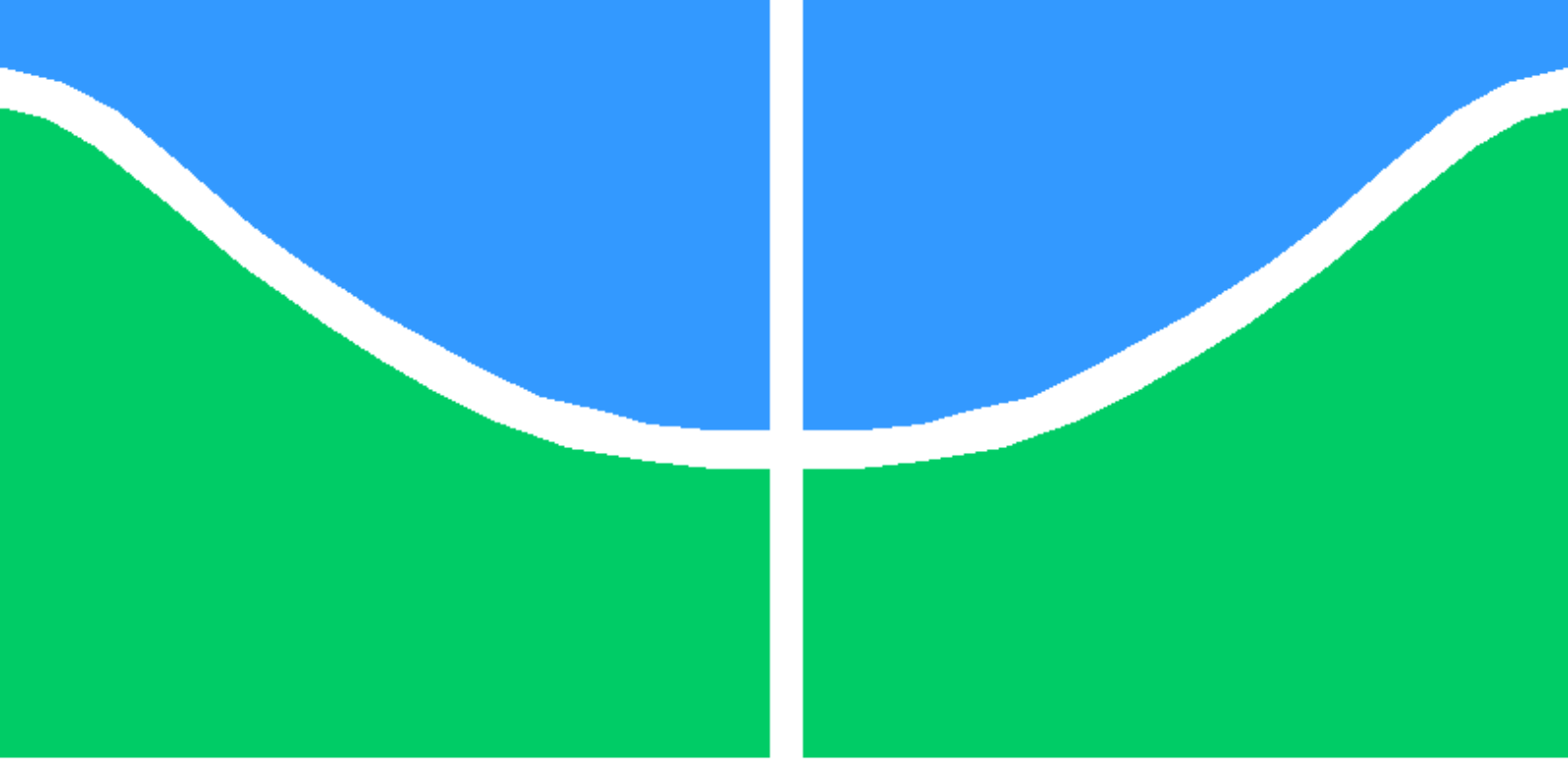

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO: MODULAÇÕES DIGITAIS E ANTENAS

Robert Kley Lageano de Oliveira

Brasília, Junho de 2014

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASILIA
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO: MODULAÇÕES DIGITAIS E ANTENAS

