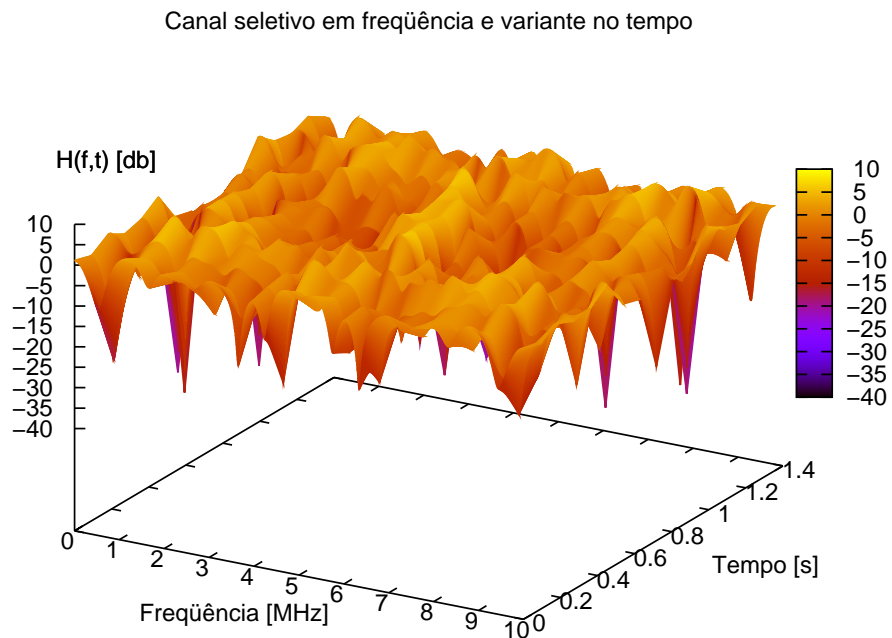


Figura 4.10: Exemplo de canal seletivo em frequência variante no tempo

# 5 O SIMULADOR

*Este capítulo apresenta uma descrição do simulador desenvolvido neste trabalho. São descritos todos os subsistemas, bem como a estrutura de funcionamento do programa.*

## 5.1 SIMULAÇÃO DE REDES MÓVEIS

Tradicionalmente, simulação de redes celulares são divididas em duas partes, a simulação de enlace e a simulação sistêmica. Essa separação é feita para que se possa simular o comportamento de uma rede celular como um todo sem a necessidade da simulação instantânea de cada enlace, o que acarretaria em um tempo de simulação extremamente longo. Para isso, o simulador de enlace fornece resultados relativos ao desempenho médio do enlace para um dado sistema de comunicação celular e estes resultados são incorporados ao simulador sistêmico.

De forma geral, a simulação de enlace avalia apenas o desempenho da camada física do enlace, compreendendo os seguintes aspectos [21]:

- Codificação;
- Modulação;
- Pré-processamento e pós-processamento espacial;
- Estimação de parâmetros, como sincronismo, canal, ganho;
- Desvanecimento de pequena escala;
- Interferência;
- Adaptação de enlace.

Os resultados da simulação de enlace, na sua grande maioria, são curvas de desempenho, que fornecem valores de taxa de erro (BER, BLER, FER ou BEP) para uma determinada faixa de valores de condição do enlace (SINR, C/I ou  $E_b/N_0$ ).

Por sua vez, o simulador sistêmico avalia o desempenho da rede celular incluindo cenários de simulação, criação de usuários, entre outros. Tradicionalmente, envolve os seguintes aspectos [21]:

- Múltiplos usuários e sua distribuição no cenário de simulação;
- Perdas de percurso, utilizando modelos de perda de propagação ou com base no cenário utilizado;
- Sombreamento;
- Controle de potência;
- Adaptação de enlace (escolha de MCS com base em troca de informação entre usuário e estação rádio base).
- Solicitação de retransmissões (ARQ);
- Modelagem de tráfego;
- Alocação de recursos em pequena escala, ou seja, alocação de recursos dentro de uma célula;
- Alocação de recursos em grande escala, ou seja, entre células.

A modelagem de uma rede celular abordando apenas estes aspectos visa mensurar o desempenho relativo apenas às camadas 1 e 2 da rede. Os principais resultados de simulações como essas são taxa de transmissão média por célula e taxa de transmissão média por usuário [21]. Para obter estes resultados, podem ser utilizadas simulações semi-estáticas.

Em uma simulação semi-estática, são realizadas diversas rodadas (*drops*) de simulação. Em cada rodada, são alocados usuários na rede, mantendo sua posição fixa até o final da rodada. Dessa forma, o desvanecimento de grande escala não se altera ao longo de uma rodada. Entretanto, pode-se levar em conta a velocidade do terminal móvel como um parâmetro para a geração de desvanecimento de pequena escala, que varia ao longo da rodada. Cada rodada constitui na transmissão de diversos quadros de rádio e após cada rodada, geram-se novos usuários e em

novas posições. Para a obtenção de resultados concisos, faz-se uma estatística dos indicadores de desempenho obtidos ao longo de várias rodadas, utilizando estratégia de Monte-Carlo [1].

Para análise de protocolos, uma modelagem mais detalhada da rede celular se faz necessária, juntamente com um maior tempo de simulação. Esta análise de protocolo inclui algoritmos de *handover*, estabelecimento e término de chamadas/conexões, entre outros. Para avaliá-los, simulações semi-estáticas não são suficientes e a realização de simulações dinâmicas são mais apropriadas. As simulações dinâmicas abordam, entre outros, os seguintes aspectos:

- Mobilidade do usuário (modelagem de mobilidade de acordo com perfil de usuário, localização geográfica);
- Desvanecimento de larga-escala;
- Modelos de tráfego sofisticados, que incluem processos de nascimento e morte;
- *Handover*;
- Estabelecimento e término de chamadas/conexões.

## 5.2 DESCRIÇÃO DO SIMULADOR

O simulador desenvolvido neste trabalho é sistêmico, semi-estático, focado em enlace direto e baseado na tecnologia 3G LTE.

Adicionalmente, o simulador é orientado no tempo. Nos simuladores orientados no tempo, define-se uma unidade básica de tempo, geralmente baseado na estrutura de quadro da tecnologia em análise. Um gerenciador temporal é encarregado de atualizar o tempo na simulação (diferente do tempo de simulação, que depende, por exemplo, do computador utilizado para executar o simulador), incrementando-o de unidade a unidade.

Existem ainda os simuladores orientados a evento, cujas ações na rede são agendadas em um escalonador com um instante de execução. Assim, o tempo na simulação baseia-se no último

evento executado. A grande vantagem da orientação a evento é a flexibilidade no incremento do tempo na simulação.

Para o simulador em análise, definiu-se como unidade básica de tempo a duração de um subquadro da camada física da tecnologia 3G LTE, ou seja, 1 ms. Assim, no laço da Figura 5.1, a iteração é realizada para cada subquadro transmitido.

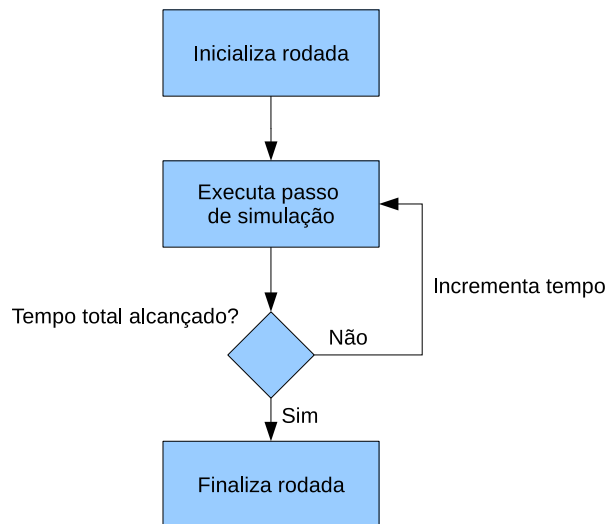


Figura 5.1: Rodada de simulação

Por fim, o *software* foi inteiramente desenvolvido em linguagem C++, devido à rapidez de execução e caráter orientado a objeto. Todos os resultados apresentados neste trabalho foram obtidos a partir da compilação do código pelo gcc 4.1.2 [22] e executados em sistema operacional Linux, distribuição Fedora 8 [23].

Resumindo, o simulador é:

- Sistêmico;
- Orientado no tempo;
- Semi-estático;
- Implementado de acordo com as especificações do 3G LTE;
- Focado em enlace direto;
- Desenvolvido em linguagem orientado a objeto, C++.



O funcionamento do simulador baseia-se no laço ilustrado na Figura 5.2. De maneira resumida, o *software* realiza uma campanha de simulações, incrementando o número de usuários em cada simulação de acordo com parâmetros de entrada. Para cada simulação da campanha, são realizadas diversas rodadas. Em cada rodada, é simulada a transmissão de diversos quadros. Portanto, define-se inicialmente:

- Números inicial, final e incremental de usuários;
- Número de rodadas por simulação;
- Número de quadros transmitidos por rodada.

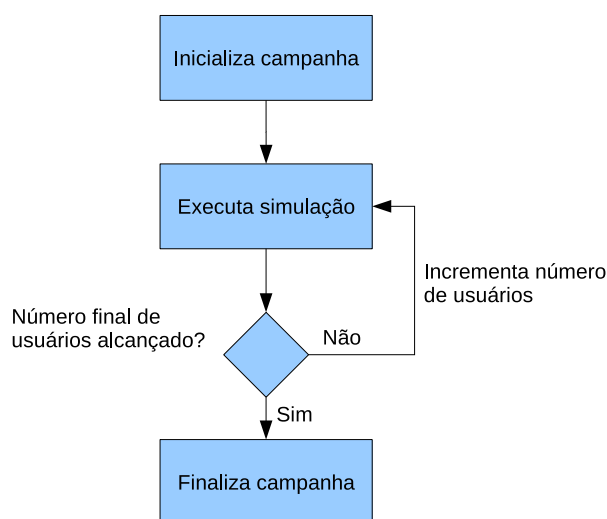


Figura 5.2: Campanha de simulação

O simulador divide-se em subsistemas, de acordo com a funcionalidade e escopo de cada um. Além disso, a modularidade proporcionada pela divisão em subsistemas facilita o entendimento posterior de futuros desenvolvedores do código e o desenvolvimento de novas funcionalidades. Os principais subsistemas são ilustrados na Figura 5.3

A seguir encontra-se uma descrição de cada subsistema. Não será detalhado o código de implementação, mas sim o funcionamento de cada um.



Figura 5.3: Subsistemas do simulador

### 5.2.1 SUBSISTEMA DE FUNCIONALIDADES BÁSICAS

O subsistema de funcionalidades básicas contém os módulos responsáveis por funções auxiliares no desenvolvimento do programa. Entre estas, incluem funções matemáticas, estatísticas e operações com vetores. Dentro deste subsistema também se incluem as classes relativas à posição física do usuário.

### 5.2.2 SUBSISTEMA DE GRID

O *grid* de simulação é composto por 19 células hexagonais, dispostas conforme a Figura 5.4. Cada célula é dividida em 3 setores, conforme ilustrado na Figura 5.5. O subsistema de *grid* também é responsável por especificar as posições dos usuários e das estações rádio base.

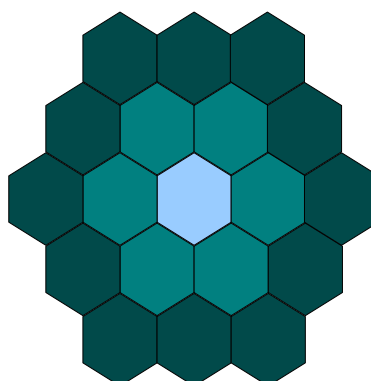


Figura 5.4: *Grid* de simulação

As estações rádio base são posicionadas no centro de cada célula, enquanto os usuários são

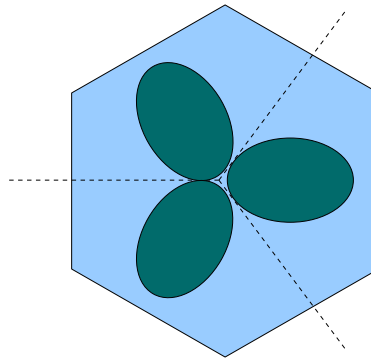


Figura 5.5: Célula com três setores

posicionados aleatoriamente no interior do *grid*. A alocação de usuários no *grid* segue uma distribuição uniforme. Portanto, a probabilidade do usuário ser posicionado em qualquer ponto é igual para todo o *grid*.

### 5.2.3 SUBSISTEMA DE ENLACE

O subsistema de enlace é um dos mais importantes do simulador e um dos que mais consome recursos (memória e tempo) de simulação. Este subsistema é responsável por estabelecer o enlace entre cada usuário e uma estação rádio base. O cálculo do enlace é feito com base nos seguintes procedimentos:

1. Para cada usuário, é calculado a perda de propagação entre cada estação rádio base. A perda segue a forma:

$$L_{dB} = -G_{TX} - G_{RX} + PL + S, \quad (5.1)$$

onde  $G_{TX}$  e  $G_{RX}$  são os ganhos das antenas de transmissão e recepção, respectivamente,  $PL$  é a perda de percurso e  $S$  é o sombreamento.

2. A estação rádio base que oferecer menor perda para o usuário será escolhida para servi-lo durante toda a rodada de simulação.

Adicionalmente, o subsistema de enlace é responsável pelo cálculo da razão entre potência do sinal recebido e soma das potências de ruído e interferência (SINR - *Signal to Interference*

*plus Noise Ratio*). A SINR é calculada entre cada terminal móvel e estação rádio base, para cada frequência da subportadora, antena e instante de tempo. No cálculo de SINR, assume-se que os interferentes são descorrelatados, apresentando a forma:

$$\gamma_k = \frac{P_k}{N + \sum_{i=0, i \neq k}^{N-1} P_i}, \quad (5.2)$$

em que  $\gamma_k$  é a SINR calculada para o usuário  $k$ ,  $P_k$  é a potência do sinal recebido (incluindo ganho de canal),  $P_i$  é a potência do interferidor  $i$  (incluindo ganho de canal), e  $N$  é a potência de ruído, dado pela equação

$$N = kT_0BNF \quad (5.3)$$

em que  $k$  é a constante de Boltzman ( $1,38 \times 10^{-23} JK^{-1}$ ),  $T_0$  é a temperatura ambiente, em unidades de Kelvin [K],  $B$  é a largura de banda de cada subportadora e  $NF$  é a figura de ruído do receptor. O cálculo de potência recebida é visto no Capítulo 4 e dado pela Equação 4.15.

## 5.2.4 SUBSISTEMA DE MOBILIDADE

O subsistema de mobilidade foi desenvolvido visando uma futura implementação de modelos de mobilidade. Entretanto, devido à natureza semi-estática do simulador desenvolvido neste trabalho, apenas algumas interfaces foram desenvolvidas neste subsistema.