Robert Kley Lageano de Oliveira

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

Banca Examinadora

Prof. Dr. Marco Antônio Brasil Terada, _____
ENE/UnB
Orientador

Prof. Dr. Antônio José Martins Soares, _____
ENE/UnB
Examinador Interno

Prof. Dr. Rafael Rabelo Nunes _____
Examinador externo

Dedicatória

Aos meus pais, Kátila e Cleomar, meu padrasto Marcelo, aos meus irmãos Hebert e Victor e a minha noiva Jussara

Robert Kley Lageano de Oliveira

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me abençoado em toda a minha trajetória de graduação. Agradeço também a minha família por ter me apoiado durante todo o meu período como universitário.

Robert Kley Lageano de Oliveira

RESUMO

Atualmente, a tecnologia em constante expansão, trás uma demanda por transmissão de dados, seja em sistemas de telefone, internet, e diversos outros serviços. Essa demanda constante por sistemas de comunicação tem trazido diversas barreiras devido a limites teóricos de tecnologias empregadas nesses serviços. Dessa forma, é indispensável que a tecnologia seja aproveitada ao máximo por meio de técnicas de otimização que permitem tirar o maior proveito do que é desenvolvido. Esse trabalho tem como objetivo estudar alguns dos métodos que permitem a otimização de sistemas de comunicação móveis atuais.

Palavras-chave: Modulações Digitais, Antenas, Sistemas de Comunicação, Comunicação Digital.

ABSTRACT

Nowadays, technology is in constant expansion, and this brings a demand for data trasmission, in telephone communications, internet and several other services. This constant demand for communications services, has brought several barriers because of theoretical limits in currently used technologies. In this way, it is necessary that technology should be used at maximum by using techniques of optimization that allows to take benefit of what is developed. This work, has the purpose of studying some methods that allow the optimization of the current communication systems.

Keywords: Digital Modulations, Antennas, Communication Systems, Digital Communications.

SUMÁRIO

1 Introdução 1
1.1 Contextualização 1
1.2 Definição do problema 1
1.3 Objetivos do projeto 2
1.4 Apresentação do manuscrito 2

2 Revisão Bibliográfica 3
2.1 Ondas Eletromagnéticas 3
2.2 Análise de Espaço de Sinais 4
2.3 Modulação e Demodulação Digital 4
2.4 Técnicas de Modulação Digital em Banda Passante 6
2.4.1 Modulação por chaveamento de fase (PSK) 6
2.4.2 Modulação por chaveamento de frequência(FSK) 6
2.4.3 Modulação por chaveamento de Amplitude(ASK) 7
2.5 Taxa de Erro de Bit e Taxa de erro de Símbolo 7
2.6 Modelagem do Ruído 8
2.7 Multiplexação 9
2.8 Multiplexação por Divisão Ortogonal de Frequência (OFDM) 9
2.9 Capacidade do canal 12
2.10 Modelos de Canal ITU 12
2.10.1 Pedestrian A Channel - PedA 13
2.10.2 Pedestrian B Channel - PedB 13
2.10.3 Vehicular-A Channel 13

3 Antenas 14
3.1 Antenas 14
3.1.1 Parâmetros de Radiação 14
3.1.2 Múltiplas Antenas 15

4 Simuladores Computacionais 18
4.1 A tecnologia 4G e o padrão LTE 18
4.2 Simuladores LTE de Vienna 18
4.2.1 Simulador em nível de conexão 19

4.2.2 Simulador em nível de sistema 21
4.2.3 Comparação entre os simuladores em nível de sistema e de conexão 22
4.2.4 Modelos de Modulações Digitais disponíveis 23
4.3 Simuladores GRADMAX 24
4.3.1 GRADMAX *for web* 24