## 5.2.5 SUBSISTEMA DE PARÂMETROS

O subsistema de parâmetros é responsável pela leitura dos parâmetros de simulação a partir de arquivos de parâmetros. Além disso, este subsistema provê uma interface acessível aos parâmetros. Os seguintes parâmetros foram definidos no subsistema:

- Parâmetros de antena:

Ângulo de 3 dB;

Ganho mínimo em dB;

- Parâmetros de canal:
  - Média de sombreamento;
  - Desvio padrão do sombreamento;
  - Velocidade do terminal móvel;
  - Perfil de canal;
  
- Parâmetros de grid:
  - Distância entre sítios;
  - Distância mínima entre terminal móvel e estação rádio base;
  
- Parâmetros de adaptação 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 (PRB);
  - Número de *slots* por subquadro;
  - Duração de tempo de um *slot*;
  - 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 usuários no subquadro (se permite alocação de usuários diferentes na mesma frequência ou não);

- Parâmetros de simulação:

Número de transmissões por rodada;

Número de estações rádio base;

Temperatura ambiente;

Número de rodadas por simulação;

Número inicial de usuários;

Número final de usuários;

Número incremental de usuários;

- Parâmetros de sistema:

Largura de banda total do sistema;

Frequência central de operação;

Largura de banda de cada subportadora;

Potência total do transmissor;

Número de antenas de transmissão;

- Parâmetros do terminal móvel:

Figura de ruído do receptor;

Atraso no envio do indicador de qualidade do canal (CQI);

Período de atualização do CQI;

Número de *bits* a ser utilizado na quantização do CQI;

Valor mínimo de SINR considerados no cálculo de CQI;

Valor máximo de SINR considerados no cálculo de CQI;

Desvio padrão da variável aleatória utilizada para modelar a imprecisão do CQI;

## 5.2.6 SUBSISTEMA DE CAMADA FÍSICA

Este subsistema modela a estrutura de quadro no simulador. Apesar da estrutura de quadro utilizada no simulador ser a proposta para o 3G LTE, os vários parâmetros que o definem, descritos na Seção 5.2.5, podem ser alterados pelo usuário. Para a estrutura de quadro seguindo padrão do LTE, a configuração dos parâmetros é definida da seguinte forma:

- Número de RE por subportadora: 7
- Número de subportadoras por PRB: 12
- Tempo de duração de um slot: 0,5 ms
- Número de slots por subquadro: 2
- Números de subquadros por quadro: 10

A estrutura de quadro pode ser melhor compreendida se utilizarmos uma tabela como referência. Cada célula desta tabela é um recurso no tempo e na frequência (PRB) e será alocada pelo algoritmo de alocação de recursos a um usuário na rede. O número de símbolos OFDM por subportadora em cada *timeslot* é fixo. Entretanto, o número de bits alocado em cada recurso depende do MCS escolhido para o respectivo recurso. O MCS é escolhido pelo subsistema de adaptação de enlace.

Logo, no simulador, cada entrada na tabela (PRB) carrega informações como:

- Número de subportadoras (definido por um parâmetro de entrada);
- Usuário escolhido para o qual o recurso será transmitido;
- Antena de transmissão escolhida para ser utilizada na transmissão do respectivo PRB;
- A frequência de cada subportadora;
- Quantidade de bits alocados no PRB, tantos os bits efetivos como os bits adicionados pela codificação.

## 5.2.7 SUBSISTEMA DE NÓ FÍSICO

O subsistema de nó físico contém a modelagem dos terminais móveis e estações rádio base utilizados no simulador, juntamente com os dispositivos que cada um contém (antenas, transmissores, receptores). Para cada estação rádio base e cada terminal móvel é atribuído um identificador exclusivo.

O terminal móvel é uma entidade que contém um receptor e uma antena. Como o enlace reverso não é avaliado neste trabalho, não contém transmissor. A modelagem de transmissão do CQI do terminal móvel para a estação rádio base é realizada separadamente.

O terminal móvel porta consigo algumas informações relativos ao seu comportamento na rede. São eles:

- Posição no *grid*;
- Número de *bits* recebidos até o presente momento de simulação. Inclui *bits* efetivos e *bits* de codificação;
- Número identificador da estação rádio base ao qual está conectado;
- Valor instantâneo de SINR para cada subportadora;
- Valor de CQI para cada subportadora.

O CQI (*Channel Quality Indicator* - Indicador de qualidade de canal) é uma medida de qualidade do enlace e é transmitida pelo terminal móvel à estação rádio base. Esta informação é utilizada pelo escalonador para calcular as métricas de escalonamento e pela adaptação enlace para escolher o MCS a ser utilizado na transmissão. O terminal móvel informa um valor de CQI para cada subportadora e para cada antena.

A correta transmissão do CQI é determinante para o bom desempenho da rede celular, já que a falta de informações ou informações incorretas pode acarretar no escalonamento de usuários com SINR insuficientes para uma transmissão com sucesso ou na escolha do MCS que não condiz com a SINR instantânea do enlace.



Idealmente, para um escalonamento e escolha de MCS adequados, a estação rádio base deveria conhecer informações a respeito do enlace de maneira instantânea e precisa. Entretanto, o próprio tempo de transmissão torna impossível o conhecimento instantâneo do canal. Assim, várias modelagens de erro são aplicadas ao cálculo de CQI, visando aproximar o cenário de simulação à realidade. De maneira simplificada, o CQI é constituído pelo valor de SINR com erros e atrasos acrescentados.

As modelagens implementadas seguem as propostas apresentadas em [4, 5, 6]:

- Atraso no envio do CQI. O valor do atraso é definido como parâmetro de entrada. Este atraso é definido em unidade de subquadro;
- Imprecisão na medida. As imprecisões das medidas do canal são modeladas como uma variável aleatória log-normal com média zero, que serão somadas ao valor de SINR, em dB. O desvio padrão da variável aleatória é um parâmetro de entrada do simulador;
- Quantização do CQI. Na rede real, o CQI é transmitido em um número limitado de *bits*. Para modelar a quantização, especifica-se um intervalo de valores permitidos de SINR e o número de *bits* utilizados na quantização. Estes valores são parâmetros de entrada do simulador. Qualquer valor de SINR fora deste intervalo é aproximado ao valor mais próximo permitido no intervalo. Divide-se o intervalo em  $2^l$  segmentos, onde  $l$  é o número de *bits* utilizados na quantização. Posteriormente, aproxima-se o valor de SINR pelo segmento mais próximo. Deve-se ter cuidado na escolha do intervalo de SINR de modo que a aproximação de valores fora do intervalo não comprometa o desempenho do CQI;
- Períodos de atualização do CQI. Por padrão, o CQI é transmitido pelo terminal móvel à estação rádio base à cada subquadro, mesmo que com atraso. Entretanto, pode-se escolher um período em que o CQI será transmitido. Desta forma, durante este período, a estação rádio base não recebe informações novas à respeito do enlace;

A antena de recepção do usuário é omnidirecional, ou seja, possui ganho unitário em todas as direções.

Entre os dispositivos de rede, a estação rádio base contém um transmissor e uma antena de transmissão. Para o transmissor, especifica-se a potência total de transmissão como parâmetro de entrada. É importante destacar que a potência total de transmissão é dividida igualmente para todas as subportadoras alocadas para as estações rádio base. Assim, não é realizado controle de potência no simulador.

Cada estação rádio base porta consigo informações como:

- Tipo de algoritmo de alocação de recurso utilizado;
- Número identificador de todos usuários a ela conectados. Apenas estes usuários participam do processo de alocação;
- Camada física relativo à célula na qual está inserida.

A antena de transmissão da estação rádio base possui diagrama de radiação especificada em [13], documento este que especifica um cenário simulação recomendado para o E-UTRA (*Evolved Universal Terrestrial Radio Access - Acesso de rádio evoluído universal e terrestre*). O diagrama segue a fórmula

$$A(\theta) = -\min \left[ 12 \left( \frac{\theta}{\theta_{3dB}} \right)^2, A_m \right] \quad (5.4)$$

em que  $\theta_{3dB} = 70^\circ$  e  $A_m = 20dB$ . O diagrama de radiação é ilustrado na Figura 5.6.

## 5.2.8 SUBSISTEMA DE CANAL DE RÁDIO

O subsistema de canal de rádio é responsável pela geração e armazenamento de canal no simulador. Para cada usuário, é gerado um canal entre cada estação rádio base e para cada antena de transmissão. A geração de canal segue os procedimentos descritos no Capítulo 4. O subsistema contém os módulos responsáveis pela geração de desvanecimento de larga escala e desvanecimento de pequena escala. O desvanecimento de pequena escala inclui a geração de um percurso variante no tempo, seguido pelas geração de multipercursos e geração do canal seletivo em frequência e variante no tempo.

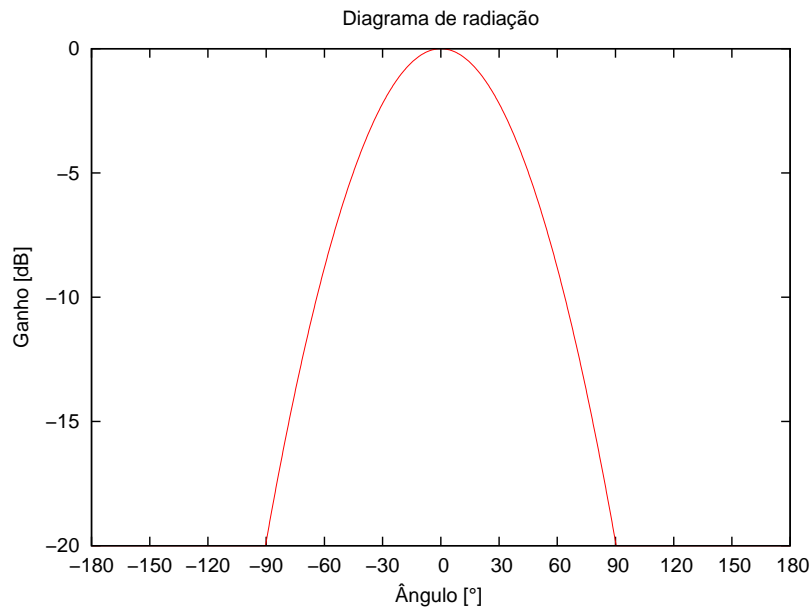


Figura 5.6: Diagrama de radiação de antena utilizada pelas estações rádio base

O desvanecimento de larga escala é gerado no início de cada rodada e é constante ao longo da mesma. O desvanecimento de pequena escala pode ser gerado no início da campanha de simulação ou carregado por meio de um arquivo de canal e corresponde a uma extensa matriz, onde as linhas representam cada instante de tempo e as colunas representam uma frequência diferente. Para cada usuário, antena de transmissão e estação rádio base, é gerado um índice aleatório no domínio do tempo. À medida que o tempo na simulação transcorre, o índice é incrementado. Quando a última linha é alcançada, o índice retorna à primeira linha da matriz. Nas simulações realizadas neste trabalho, utilizou-se uma matriz de 32.768 linhas (amostras no domínio do tempo) e 1.024 colunas (amostras no domínio da frequência).

A matriz de desvanecimento de pequena escala pode ser armazenada em um arquivo de canal. Assim, não é necessária a geração deste tipo de desvanecimento toda vez que for executar uma campanha de simulação. Uma vez gerada e armazenada em um arquivo, a matriz pode ser carregada em simulações posteriores.

### 5.2.9 SUBSISTEMA DE RESULTADOS

O subsistema de resultados é responsável pela coleta de todas as estatísticas utilizadas na geração de resultados no simulador. Apesar dos usuários poderem ser alocados em qualquer

posição do grid, os resultados coletados apenas são relativos apenas aos usuários localizados na célula central. Isso ocorre porque os usuários localizados nas células das bordas experimentam efeitos de interferência reduzidos se comparados aos usuários localizados na célula central, que sofrem interferência das duas camadas de interferência e oriundas de todas as direções. Deste modo, a exclusão dos usuários localizados nas células das bordas, que sofrem pouca interferência, visa não comprometer os resultados de simulação.

Em uma simulação padrão, o simulador gera dois arquivos de resultados. Um arquivo contém os resultados discriminadas por rodada de simulação. Assim, é possível observar o comportamento da rede celular em cada rodada. O outro arquivo contém estatísticas discriminadas por simulação (o usuário do simulador define a quantidade de simulações contidas na campanha de simulação), além do tempo total de simulação. As estatísticas de cada simulação são obtidas tomando-se uma média das estatísticas de cada rodada contida na respectiva simulação.

Atualmente, o simulador gera os seguintes resultados:

- Taxa de transmissão bruta média por usuário:

A taxa de transmissão bruta média por usuário é obtida somando-se a quantidade de *bits* transmitidos na célula central, incluindo os *bits* de codificação, e dividindo o resultado pelo tempo total de simulação e pelo número de usuários localizados na célula central;

- Taxa de transmissão efetiva média por usuário (subtraídos os bits de codificação):

A taxa de transmissão efetiva média por usuário é obtida somando-se a quantidade de *bits* transmitidos na célula central, excluindo os *bits* de codificação, e dividindo o resultado pelo tempo total de simulação e pelo número de usuários localizados na célula central;

- Taxa de transmissão bruta média por setor:

A taxa de transmissão bruta média por setor é obtida somando-se a quantidade de *bits* transmitidos na célula central, incluindo os *bits* de codificação, e dividindo o resultado pelo tempo total de simulação e pelo número de setores na célula central;

- Taxa de transmissão efetiva média por setor:

A taxa de transmissão efetiva média por setor é obtida somando-se a quantidade de *bits* transmitidos na célula central, excluindo os *bits* de codificação, e dividindo o resultado pelo tempo total de simulação e pelo número de setores na célula central;

- Porcentagem de utilização de todos os esquemas de modulação e codificação permitidas na simulação:

A porcentagem de utilização dos esquemas de modulação e codificação é obtida dividindo-se a quantidade de vezes que cada MCS foi utilizado pelo número total de PRB transmitidos na célula central durante a simulação;

- Porcentagem de transmissões com sucesso:

A porcentagem de transmissões com sucesso é obtida dividindo-se a quantidade de PRB transmitidos com sucesso pelo número total de PRB transmitidos na célula central durante a simulação. Um PRB é transmitido com sucesso se a taxa de erro ocorrida durante a transmissão do respectivo bloco foi menor que o valor máximo permitido para simulação;

- Porcentagem de transmissões com falha:

A porcentagem de de transmissões com falha é obtida dividindo-se a quantidade de PRB transmitidos com falha pelo número total de PRB transmitidos na célula central durante a simulação. Um PRB é transmitido com falha se a taxa de erro ocorrida durante a transmissão do respectivo bloco foi maior que o valor máximo permitido para simulação.

#### **5.2.10 SUBSISTEMA DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS DE RÁDIO**

O subsistema de gerenciamento de recursos de rádio contém as funcionalidades relacionadas à alocação de recursos aos usuários, constituindo o cerne do simulador. Para facilitar o desenvolvimento, o subsistema foi dividido nos seguintes módulos:

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

Para a explicação do módulo de adaptação de enlace, é apresentado a seguir o conceito de interface enlace-sistema.

#### 5.2.10.1 INTERFACE ENLACE-SISTEMA

Conforme explicado no início do capítulo, as simulações de enlace fornecem curvas das condições do enlace (em termos de SINR, C/I ou Eb/No) para uma determinada taxa de erro (BER, BLER, FER, entre outros).

É importante que a simulação de enlace abranja as mais variadas condições possíveis de canal, incluindo transmissões de quadros em todas as frequências de operação do sistema, de modo a fornecer um resultado médio que seja efetivamente representativo do desempenho de enlace para um dado sistema celular.

Nos sistemas de comunicação móvel celular em que a quantidade de portadoras alocadas instantaneamente a determinado usuário é unitário, como o GSM, o mapeamento de condição do enlace para taxa de erro é direto, sendo feito por meio da consulta à curva de enlace.

Entretanto, em sistemas como o 3G LTE ou WiMAX, que utilizam o OFDMA como tecnologia de acesso de rádio, várias subportadoras podem ser alocadas ao mesmo usuário em determinado instante de tempo. Essas subportadoras podem, e provavelmente irão, devido à seletividade em frequência, experimentar condições de enlace diferentes umas das outras.

É impraticável simular enlaces para cada combinação possível de valores de SINR das subportadoras e obter uma curva para cada combinação, devido ao extenso número de combinações, de subportadoras e de curvas geradas. Resultados encontrados na literatura [24] mostram que utilizar valor médio de SINR das subportadoras e, a partir desta, mapeá-la para uma taxa de erro que seja representativa para todas as subportadoras fornecem resultados incorretos a respeito do enlace.

Ao invés de obter uma SINR média, propõe-se métodos de transformação de um conjunto de valores de SINR para uma SINR efetiva [24]. Este SINR efetiva é utilizada posteriormente no mapeamento para uma taxa de erro. No mapeamento de SINR efetiva para taxa de erro, utilizam-se curvas de enlace obtidas utilizando canal AWGN (*All White Gaussian Noise* - Ruído gaussiano

branco).

Dessa forma, incorpora-se ao simulador sistêmico apenas as curvas de enlace relativos à utilização de cada MCS para um canal AWGN.

Os métodos de mapeamento de SINR para SINR efetiva são diversos [24]. Entre eles, incluem o método da capacidade, informação mútua e exponencial. Todos estes métodos utilizam um fator de ajuste  $\beta$ , que representa o ajuste dos resultados de enlace utilizando um canal com desvanecimento de pequena escala para a curva de enlace utilizando apenas canal AWGN. Para todos os métodos, o cálculo de  $\beta$  não é analítico e, em geral, é feito por meio de iterações computacionais.

De acordo com resultados publicados em [24], o método de mapeamento exponencial forneceu mapeamentos satisfatórios para os cenários simulados e é o método escolhido de mapeamento do simulador desenvolvido neste trabalho. Além disso, tem sido um método frequentemente abordado na literatura [4, 5, 25, 26, 27, 28].

O método de mapeamento exponencial, também chamado de EESM (*Exponential Effective SNR Mapping* - mapeamento exponencial de SINR efetivo) calcula o SINR efetiva da forma:

$$\gamma_{eff} = -\beta \ln \left( \frac{1}{N_p} \sum_{k=1}^{N_p} e^{\frac{-\gamma_k}{\beta}} \right) \quad (5.5)$$

em que  $\beta$  é o fator de ajuste,  $\gamma_k$  é o valor de SINR para cada subportadora e  $N_p$  é o número de subportadoras.

#### 5.2.10.2 MÓDULO DE ADAPTAÇÃO DE ENLACE

O módulo de adaptação de enlace é responsável pela escolha de um MCS adequado de acordo com os valores de CQI das subportadoras alocadas a um determinado usuário. Além disso, o módulo é responsável por mapear a SINR de um enlace do usuário para uma taxa de erro. Isto é feito por meio da interface enlace-sistema [21].

As curvas de enlace incorporadas ao simulador foram obtidas em [21] e estão ilustrados nas Figuras 5.7 e 5.8. Devido às limitações de utilização das curvas apresentadas no documento,

os resultados de enlace são utilizadas no momento apenas para estimar o sucesso ou falha na transmissão de um determinado bloco, de acordo com o MCS escolhido. Assim, define-se, a partir das curvas, um valor de SINR efetiva limiar para cada MCS. Se o valor de SINR efetiva calculada durante a simulação for maior que este valor limiar, a transmissão é feita com sucesso. Caso contrário, a transmissão é falha.

Foram necessárias algumas aproximações para a obtenção dos valores de SINR limiars. Uma delas é a extrapolação do valor de SINR efetivo para uma taxa de erro de  $10^{-6}$ , taxa considerada aceitável para uma transmissão feita com sucesso. Para isso, foi feita uma aproximação linear. Além disso, em [21] não é apresentada a curva de desempenho relativo à modulação 64QAM e codificação turbo, com taxa de 1/3. Entretanto, é crucial para a verificação do desempenho dos algoritmos de alocação de recursos que tal esquema de modulação e codificação esteja disponível na simulação sistêmica pois, em muitos casos, os algoritmos visam alocar recursos aos usuários com melhores condições de enlace, de forma a permitir utilização de um MCS pouco robusto mas que proporcione uma alta eficiência espectral.

Por isso, o valor de SINR efetiva para a modulação 64QAM e codificação turbo foi estimada a partir do valor para a modulação 16 QAM e com o auxílio da curva de enlace apresentada em [10], ilustrado na Figura 5.9. Pode ser observado que, para uma mesma taxa de erro, a diferença entre os valores de SINR para modulações 16QAM e 64QAM é sempre maior que 8 dB. Por isso, o valor de SINR limiar para 64QAM foi aproximado como o valor limiar de 16QAM acrescentados de 8 dB, utilizando o mesmo fator de ajuste.

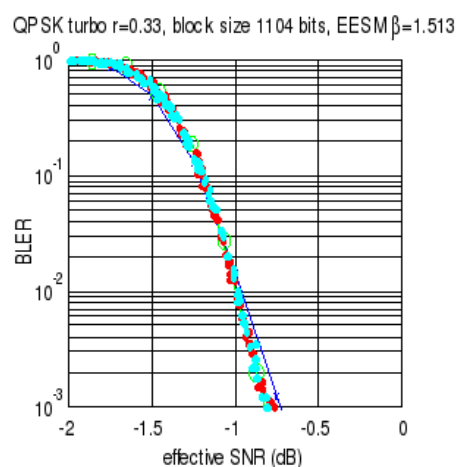


Figura 5.7: Curva de enlace para QPSK



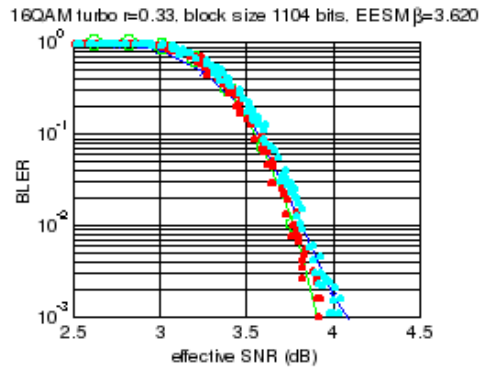


Figura 5.8: Curva de enlace para 16QAM

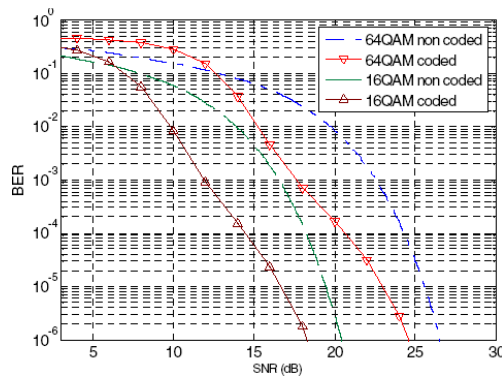


Figura 5.9: Curva de enlace para 64QAM

É importante destacar que a escolha do MCS utilizado na transmissão de determinado bloco é feito com base no indicador de qualidade de canal informado pelo terminal móvel. Entretanto, devido a imperfeições na transmissão do CQI, é possível que o MCS escolhido não seja condizente com a condição real e instantânea do enlace. Por isso, a interface enlace-sistema é consultada novamente na transmissão do bloco para verificar se a mesma foi feita com sucesso ou não. Uma transmissão feita com sucesso significa que, para a SINR efetiva do enlace e o MCS escolhido, a taxa de erro obtida a partir da curva de enlace não foi superior à taxa de erro máxima permitida.

### 5.2.10.3 MÓDULO DE PLANEJAMENTO DE FREQUÊNCIA

O módulo de planejamento de frequência, como o próprio nome diz, é responsável pelo planejamento de frequência da rede. Isso é feito informando a todas as estações rádio base as frequências em que elas poderão operar. Em todos os resultados gerados neste trabalho, foi utilizado fator de reuso de 1/1, ou seja, apenas 1 (denominador) conjunto de frequências é reutilizado a cada 1

(numerador) célula . Isso significa que cada setor também utilizará a banda toda do sistema. Apenas para exemplificar, um cenário em que cada setor utilizasse apenas um terço da banda total seria de  $1/3$ , pois haveria 3 (denominador) conjuntos de frequência que se repetiriam a cada 1 (numerador) célula [29].

#### 5.2.10.4 MÓDULO DE ESCALONAMENTO

O módulo de escalonamento contém os algoritmos utilizados pelas estações rádio base para a alocação de recursos aos usuários.

Conforme explicado no Capítulo 3, a alocação de recursos é um processo de escolha de usuário, dentre todos aqueles conectados a determinada estação rádio base, para o qual determinado recurso será transmitido. Este recurso corresponde a um PRB dentro do subquadro a ser transmitido no presente momento de simulação. O processo de seleção de usuário ocorre para todos os PRB contidos no subquadro. Entretanto, nas simulações efetuadas neste trabalho, todos os PRB de uma determinada faixa de frequência foram alocadas ao mesmo usuário no período do subquadro, que é de 1 ms. A escolha do usuário é feita com base em uma métrica. Para cada algoritmo, o cálculo da métrica é diferente.

O processo de escalonamento é constituído por três fases e ocorre a cada transmissão de subquadro. Em ordem de acontecimento, são eles:

1. Escalonamento no domínio temporal;
2. Escalonamento no domínio da frequência;
3. Escalonamento entre as antenas de transmissão.

Na primeira fase, é escolhido o subconjunto de usuários, dentre aqueles conectados a determinada ERB, que participarão do processo de escalonamento no domínio da frequência. É definido como parâmetro de entrada o número máximo de usuários alocados simultaneamente por estação rádio base. Entretanto, não é especificado um número mínimo de recursos a serem alocados para um usuário. Assim, é possível que, ainda que com pequena probabilidade, um usuário seja escolhido na primeira fase, entretanto não tenha nenhum recurso alocado para o mesmo.

Na segunda fase, distribuem-se os recursos do subquadro para os usuários escolhidos na primeira fase. A distribuição é feita para cada antena de transmissão e utiliza a métrica do algoritmo como base para a alocação do recurso. Assim, para cada PRB, é calculada a métrica para todos os usuários. O PRB é alocado para o usuário que apresentar a melhor métrica.

Por fim, na terceira fase, escolhe-se uma antena de transmissão para cada recurso físico. Apesar de os mesmos recursos tempo-freqüência terem sido distribuídos em todas as antenas de transmissão, apenas uma antena transmitirá em determinado instante de tempo e freqüência. Assim, para cada PRB do subquadro, seleciona-se a antena cujo usuário escalonado na fase anterior apresenta a maior métrica de alocação.

Para ilustrar o processo de alocação, as três fases são mostradas nas Figuras 5.10, 5.11 e 5.12.

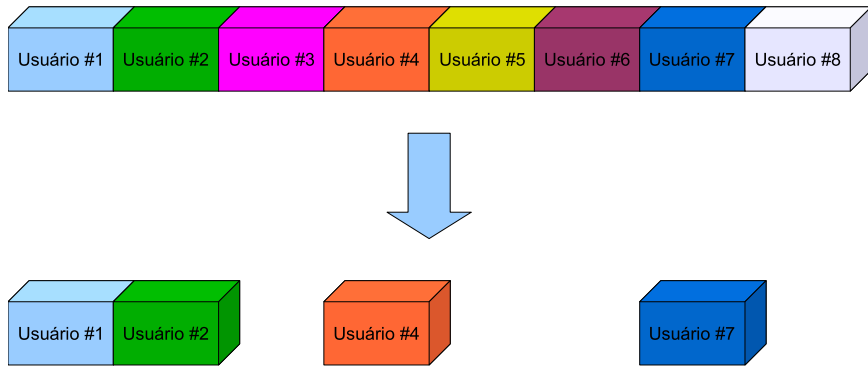


Figura 5.10: Escalonamento no domínio temporal

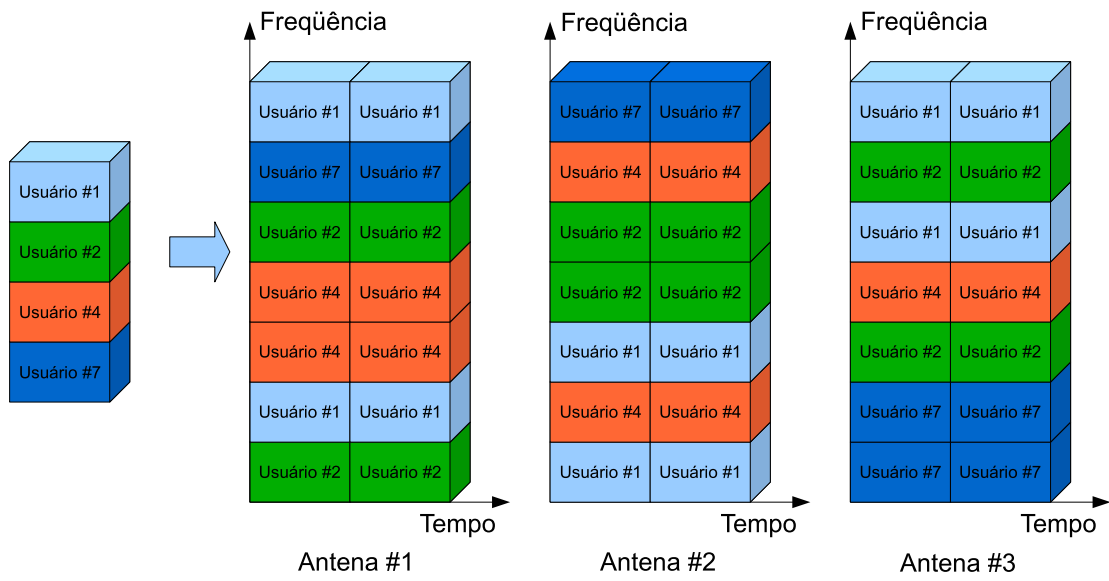


Figura 5.11: Escalonamento no domínio da frequência

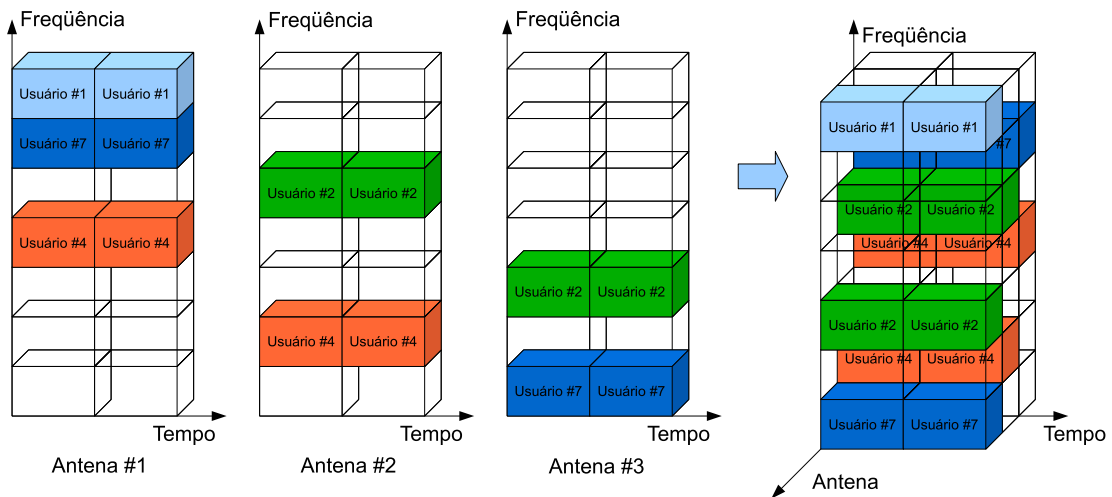


Figura 5.12: Escalonamento entre as antenas de transmissão

Para este trabalho foram desenvolvidos três algoritmos de alocação:

1. Algoritmo de maximização da taxa de transmissão;
2. Algoritmo aleatório;
3. Algoritmo *proportional fair*.

No algoritmo de maximização da taxa de transmissão, a métrica para alocação é a taxa de transmissão calculado pela fórmula de capacidade de Shannon. Na primeira fase, utiliza-se o valor médio do CQI ao longo de todas as frequências para o cálculo da métrica. Na segunda fase, para cada PRB e cada antena, utiliza-se o valor médio do CQI ao longo das frequências do respectivo PRB para o cálculo da métrica. Por fim, na terceira fase, para cada PRB, escolhe-se a antena cujo usuário escolhido na fase anterior apresenta maior métrica.

No algoritmo *proportional fair*, a métrica é a razão entre taxa de transmissão demandada pelo usuário e a taxa média de transmissão do usuário ao longo da simulação. Dessa forma, priorizam-se, além de usuários com melhores condições de enlace, aqueles que apresentam uma baixa taxa de transmissão até o presente momento de simulação. Assim como no algoritmo de maximização da taxa de transmissão, na primeira fase utiliza-se o valor médio do CQI ao longo de todas as frequências da rede para o cálculo da métrica. Na segunda fase, utiliza-se o valor médio do CQI ao longo apenas das frequências do respectivo PRB. Na terceira fase, para cada PRB, escolhe-se a antena cujo usuário escolhido na fase anterior apresenta maior métrica.

No algoritmo aleatório, não há métrica para a alocação dos recursos. Na primeira fase, o subconjunto de usuários é escolhido aleatoriamente. De maneira semelhante, nas segunda fase, os PRB são alocados aleatoriamente para os usuários. Entretanto, no escalonamento entre as antenas, é escolhida a combinação antena e usuário que proporcione a maior taxa de transmissão.

### **5.2.11 SUBSISTEMA DE SIMULAÇÃO**

O subsistema de simulação é responsável pela realização da campanha de simulação. Nele, estão contidos os laços relativos à execução de uma rodada, de uma simulação e de uma campanha. A estrutura de uma campanha de simulação é ilustrada na Figura 5.13.

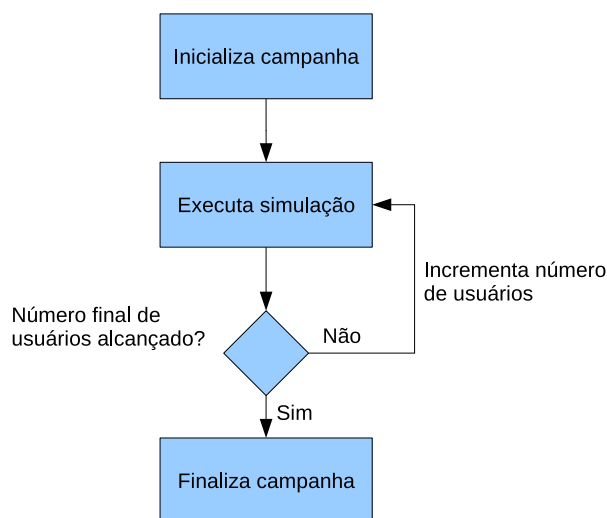


Figura 5.13: Campanha de simulação

Na início campanha de simulação, todos os subsistemas são inicializados. Dá-se início à simulação com o número inicial de usuários. Ao final de cada simulação, incrementa-se o número de usuários e uma nova simulação é feita. Este processo é repetido até que o número final de usuários seja alcançado.

A estrutura de uma simulação é ilustrada na Figura 5.14. No início de cada rodada, os subsistemas são reinicializados, de forma que cada rodada configura um cenário independente. Neste bloco, ocorrem as seguintes ações:

1. Usuários são criados em posições aleatórias dentro do grid;
2. Estações rádio base são criadas em posições definidos pelo grid;
3. É gerado o desvanecimento de larga escala para os usuários;
4. São gerados os índices de matriz de desvanecimento de pequena escala para cada usuário, ERB e antena;
5. É estabelecido o enlace para cada usuário e uma ERB;
6. As frequências de operação são especificadas para cada estação rádio base, de acordo com o planejamento de frequência.

Ao final da rodada, os subsistemas são finalizados. Neste bloco, a maioria das ações dizem

respeito ao funcionamento do software e não de ações na rede. Memórias alocadas dinamicamente são liberadas, vetores e matrizes são zerados, entre outros.

Por fim, a execução de uma rodada também é ilustrada na Figura 5.14. Durante uma rodada, ocorrem as seguintes ações de rede, para cada transmissão de subquadro:

1. Cálculo de SINR (inclui cálculo de interferência);
2. Alocação de recursos;
3. Transmissão dos recursos;
4. Atualização do tempo de simulação dentro da rodada;

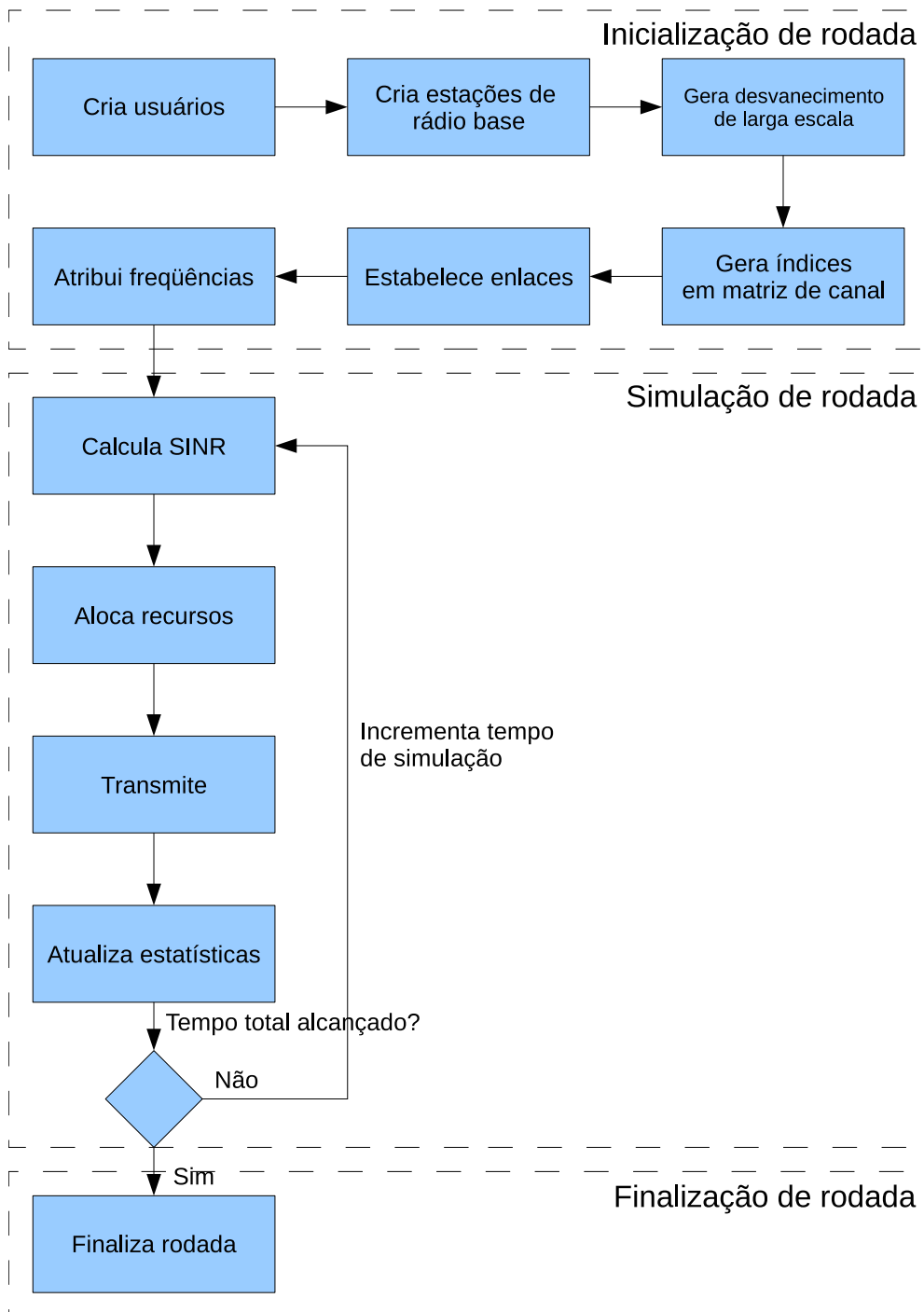


Figura 5.14: Estrutura de simulação



### **5.2.12 SUBSISTEMA DE GERENCIADOR TEMPORAL**

Este subsistema é responsável pelo gerenciamento do tempo dentro da simulação. O tempo é atualizado ao final da transmissão de cada subquadro e zerado no início de cada rodada.

### **5.2.13 SUBSISTEMA DE TRANSMISSÃO**

Este subsistema é responsável pela transmissão dos recursos de todas as estações rádio base. Na transmissão, varrem-se todos os PRB da camada física de cada estação rádio base e transmite-se a quantidade de *bits* contidos no recurso para o usuário escolhido no subsistema de gerenciamento de recursos de rádio, desde que o MCS escolhido para a transmissão não resulte em uma taxa de erro maior que a permitida. Esta verificação é pela interface enlace-sistema, no módulo de adaptação de enlace do subsistema de gerenciamento de recursos de rádio. Caso a taxa de erro seja maior que a permitida, a transmissão de respectivo PRB é perdida.

### **5.2.14 MODELO DE TRÁFEGO UTILIZADO NO SIMULADOR**

O modelo de tráfego utilizado no simulador é comumente utilizado para simulações cujo objetivo é verificar taxas de transmissão por usuário e *throughput* de rede. O modelo baseia-se no *Best Effort Packet Service* [13], que pode ser traduzido como serviço de transmissão de pacotes com esforço máximo. Além disso, considera-se que a pilha de dados pendentes para transmissão é sempre cheia, ou seja, o modelo é *full buffer*.

Neste tipo de tráfego, muito utilizado para modelagem de conexões FTP, o usuário demanda constantemente dados da rede. Dessa forma, todos os recursos tempo-freqüência da rede estão sempre alocados para algum usuário. Entretanto, os usuários não especificam uma taxa de transmissão desejada para a rede. Eles recebem dados a uma taxa máxima que a rede possa oferecer, limitado pela quantidade de recursos disponíveis para alocação.

# 6 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

*Este capítulo apresenta os resultados de simulação, divididos na forma de comparativos. O primeiro comparativo analisa o desempenho de diversos métodos de alocação de recursos. O segundo comparativo analisa o desempenho de rede variando-se o número de antenas de transmissão.*

## 6.1 INTRODUÇÃO

O objetivo das simulações realizadas neste trabalho foi analisar o desempenho de rede quanto à utilização de diferentes algoritmos de alocação de recursos e quanto à utilização de múltiplas antenas na transmissão. Os algoritmos de alocação de recursos analisados foram o de maximização da taxa de transmissão, *proportional fair* e aleatório, conforme descritos no Capítulo 3.

Desta forma, os resultados apresentados neste capítulo estão apresentados sob a forma de comparativos. O primeiro comparativo analisa o desempenho de rede variando-se o algoritmo de alocação de recursos. O segundo comparativo analisa o desempenho de rede para os três algoritmos de alocação e variando-se o número de antenas na transmissão.

Os resultados típicos gerados pelo simulador são descritos no Capítulo 5. Entretanto, para uma análise mais completa, outras estatísticas foram geradas:

- Distribuição acumulada da distância de todos usuários em relação à estação rádio base o qual está conectado;
- Distribuição acumulada da distância apenas dos usuários contemplados com algum recurso em relação à estação rádio base o qual está conectado;

## 6.2 PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Para a geração dos resultados apresentados neste capítulo, diversos parâmetros de entradas foram configurados. Para facilitar o entendimento de cada parâmetro, estes foram divididos em diversos grupos, conforme sua função e escopo. Os principais parâmetros, juntamente com um comentário ou referência sobre cada um, são fornecidos nas Tabelas 6.1 à 6.9.

Tabela 6.1: Parâmetros de antena de transmissão

Parâmetro	Valor	Comentário
Ângulo de 3 dB	70°	Vide [13]
Ganho mínimo	20 dB	Vide [13]

Tabela 6.2: Parâmetros de canal

Parâmetro	Valor	Comentário
Média de somreamento	0 dB	Vide [13]
Desvio padrão de somreamento	8 dB	Vide [13]
Velocidade do terminal móvel	3 km/h	Vide [13]
Intervalo entre amostras no tempo	90 ms	Dado por $\frac{1}{2f_m}$ onde $f_m$ é o desvio doppler máximo
Intervalo entre amostras na frequência	9.765,63 Hz	Espectro de 10 MHz gerado a partir de FFT de 1024 pontos

Tabela 6.3: Parâmetros de *grid*

Parâmetro	Valor	Comentário
Distância entre sítios	500 m	Vide [13]
Distância mínima entre ERB e usuários	35 m	Vide [13]

Tabela 6.4: Parâmetros de adaptação de enlace

Parâmetros	Valor	Comentário
Número de MCS	3	Vide [11] e [12]
MCS 0	QPSK e codificação turbo	Vide [11] e [12]
MCS 1	16QAM e codificação turbo	Vide [11] e [12]
MCS 2	64QAM e codificação turbo	Vide [11] e [12]
Fator de ajuste ( $\beta$ ) para MCS 0	1,513	Vide [21]
Fator de ajuste ( $\beta$ ) para MCS 1	3,620	Vide [21]
Fator de ajuste ( $\beta$ ) para MCS 2	3,620	Vide capítulo 5
Taxa de código	1/3	Vide [12]

Tabela 6.5: Parâmetros de camada física

Parâmetros	Valor	Comentário
Número de elementos de recurso (RE) por subportadora	7	Vide [11]
Número de subportadoras por recurso físico (PRB)	12	Vide [11]
Tempo de duração de um slot	0,5 ms	Vide [11]
Número slots por subquadro	2	Vide [11]

Tabela 6.6: Parâmetros de escalonamento

Parâmetros	Valor	Comentário
Número máximo de usuários alocados por subquadro	6	Vide [5]
Alocar o mesmo usuário nos dois slots do subquadro	Sim	CQI é atualizado apenas a cada subquadro
Algoritmo de alocação	0, 1 ou 2	Vide [6]
0 - Aleatório		
1 - Maximização da taxa de transmissão		
2 - <i>Proportional fair</i>		

Tabela 6.7: Parâmetros de simulação

<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Comentário</b>
Transmissões por rodada	450	Limitação de tempo de simulação
Número de setores	57	Vide [13]
Temperatura ambiente	300 K	Equivalente a 27° C
Rodadas por simulação	10	Limitação de tempo de simulação
Número inicial de usuários na célula central	30	Valores similares aos encontrados em [5]
Número final de usuários na célula central	70	Valores similares aos encontrados em [5]
Número incremental de usuários	5	Vide [4, 6]

Tabela 6.8: Parâmetros sistêmicos

<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Comentário</b>
Largura de banda do sistema	10 MHz	Vide [11]
Frequência central de operação	2 GHz	Vide [13]
Largura de banda de subportadora	15 kHz	[11]
Potência total de transmissão	46 dBm	Vide [13]
Número de antenas de transmissão	1, 2, 3 ou 4	Vide [13]

Tabela 6.9: Parâmetros do terminal móvel

<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Comentário</b>
Figura de ruído	9 dB	Vide [13]
SINR mínimo para quantização	-10 dB	Valor suficiente para perda na transmissão
SINR máximo para quantização	30 dB	Valor suficiente para utilização de MCS 2
Atraso no envio do CQI	2 ms	Vide [4, 5]
Desvio padrão do CQI	1 dB	Vide [4, 5, 6]

## 6.3 COMPARATIVO DE DESEMPENHO DE REDE VARIANDO-SE O ALGORITMO DE ALOCAÇÃO DE RECURSOS

Os valores de taxa de transmissão efetiva média por usuário para cada algoritmo de alocação de recurso podem ser vistos na Figura 6.1.

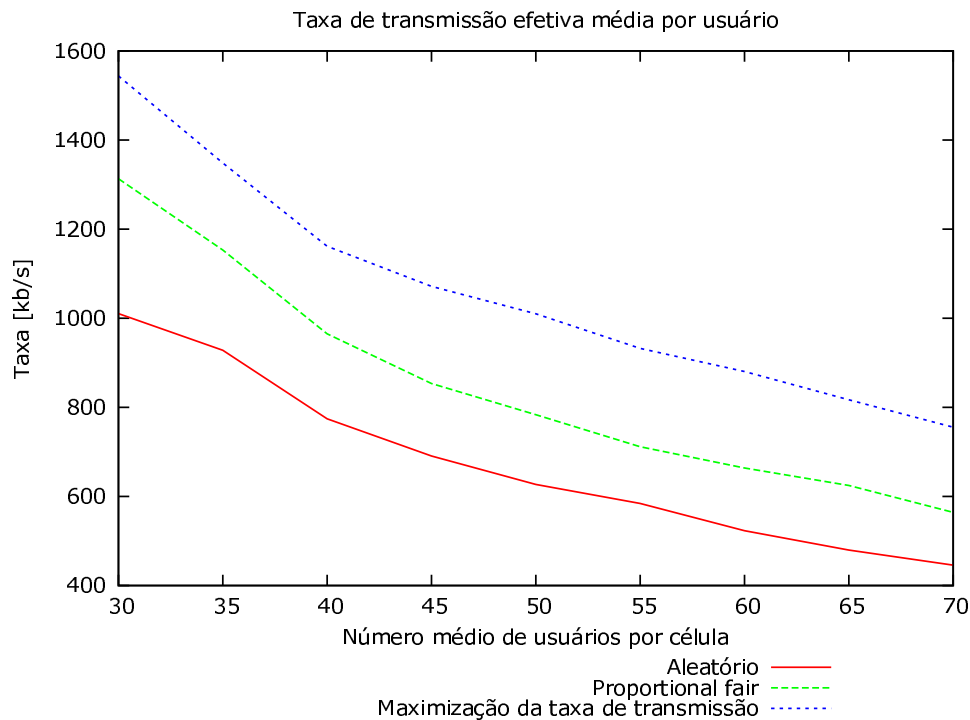


Figura 6.1: Taxa de transmissão efetiva média por usuário

Pode ser observado que o algoritmo de maximização da taxa de transmissão proporciona a maior taxa de transmissão efetiva média por usuário para todas as simulações, seguido pelos algoritmos *proportional fair* e aleatório. Os resultados expressam a métrica de alocação de cada algoritmo. O algoritmo de maximização da taxa de transmissão visa sempre privilegiar o usuário com melhores condições de enlace (melhores indicadores de qualidade do canal). O algoritmo *proportional fair*, apesar de também levar em consideração as condições de enlace dos usuários, é limitado por levar em conta taxas médias de transmissão dos usuários ao longo da simulação. Por sua vez, o algoritmo aleatório não utiliza critério algum para a distribuição dos recursos, logo não explora a qualidade do enlace dos usuários para a alocação dos recursos. Portanto, é de se esperar que o algoritmo de maximização proporcione os melhores resultados em termos de taxa de transmissão média por usuário.

Observa-se ainda pela Figura 6.1 que os valores de taxa de transmissão efetiva média por usuário diminuem à medida que o número de usuários na rede aumenta. Isto ocorre porque, mantida inalterada a quantidade de recursos na rede, o número de PRB disponível para cada usuário diminui à medida que o número destes aumenta, ocasionando a redução nos valores de taxa de transmissão média.

Os valores de taxa de transmissão efetiva média por setor são ilustrados na Figura 6.2 e pode ser observado que estes aumentam à medida que se aumenta o número de usuários na rede, quando utilizado o algoritmo de maximização da taxa de transmissão. Este fato advém da exploração da diversidade multiusuário. Como o algoritmo visa explorar diretamente este tipo de diversidade, há uma tendência de aumento de taxa de transmissão efetiva média com o aumento do número de usuários. O aumento da diversidade multiusuário também pode ser observado nas Figuras 6.4, onde é mostrado que, à medida que aumenta o número de usuários na rede, aumenta a porcentagem de utilização do MCS 2.

Entretanto, o aumento da taxa de transmissão efetiva média por setor é limitado. O limite ocorre quando todos os recursos são transmitidos utilizando MCS 2 e quando não existem perdas nas transmissões. No caso do algoritmo de maximização da taxa de transmissão, pode ser observado pela Figura 6.4 que a porcentagem de utilização de MCS 2, a partir de 60 usuários na rede, é acima de 90% e se mantém aproximadamente estável a partir deste ponto.

Para o algoritmo *proportional fair*, o aumento na taxa de transmissão efetiva média por setor ocorre de forma moderada, se comparado ao aumento obtido pelo algoritmo de maximização da taxa de transmissão. Estes resultados indicam que a exploração da diversidade multiusuário pelo algoritmo *proportional fair* é limitado, pelo fato de a métrica de alocação também favorecer usuários com histórico de baixa taxa de transmissão.

Por fim, quando o algoritmo aleatório é utilizado, o aumento na taxa de transmissão efetiva média por setor não é observado, indicando que o aumento no número de usuários na rede não reflete em um aumento na exploração da diversidade multiusuário por parte do algoritmo. Isto também pode ser verificado na Figura 6.6.

É importante destacar o significado de baixa qualidade de enlace nas Figuras 6.4, 6.5 e 6.6.

Este indicador significa que o enlace encontra-se em condições adversas de forma que nem mesmo a utilização do MCS 0 (mais robusto) seria suficiente para que a transmissão resultasse em uma taxa de erro abaixo do valor máximo permitido. O significado de porcentagem de baixa qualidade de enlace é diferente do significado da porcentagem de falhas na transmissão indicados pela Figura 6.3. Enquanto os resultados das Figuras 6.4, 6.5 e 6.6 indicam a qualidade dos enlaces na simulação, a porcentagem de falhas na transmissão indica a imprecisão de conhecimento da qualidade dos enlaces por parte da estação rádio base no instante de transmissão. Entre outras palavras, refletem as imperfeições da transmissão do CQI dos usuários para a estação rádio base.

A porcentagem de falhas na transmissão depende preponderantemente da modelagem da transmissão do CQI do terminal móvel para a estação rádio base. Como os parâmetros de modelagem não se alteraram nas simulações, a porcentagem de transmissões sem sucesso se mantiveram aproximadamente constantes, como pode ser visto na Figura 6.3



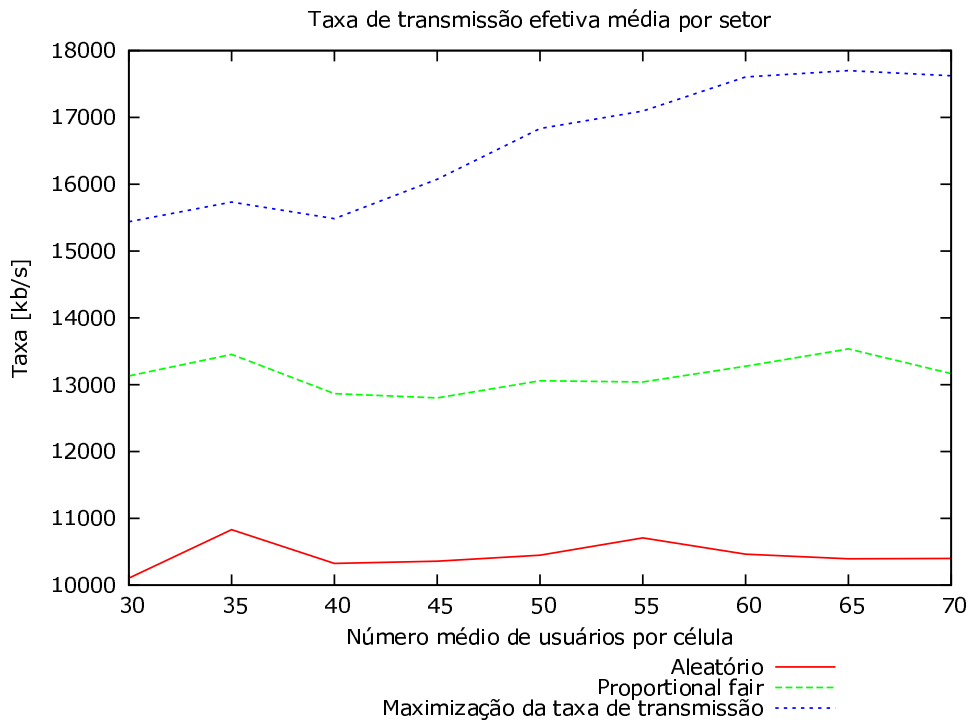


Figura 6.2: Taxa de transmissão efetiva média por setor

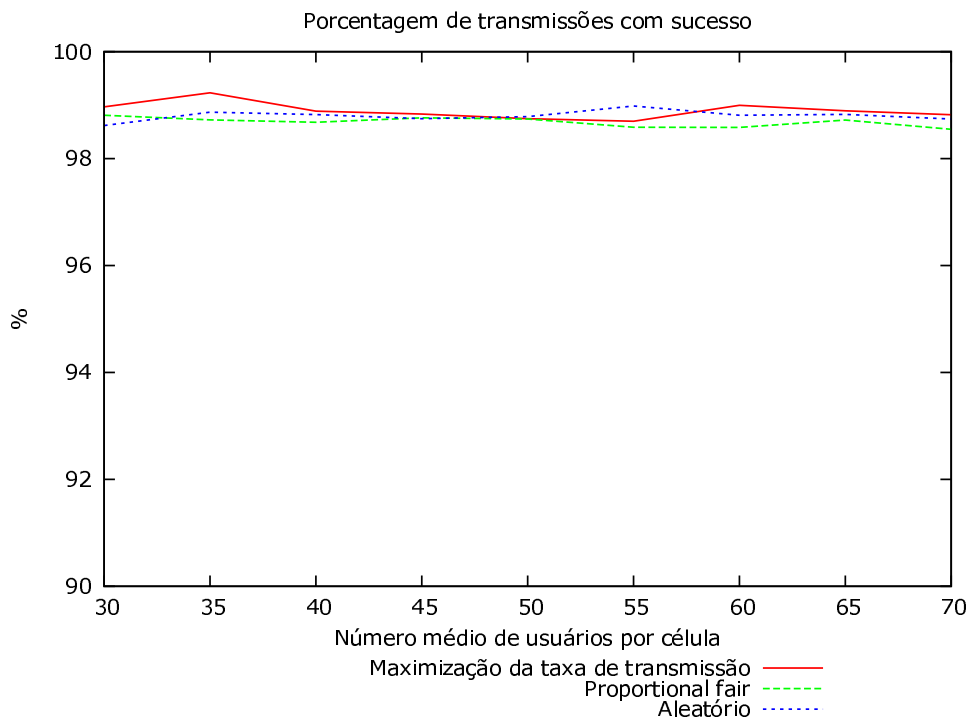


Figura 6.3: Porcentagem de transmissões com sucesso

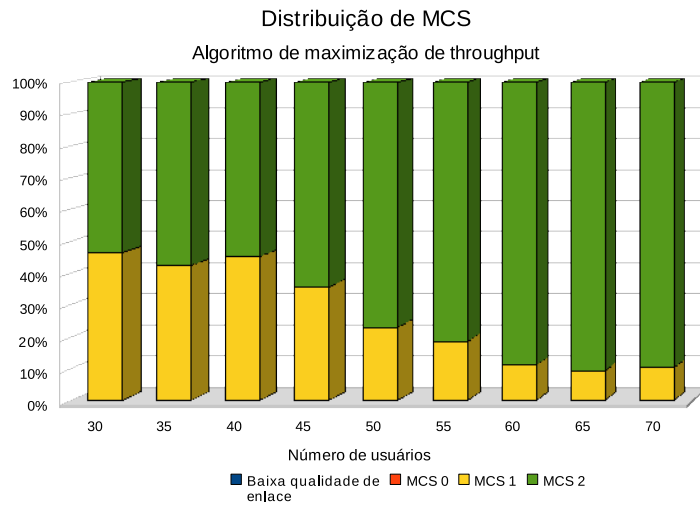


Figura 6.4: Distribuição de MCS para algoritmo de maximização da taxa de transmissão

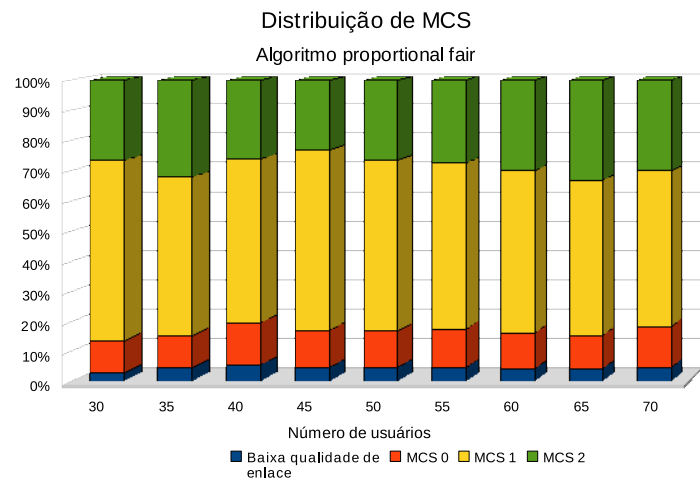


Figura 6.5: Distribuição de MCS para algoritmo *proportional fair*

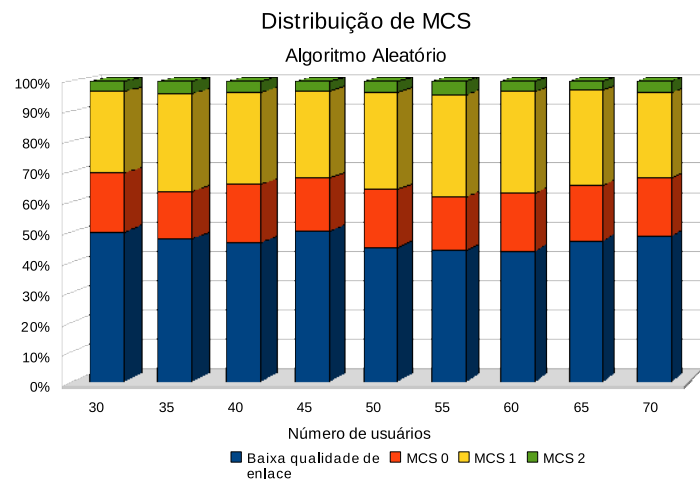


Figura 6.6: Distribuição de MCS para algoritmo aleatório

Analisando os resultados de taxa de transmissão média por usuário e taxa de transmissão média por setor, seria tentador concluir que o método de alocação de recursos visando a maximização da taxa de transmissão é o mais recomendado para utilização em redes celulares. No entanto, os resultados acima não são suficientes para avaliar o desempenho dos métodos de alocação de recursos. A razão para isso é que os resultados acima ilustram apenas o desempenho de rede de forma global, não levando em consideração o desempenho individual de cada usuário.

Para exemplificar a insuficiência dos resultados acima quanto à análise de desempenho dos métodos de alocação, supõe-se uma situação em que haja um usuário localizado próximo à estação rádio base, com excelentes condições de enlace e sem limitações quanto à taxa de transmissão. É possível que, em determinado momento, se utilizado o algoritmo de maximização da taxa de transmissão, todos os recursos da rede sejam alocadas a este usuário. Como este apresenta excelentes condições de enlace, é possível também que todos os recursos sejam transmitidos utilizando o MCS que proporcione maior taxa de transmissão (MCS 2). Neste caso, seriam obtidos valores elevados de taxa de transmissão média por usuário e taxa de transmissão média por setor. Entretanto, a quantidade de usuários insatisfeitos também seria elevada.

Portanto, é preciso levar em consideração não apenas valores de taxas de transmissão média, mas também a forma como os recursos são distribuídos entre os usuários da rede para avaliação do desempenho dos métodos de alocação de recursos. Para avaliar os algoritmos quanto à forma de distribuição de recursos, podem ser utilizadas curvas de probabilidade acumulada da distância do usuários em relação à estação rádio base. Por meio da disposição espacial dos usuários para os quais foram transmitidos algum recurso, é possível saber como os recursos são distribuídos em função da distância para a estação rádio base. A curvatura de distribuição acumulada pode indicar se existe favorecimento de usuários na distribuição de recursos.

Como referência, adota-se a distribuição acumulada da distância de todos os usuários criados nas simulações. Desta forma, em uma situação de distribuição de recursos igualitária, a curva de distribuição acumulada dos usuários apenas para os quais foram transmitidos algum recurso deverá se assemelhar à curva de referência. Em uma situação de favorecimento a usuários próximos à estação rádio base, a curva de distribuição acumulada deverá ser acentuada para cima em relação à curva de referência. Finalmente, em uma situação de favorecimento de usuários loca-

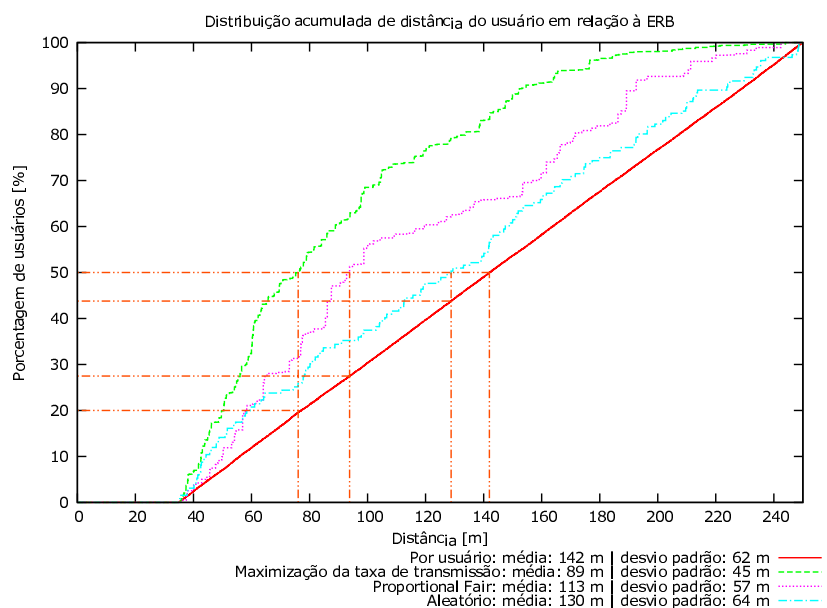


Figura 6.7: Distribuição acumulada da distância dos usuários em relação à estação rádio base

lizados distantes da estação rádio base, a curva de distribuição acumulada deverá ser acentuada para baixo em relação à curva de referência.

Na Figura 6.7, curvas de distribuição acumulada da distância dos usuários em relação à estação rádio base na qual estão conectados são apresentadas. Na curva contínua (vermelha), representa-se todos os usuários criados ao longo das simulações. Como a probabilidade de um usuário ser criado em qualquer posição do grid é uniforme e as distâncias mínimas e máximas da estação rádio base são de 35 m e 250 m, respectivamente (vide Tabela 6.3), é esperado que a função distribuição acumulada seja um segmento de reta que liga os pontos (35, 0) e (250, 100). Esta é a curva de referência.

Na curva tracejada (verde), considerou-se apenas os usuários contemplados com algum recurso no processo de alocação utilizando algoritmo de maximização da taxa de transmissão. É possível perceber que a curva é intensamente acentuada para cima em relação à curva contínua, indicando o favorecimento de usuários próximos à estação rádio base.

Os resultados mostram 50% dos usuários contemplados encontra-se a uma distância menor que 76 m da estação rádio base. Entretanto, pode ser observado pela curva contínua que apenas 20% dos usuários na rede encontram-se a uma distância menor que 76 m da estação rádio base. Desta forma, verifica-se que grande parte dos recursos de rede são distribuídos à uma quantidade

pequena de usuários, localizados próximos à ERB. Este fato pode ser visto também pela distância média dos usuários contemplados e o desvio padrão, de valores 89 m e 45 m, respectivamente.

Na curva pontilhada (violeta), consideraram-se apenas os usuários contemplados com algum recurso no processo de alocação utilizando algoritmo *proportional fair*. Observa-se que a curva obtida apresenta curvatura menos acentuada em comparação à curva tracejada, indicando que a distribuição dos recursos ocorreu de forma mais diversificada se comparado ao algoritmo de maximização da taxa de transmissão.

Ainda com relação à alocação de recursos utilizando o algoritmo *proportional fair*, 50% dos usuários contemplados estão a uma distância menor que 94 m da estação rádio base, valor 24% maior que a mediana dos valores obtidos com o algoritmo de maximização da taxa de transmissão. Adicionalmente, a distância média dos usuários contemplados foi de 113 m e o desvio padrão foi de 57 m.

Por fim, na curva tracejada e pontilhada (azul), considerou-se apenas os usuários contemplados com algum recurso no processo de alocação utilizando algoritmo aleatório. Nota-se que a curva aproxima-se da curva de referência, indicando a aleatoriedade do processo de alocação de recursos. A média e desvio padrão, para o algoritmo aleatório, foram de 130 m e 64 m, respectivamente, valores próximos aos obtidos com a curva de referência.

Os resultados da Figura 6.7 indicam que, embora apresente os melhores resultados em termos de taxa de transmissão, o algoritmo de maximização da taxa de transmissão não é adequado para utilização em redes reais, devido ao seu intenso favorecimento de usuários próximos à estação rádio base em detrimento aos usuários localizados nas bordas das células.

Por outro lado, o custo da uniformidade na distribuição dos recursos pelo algoritmo aleatório refletiu-se nos valores de taxas de transmissão média por usuário e taxa de transmissão médio por setor, comprometidos devido à utilização de MCS robustos para atender usuários com baixa qualidade de canal.

Finalmente, o algoritmo *proportional fair* apresentou o melhor compromisso entre igualdade na distribuição de recursos e taxas de transmissão, justificando sua escolha, dentre os algoritmos avaliados neste trabalho, como o mais adequado para utilização em redes celulares.

## 6.4 COMPARATIVO DE DESEMPENHO DE REDE VARIANDO-SE O NÚMERO DE ANTENAS DE TRANSMISSÃO

Na seção anterior, todas as simulações foram executadas utilizando apenas uma antena de transmissão e recepção. Entretanto, é prevista nas especificações do 3G LTE a utilização de múltiplas antenas, limitando-se a quatro o número de antenas na transmissão e na recepção [13]. Neste trabalho, utilizou-se múltiplas antenas visando seleção de antenas, por meio da comutação no tempo e frequência. Assim, fixou-se o número de antenas na recepção valor unitário e variou-se o número de antenas na transmissão.

A exploração da diversidade na transmissão por meio da seleção de antenas no tempo e frequência é um esquema simples de utilização de múltiplas antenas na transmissão onde os recursos tempo-frequência são distribuídos entre as antenas. O modo como os recursos são distribuídos entre as antenas depende do algoritmo de alocação de recursos e é explicado no Capítulo 5.

No entanto, é preciso enfatizar que nenhuma antena transmite no mesmo recurso tempo-frequência que outra (mesmo instante de tempo e mesma frequência), como acontece no caso de multiplexação espacial. A seleção de antenas na transmissão por meio da comutação no tempo e frequência é proposto para o 3G LTE em [13].

Nas Figuras 6.8, 6.9 e 6.10 ilustram-se os valores de taxa de transmissão efetiva média por usuário, variando-se o número de antenas e para os algoritmos de alocação de maximização da taxa de transmissão, *proportional fair* e aleatório, respectivamente. Nas Figuras 6.11, 6.12 e 6.13 ilustram-se os valores de taxa de taxa de transmissão efetiva média por setor.

Pelas Figuras 6.8, 6.9 e 6.10 não é possível avaliar precisamente o ganho nos valores de taxa de transmissão proporcionado pelo aumento no número antenas de transmissão. Por isso, as Figuras 6.14, 6.15 e 6.16 ilustram os ganhos percentuais de taxa de transmissão para os casos de duas, três e quatro antenas de transmissão em relação ao caso de uma única antena.

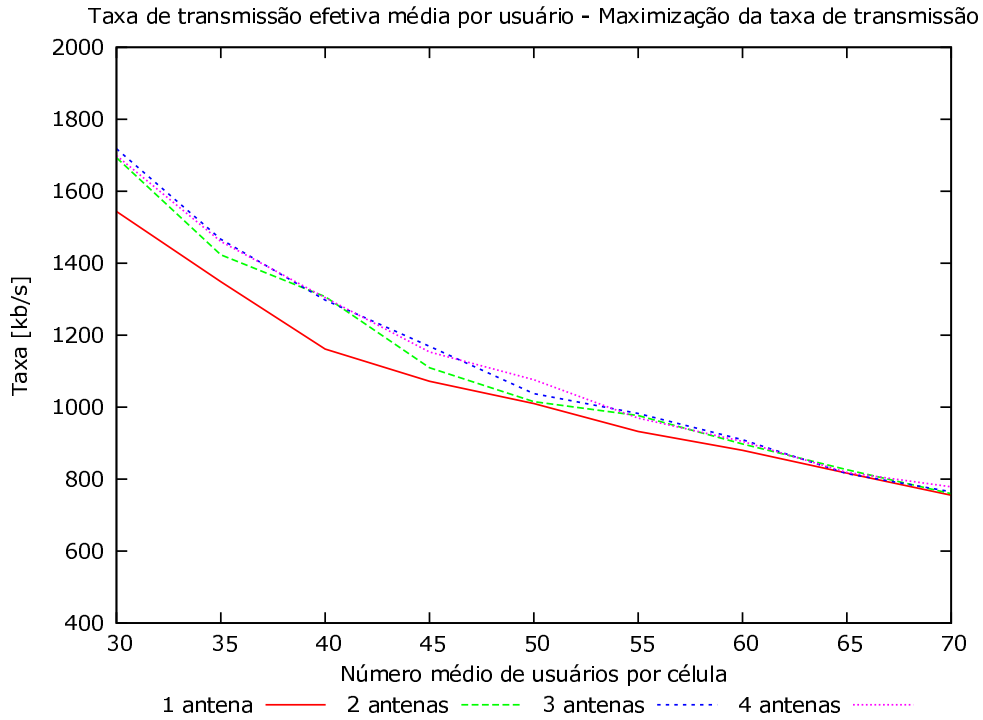


Figura 6.8: Taxa de transmissão efetiva média por usuário variando-se o número de antenas de transmissão e utilizando o algoritmo de maximização da taxa de transmissão

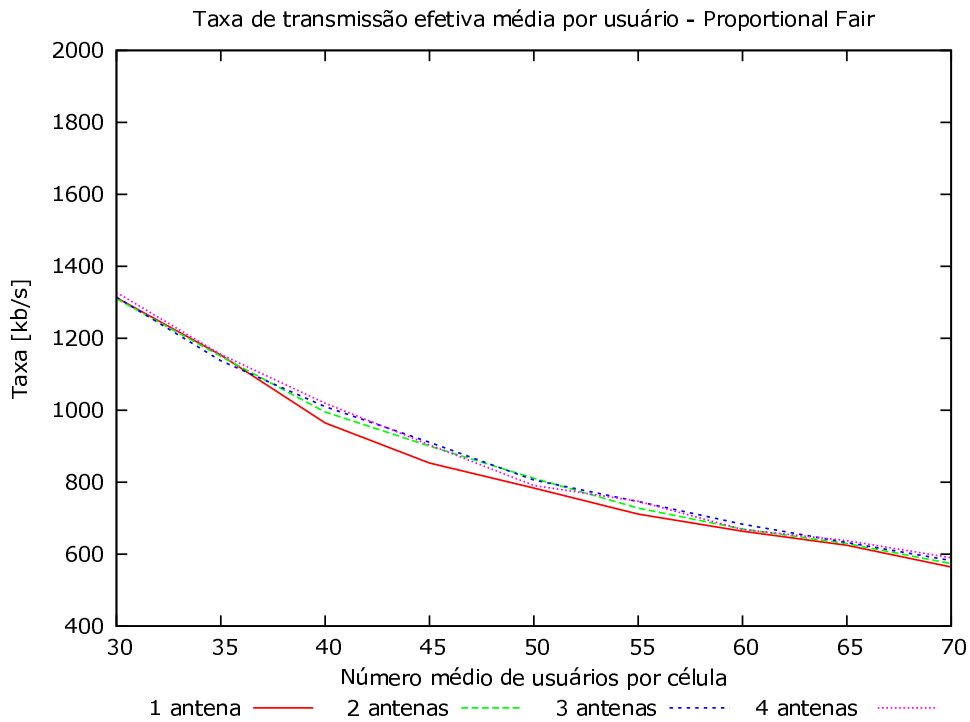


Figura 6.9: Taxa de transmissão efetiva média por usuário variando-se o número de antenas de transmissão e utilizando o algoritmo *proportional fair*

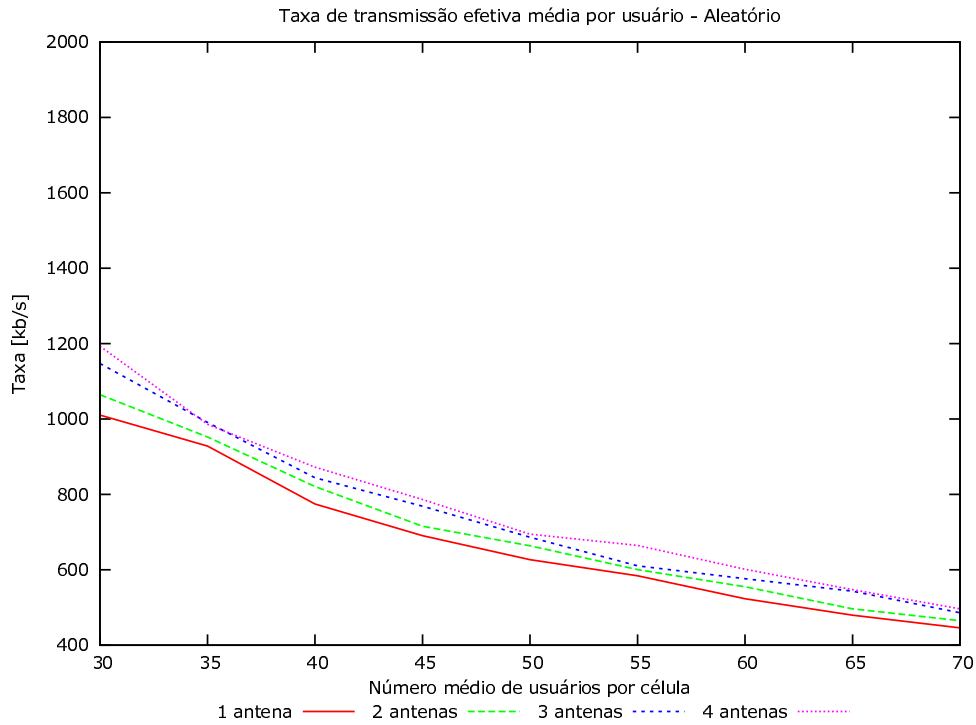


Figura 6.10: Taxa de transmissão efetiva média por usuário variando-se o número de antenas de transmissão e utilizando o algoritmo aleatório

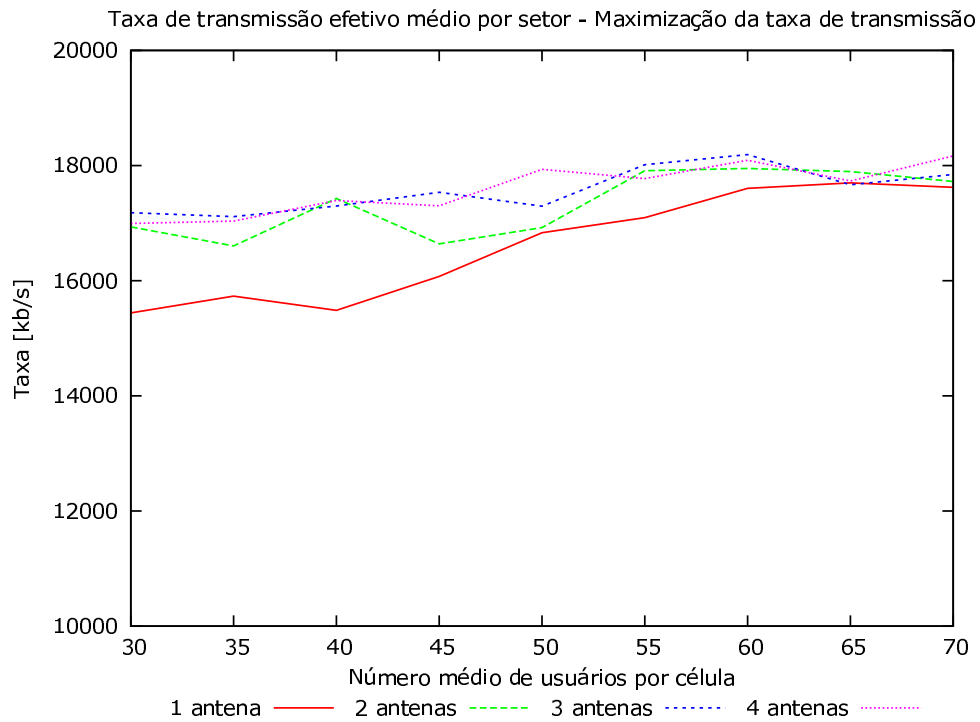


Figura 6.11: Taxa de transmissão efetiva média por setor variando-se o número de antenas de transmissão e utilizando o algoritmo de maximização da taxa de transmissão



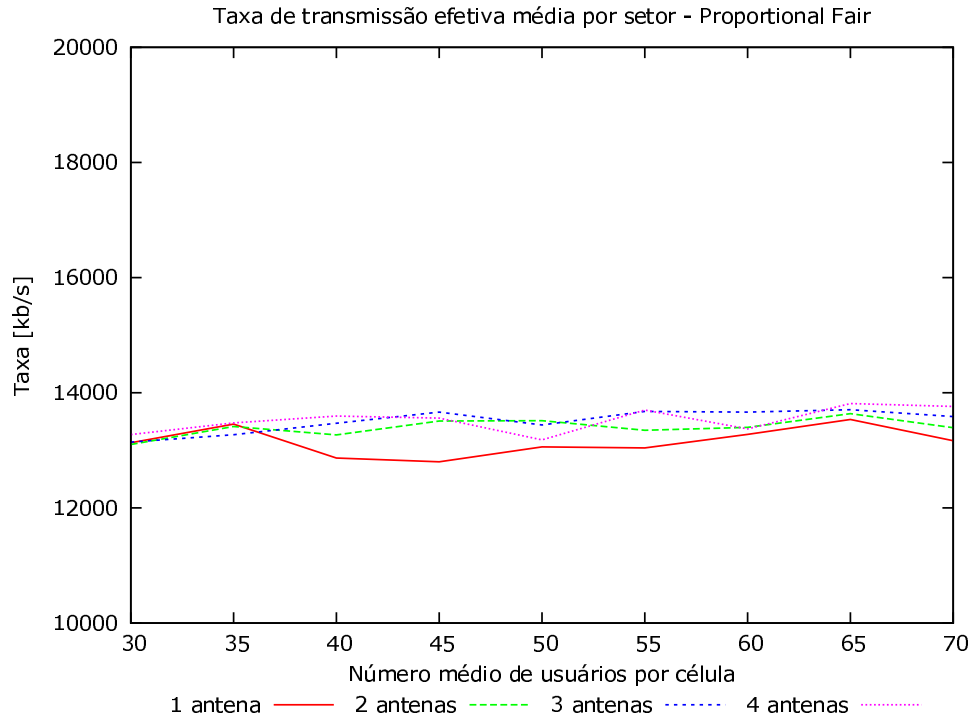


Figura 6.12: Taxa de transmissão efetiva média por setor variando-se o número de antenas de transmissão e utilizando o algoritmo *proportional fair*

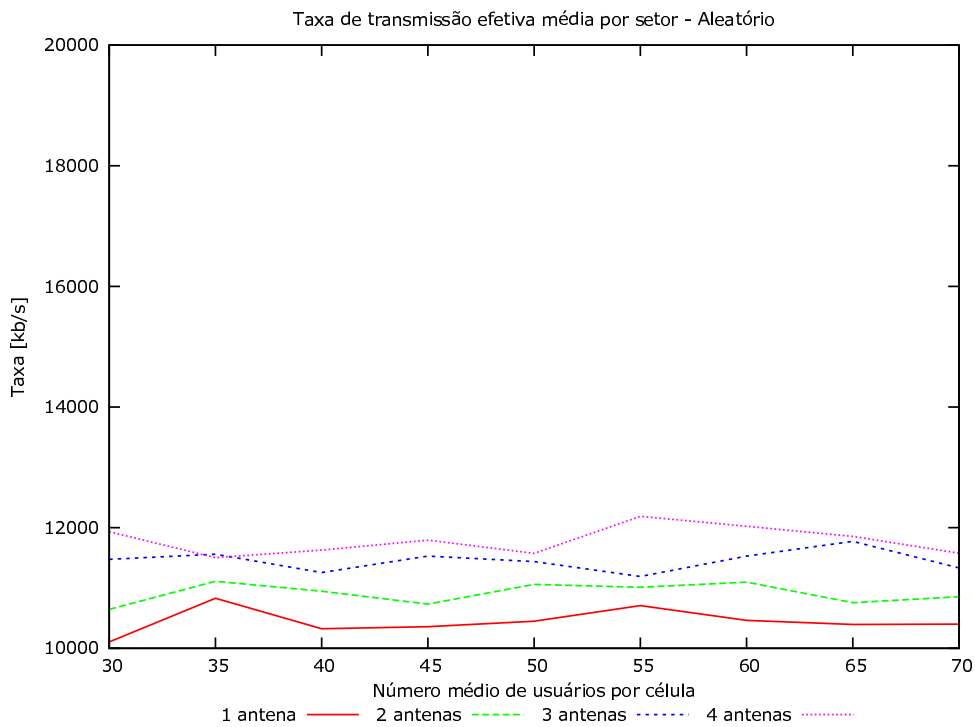


Figura 6.13: Taxa de transmissão efetiva média por setor variando-se o número de antenas de transmissão e utilizando o algoritmo aleatório

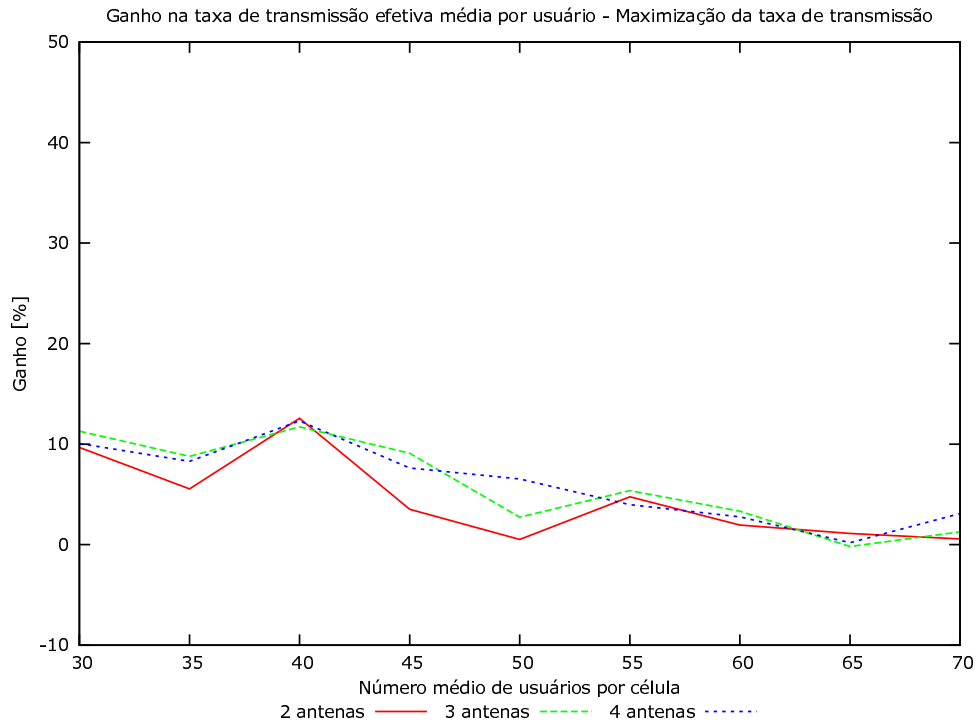


Figura 6.14: Ganho percentual de taxa de transmissão efetiva média por usuário variando-se o número de antenas de transmissão e utilizando algoritmo de maximização da taxa de transmissão

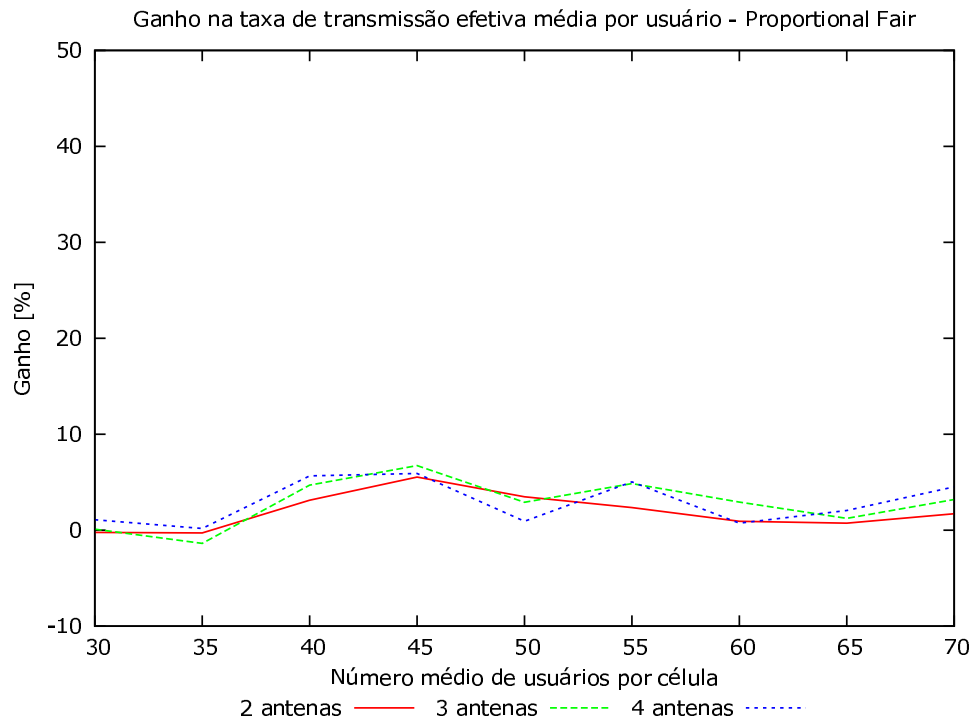


Figura 6.15: Ganho percentual de taxa de transmissão efetiva média por usuário variando-se o número de antenas de transmissão e utilizando algoritmo *proportional fair*

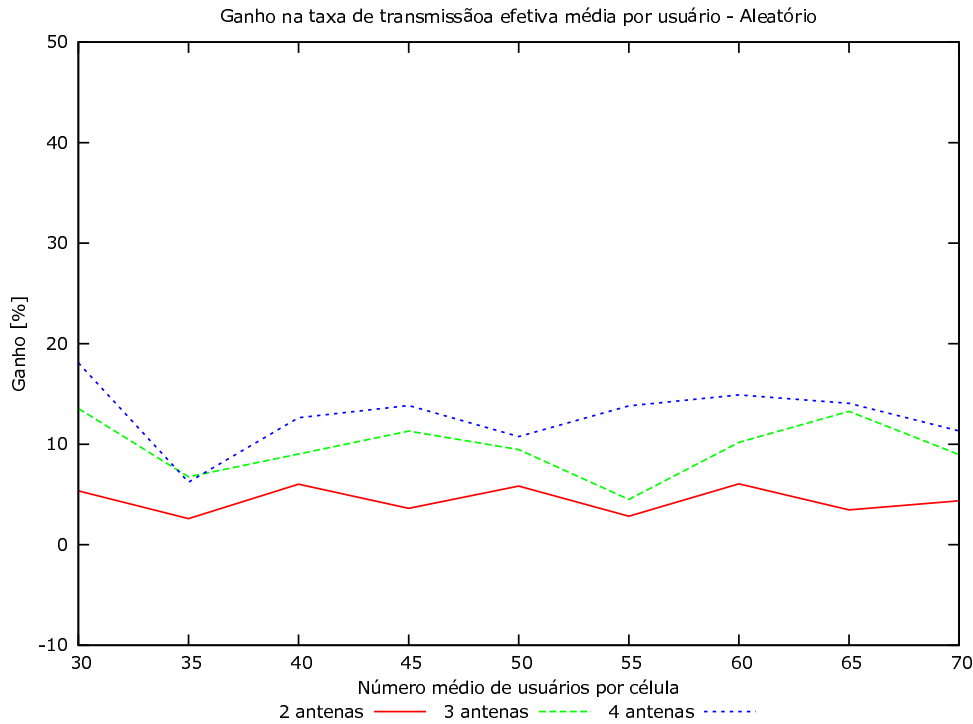


Figura 6.16: Ganho percentual de taxa de transmissão efetiva média por usuário variando-se o número de antenas de transmissão e utilizando algoritmo aleatório

É observado pelas Figuras 6.14 e 6.15 que o ganho percentual na taxa de transmissão efetiva média por usuário para os algoritmos de maximização da taxa de transmissão e *proportional fair* oscila entre 0% e 10%, para os casos de duas, três e quatro antenas.

A explicação para os reduzidos valores de ganhos obtidos com ambos algoritmos é similar. Como a seleção de antenas visa ganho de diversidade na transmissão, este é reduzido porque a maior parte da diversidade já foi explorada pelos algoritmos de alocação de recursos nas fases de escalonamento no domínio temporal e na frequência.

Adicionalmente, a técnica de seleção entre antenas no tempo e frequência não aumenta de maneira efetiva a quantidade de recursos disponíveis na rede, como no caso de multiplexação espacial, onde o mesmo recurso tempo-frequência pode ser reutilizado.

Deste modo, mantida a quantidade de recursos na rede, a forma de se aumentar a taxa de transmissão efetiva média por usuário seria aumentar a porcentagem de utilização dos MCS mais eficientes espectralmente (MCS 1 e MCS 2). Contudo, para o algoritmo de maximização da taxa de transmissão, a porcentagem de utilização dos MCS 1 ou MCS 2 é alta mesmo que se utilize apenas uma antena de transmissão. Como pode ser observado na Figura 6.4, para o algoritmo de

alocação de maximização da taxa de transmissão e utilizando uma antena de transmissão, 100% dos recursos são transmitidos utilizando MCS 1 ou MCS 2. Logo, os ganhos percentuais vistos na Figura 6.14 devem-se apenas ao aumento na proporção de utilização de MCS 2. Para exemplificar, a distribuição de MCS quando utilizado quatro antenas de transmissão é ilustrado na Figura 6.18.

De maneira semelhante, o percentual de utilização dos MCS 1 e MCS 2 para o algoritmo *proportional fair* não variam significativamente, como pode ser visto pelas comparações das Figuras 6.5 e 6.19.

Comparando os resultados da Figura 6.16 com os das Figuras 6.14 e 6.15, pode ser observado que, utilizando o algoritmo de alocação aleatória, obtém-se valores de ganho na taxa de transmissão efetiva média por usuários maiores do que quando utilizados os algoritmos de maximização da taxa de transmissão e *proportional fair*. No entanto, é importante ressaltar que valores de ganhos maiores não significam valores de taxas de transmissão maiores. Ainda que sejam obtidos ganhos maiores quando utilizado o algoritmo aleatório, os valores de taxa de transmissão efetiva média por usuário são abaixo dos valores obtidos pelos outros algoritmos, como pode ser observado pela Figura 6.17. Nota-se que os valores de taxa de transmissão obtidos com o algoritmo aleatório quando são utilizadas quatro antenas na transmissão são em média 12% e 39% menores que os valores obtidos com os algoritmos *proportional fair* e maximização da taxa de transmissão, respectivamente, quando é utilizada apenas uma antena na transmissão.

A explicação para os valores de ganho maiores obtidos pelo algoritmo aleatório em relação aos outros algoritmos baseia-se no fato de que, para o algoritmo aleatório, a exploração da diversidade na transmissão ocorre predominantemente na fase de escalonamento entre antenas. Nas fases anteriores de escalonamento (temporal e na frequência), o processo de alocação aleatória não explora a diversidade multiusuário, justamente porque não leva em conta as informações dos enlaces dos usuários para a alocação dos recursos. Entretanto, no escalonamento entre antenas, para cada frequência, escolhe-se aquela cujo enlace do usuário permite transmissão com maior taxa de transmissão possível. Logo, o processo de escalonamento entre antenas, que não acontece no caso de apenas uma antena de transmissão, é mais significativo para o desempenho da rede quando utilizado o algoritmo de alocação aleatória, o que pode ser observado também pela Figura 6.16.

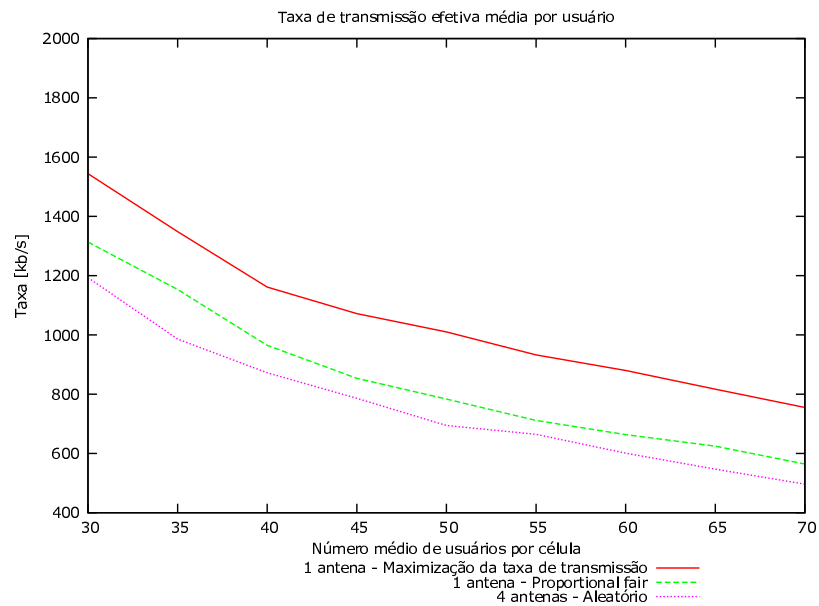


Figura 6.17: Comparação de desempenho entre algoritmos de alocação de recursos

Especificamente para o algoritmo de maximização da taxa de transmissão, observa-se uma tendência à diminuição nos valores de ganho à medida que aumenta o número de usuários na rede. Como explicado anteriormente, a diversidade multiusuário é explorada diretamente por este algoritmo e aumenta de acordo com o número de usuários na rede. Desta forma, uma vez que a diversidade multiusuário já foi intensamente explorada nos processos de escalonamento no domínio do tempo e frequência, diminui-se o benefício obtido por meio do processo de escalonamento entre as antenas de transmissão.

Por fim, os resultados indicam que, diferentemente do algoritmo aleatório, os benefícios trazidos pela seleção de antenas na transmissão pouco se refletem nos valores de taxa de transmissão para os algoritmos de maximização da taxa de transmissão e *proportional fair*. Para estes algoritmos, é sugerido o estudo de utilização de múltiplas antenas visando multiplexação espacial. Como a multiplexação espacial visa aumento efetivo na taxa de transmissão, é possível que sejam alcançados ganhos maiores, uma vez que os recursos espaciais são explorados de forma mais eficaz.

No entanto, é possível e provável que em redes celulares existam terminais móveis que não suportem utilização de técnicas de multiplexação espacial. Para estes casos, a seleção de antenas pode ser útil.

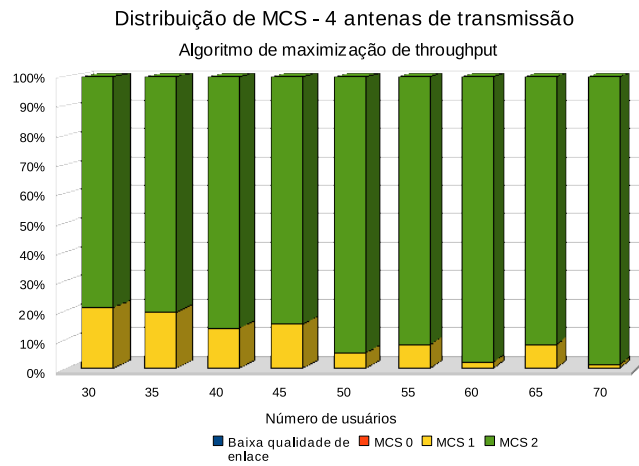


Figura 6.18: Distribuição de MCS para algoritmo de maximização da taxa de transmissão utilizando quatro antenas de transmissão

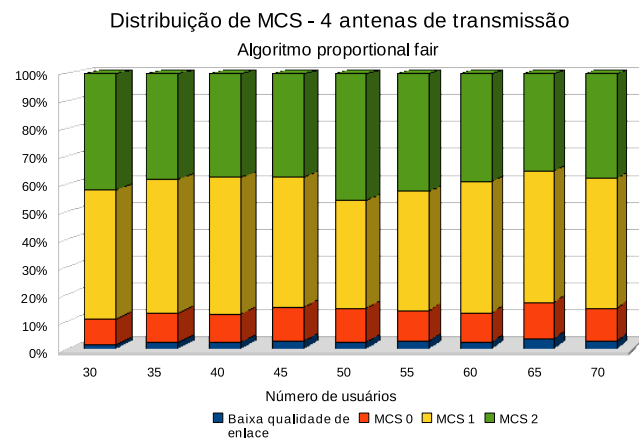


Figura 6.19: Distribuição de MCS para algoritmo *proportional fair* utilizando quatro antenas de transmissão

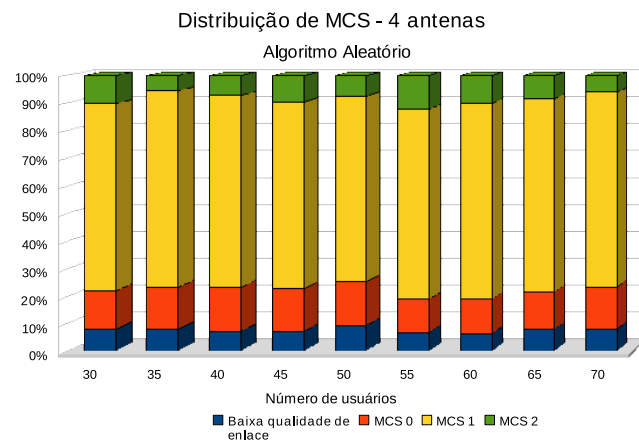


Figura 6.20: Distribuição de MCS para algoritmo aleatório utilizando quatro antenas de transmissão

# 7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou uma proposta de ferramenta de simulação sistêmica para a avaliação de desempenho de sistemas de comunicação celular quanto à alocação de recursos. Simulações computacionais de redes celulares, conforme explicado no Capítulo 1, apresentam cada vez mais importância para o estudo de viabilidade de novos sistemas de comunicação celular, como por exemplo o 3G LTE.

O 3G LTE surge como uma proposta de evolução para o sistema de comunicação celular de terceira geração chamado UMTS. Diferentemente do UMTS, que utiliza divisão em códigos para múltiplos acessos, o 3G LTE utiliza como técnica de acesso à rede a divisão em frequências ortogonais. Além disso, são previstas para o 3G LTE técnicas como utilização de múltiplas antenas na transmissão e recepção, modulação/codificação adaptativa e escalonamento de recursos com base em parâmetros de rede.

Todos estes avanços trazem novos desafios quanto à alocação dos recursos tempo-frequência-espaço disponíveis na rede para os usuários. Diante desses desafios, diversos algoritmos de alocação de recursos têm sido propostos para os novos sistemas de comunicação celular. Três destes algoritmos foram analisados neste trabalho.

O primeiro algoritmo, que visa a maximização da taxa de transmissão total por célula, escolhe, para cada recurso, o usuário que possibilita a transmissão a uma maior taxa possível. Como a taxa de transmissão depende diretamente da qualidade do enlace, os recursos são alocados aos usuários com melhores condições de enlace.

O segundo algoritmo, chamado de *proportional fair*, leva em conta não apenas a taxa de transmissão demandada por cada usuário, mas também a taxa de transmissão obtida pelo usuário ao longo da simulação. Isso é feito para favorecer usuários com histórico de baixa taxa de transmissão, possibilitando uma distribuição mais equilibrada dos recursos.

O terceiro algoritmo aloca os recursos de maneira aleatória aos usuários da rede.

De acordo com os resultados de simulação apresentados no Capítulo 6, o algoritmo de maximização da taxa de transmissão proporcionou os melhores valores de taxa de transmissão média por usuário e por setor, seguidos pelos algoritmos *proportional fair* e aleatório. Entretanto, foi mostrado que o algoritmo de maximização da taxa de transmissão apresenta um forte favorecimento a usuários localizados próximos às estações rádio base em detrimento a usuários localizados na borda da célula, tornando-o inadequado para utilização em redes reais.

Por outro lado, o algoritmo *proportional fair* proporcionou resultados de taxas de transmissão da ordem de 15% abaixo dos resultados proporcionados pelo algoritmo de maximização da taxa de transmissão. Entretanto, apresenta favorecimento de usuários de maneira menos intensa, de forma que a distância média dos usuários contemplados com algum recurso à estação de rádio base é aproximadamente 25% maior, quando comparados ambos algoritmos.

Por último, o algoritmo aleatório proporcionou a alocação de recursos de forma mais equilibrada, com a distribuição das distâncias dos usuários servidos sendo próxima à distribuição das distâncias dos usuários criados ao longo das simulações. Entretanto, o custo da distribuição uniforme dos recursos refletiu-se nas baixas taxas de transmissão obtidas pelos usuários e pelos reduzidos valores de taxa de transmissão média por setor.

Quanto à utilização de múltiplas antenas na transmissão, os resultados mostraram que, utilizando seleção de antenas juntamente com os algoritmos de maximização da taxa de transmissão e *proportional fair*, o ganho nos valores de taxa de transmissão média por usuário e taxa de transmissão média médio por setor oscilou entre 0% e 10%. Atribui-se o reduzido valor de ganho ao fato da diversidade na transmissão ser extensivamente explorada nos processos de escalonamento de usuários no tempo e na frequência, limitando o ganho proporcionado pela seleção de antenas. Para o algoritmo aleatório, a seleção de antenas apresentou um papel fundamental na exploração da diversidade na transmissão, justificando sua utilização.

Com relação aos resultados de simulação, conclui-se que, dentre os algoritmos de alocação de recursos analisados, o *proportional fair* é o mais recomendado para utilização em redes reais, devido ao seu bom desempenho com relação à taxas de transmissão média por usuário e por setor



e distribuição variada dos recursos na rede.

No que se refere à utilização de múltiplas antenas, devido aos reduzidos valores de ganho proporcionados pela seleção de antenas, é sugerido o estudo de desempenho de rede utilizando múltiplas antenas visando multiplexação espacial. No entanto, a seleção de antenas pode ser útil para o caso de terminais móveis legados ou que não suportam técnicas de multiplexação espacial.

Por fim, com relação à ferramenta de simulação desenvolvida neste trabalho, conclui-se que o simulador é capaz de apresentar resultados que possibilitem a avaliação de desempenho de redes quanto à alocação de recursos. Observa-se ainda que este pode ser um instrumento eficaz no estudo de novas propostas para os sistemas de comunicação celular. Para isso, são sugeridas algumas futuras implementações, dentre as quais se destacam:

- Implementação de correlação espacial no sombreamento:

- Distância de correlação;

- Correlação entre células;

- Correlação entre setores;

- Implementação de sombreamento variante no tempo;

- Implementação de modelos de mobilidade;

- Implementação de outros modelos de tráfego:

- VoIP;

- Streaming* de vídeo;

- Implementação de MIMO visando multiplexação espacial;

- Visualização de distribuição espacial de taxas de transmissão;

- Implementação de outros modelos de receptor;

- Implementação de múltiplas antenas na recepção;

- Implementação de controle de potência;

- Implementação de planejamento manual de frequência (ou outros fatores de reuso);
- Incorporação de curvas de enlace geradas pelo projeto WiSiL;
- Implementação de testes de unidade para o código;
- Implementação de estimação de canal baseada em canais piloto;
- Inclusão de elementos de recurso de controle.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] JERUCHIM, M. C.; BALABAN, P.; SHANMUGAN, K. S. *Simulation of Communication Systems: Modeling, Methodology and Techniques*. [S.l.]: Springer, 2000.
- [2] Agência Nacional de Telecomunicações. Disponível em <<http://www.anatel.gov.br>>. Acessado em junho de 2008.
- [3] Instituto Nokia de Tecnologia. Disponível em <<http://www.indt.org.br>>. Acessado em junho de 2008.
- [4] WEI, N. et al. Performance of MIMO with frequency domain packet scheduling in UTRAN LTE downlink. Em: *Vehicular Technology Conference, 2007. VTC2007-Spring. IEEE 65th*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1177–1181.
- [5] POKHARIYAL, A. et al. HARQ aware frequency domain packet scheduler with different degrees of fairness for the UTRAN Long Term Evolution. Em: *Vehicular Technology Conference, 2007. VTC2007-Spring. IEEE 65th*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 2761–2765.
- [6] POKHARIYAL, A.; KOLDING, T. E.; MOGENSEN, P. E. Performance of downlink frequency domain packet scheduling for the UTRAN Long Term Evolution. In: *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2006 IEEE 17th International Symposium on*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 1–5.
- [7] 3GPP - Third Generation Partnership Project. Disponível em <<http://www.3gpp.org>>. Acessado em junho de 2008.
- [8] DAHLMAN, E. et al. The 3G Long-term Evolution - radio interface concepts and performance evaluation. Em: *Vehicular Technology Conference, 2006. VTC 2006-Spring. IEEE 63rd*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 137–141.
- [9] WiMAX Forum. Disponível em <<http://www.wimaxforum.org>>. Acessado em junho de 2008.

- [10] SÁNCHEZ, J. J. et al. Physical layer performance of Long Term Evolution cellular technology. Em: *Vehicular Technology Conference, 2006. VTC 2006-Spring. IEEE 63rd*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 137–141.
- [11] 3GPP. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation(Release 8)*. Disponível em <<http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36211.htm>>. Acessado em junho de 2008.
- [12] 3GPP. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and channel coding(Release 8)*. Disponível em <<http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36212.htm>>. Acessado em junho de 2008.
- [13] 3GPP. *Physical layer aspects for evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA)(Release 7)*. Disponível em <<http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/25814.htm>>. Acessado em junho de 2008.
- [14] TSE, D.; VISWANATH, P. *Fundamentals of Wireless Communication*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2005.
- [15] ANDREWS, J. G.; GHOSH, A.; MUHAMED, R. *Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking*. [S.l.]: Prentice Hall, 2007.
- [16] LEI, H. et al. Downlink dynamic resource allocation for multi-cell OFDMA system. Em: *Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Fall. 2003 IEEE 58th*. [S.l.: s.n.], 2003. p. 1698 – 1702.
- [17] LAU, V. Proportional fair space-time scheduling for wireless communications. Em: *Communications, IEEE Transactions on*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 1353 – 1360.
- [18] LETAIEF, K. Y. J. Z. Dynamic multiuser resource allocation and adaptation for wireless systems. Em: *Wireless Communications, IEEE*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 38– 47.
- [19] RAPPAPORT, T. S. *Wireless Communications: Principles and Practice*. [S.l.]: Prentice-Hall, 1996.
- [20] IT++. Disponível em <<http://itpp.sourceforge.net>>. Acessado em junho de 2008.

- [21] ALEXIOU, A. et al. *Link to System Interface Methodology*. [S.l.], 2005.
- [22] The GNU Compiler Collection. Disponível em <<http://gcc.gnu.org>>. Acessado em junho de 2008.
- [23] Fedora Project. Disponível em <<http://fedoraproject.org>>. Acessado em junho de 2008.
- [24] AMARAL, E.; VALLOCCI, P. *Modelos de desempenho de enlace em simulações sistêmicas de redes MIMO/OFDM*. 2007. Trabalho de conclusão de curso. Universidade de Brasília
- [25] LEI, H. et al. System level evaluation of 3G Long Term Evolution. Em: *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2007. PIMRC 2007. IEEE 18th International Symposium on*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1–5.
- [26] BRUENINGHAUS, K. et al. Link performance models for system level simulations of broadband radio access systems. Em: *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2005. PIMRC 2005. IEEE 16th International Symposium on*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 2306– 2311.
- [27] LIU, H. et al. Eesm based link error prediction for adaptive MIMO-OFDM system. Em: *Vehicular Technology Conference, 2007. VTC2007-Spring. IEEE 65th*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 559–563.
- [28] YANIV, R. et al. *CINR measurements using the EESM method*. Disponível em <<http://wirelessman.org/tge/contrib/>>. Acessado em junho de 2008.
- [29] HALONEN, T.; ROMERO, J.; MELERO, J. *GSM, GPRS and EDGE Performance: Evolution towards 3G/UMTS*. [S.l.]: Wiley, 2002.