5 Resultados Computacionais 27
5.1 Introdução 27
5.2 Simulação teórica das taxas de erro de bit utilizando a ferramenta Bertool 27
5.3 Simulação de um Canal de Comunicação utilizando LTE Link Level Simulator 28
5.3.1 Avaliação do Sistema em QAM-16 e QAM-64 em modo SISO 28
5.3.2 Avaliação do Sistema em QAM-16 e QAM-64 em modo MIMO 2x2 29
5.3.3 Interpretação dos resultados de processamento de dados 30
5.4 Otimização dos parâmetros de Antenas 31
5.4.1 Cenário proposto para otimização 32
5.5 Métodos de Otimização 33
5.5.1 Método para Antenas Simétricas 33
5.5.2 Método para Antenas Assimétricas 35
5.5.3 Antena de referência para determinação do novo diagrama 35
5.5.4 Aproximação pelo método das máscaras 35

6 Conclusões 41

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 42

LISTA DE FIGURAS

2.1 Modulações Digitais mais comuns 5
2.2 Exemplo Constelação QPSK representada pelo espaço de estados 5
2.3 Exemplo de Código de Gray 5
2.4 Ruídos Gaussianos de diferentes variâncias 8
2.5 Sobreposição de Portadoras 10
2.6 Sobreposição de Portadoras Ortogonais 10
2.7 Transmissão Analógica OFDM 11
2.8 Recepção Analógica OFDM 12

3.1 Parâmetros e padrão de radiação de uma antena 15
3.2 Sistemas de Múltiplas Antenas 16
3.3 Capacidade de Sistemas MIMO comparados com SISO(Teorema de Shannon) 17

4.1 Diagrama de Blocos do Simulador a nível de Conexão 19
4.2 Diagrama de Blocos Transmissor 20
4.3 Diagrama de Blocos Receptor 21
4.4 Cenários que podem ser ajustados na simulação em nível de sistema 21
4.5 Diagrama de Blocos do Simulador a nivel de sistema 22
4.6 Parâmetros utilizados na simulação comparativa 22
4.7 Capacidade do Canal em ambos os modelos de simulação 23
4.8 Modulações disponíveis 23
4.9 Janela de exibição do GRADMAX *for web* 25
4.10 Janela de exibição - Diagrama de radiação Cardióide GRADMAX*for web* 25
4.11 Janela de exibição de resultados GRADMAX*for web* 26

5.1 Curvas teóricas QAM16 e QAM64 28
5.2 Curvas BLER simuladas QAM16 e QAM64 SISO 29
5.3 Curvas Taxa de transmissão simuladas QAM16 e QAM64 SISO 29
5.4 Curvas BLER simuladas QAM16 e QAM64 1 30
5.5 Curvas Taxa de transmissão simuladas QAM16 e QAM64 2 30
5.6 Taxa de erro de bit para QAM-16 e QAM-64 31
5.7 Cenário Proposto para otimização 32
5.8 Antena projetada para lóbulos laterais de 25dB 34
5.9 Antena Inicial para otimização 36

5.10 Antena com 2 dipolos assimétrica 6dB - Aproximação 1 36
5.11 Antena com 2 dipolos assimétrica 6dB - Aproximação 2 37
5.12 Aproximação obtida após 74737 iterações 38
5.13 Antena do tipo *endfire* obtida pelo método de Dolph 38
5.14 Antena com 3 elementos para o cenário proposto obtida pelo método de Dolph-Chebyshev, utilizando apenas elementos isotrópicos 39
5.15 Curvas BER para 4QAM e 64QAM 39
5.16 Antena com dois dipolos assimétrica 9dB para o cenário proposto 40
5.17 Antena com 3 elementos para o cenário proposto obtida pelo método de Dolph-Chebyshev, utilizando elementos isotrópicos 40

LISTA DE TABELAS

2.1 Tabela de Erros de Probabilidade para as Modulações Digitais mais comuns 8
2.2 Modelo de canal PedA ITU 13
2.3 Modelo de canal PedB ITU 13
2.4 Modelo de canal Vehicular-A ITU 13

5.1 Tabela com as relações sinais ruídos QAM16 e QAM64 31
5.2 Tabela com as relações sinais ruídos QAM16 e QAM64 32
5.3 Dados de excitação para antena de partida 35

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

E	Campo Elétrico	[V/m]
H	Campo Magnético	[A/m]

Símbolos Gregos

λ	Comprimento de onda	[m]
ϵ_0	Permissividade elétrica	[F/m]
μ_0	Permeabilidade Magnética	[H/m]

Siglas

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ITU	International Telecommunications Union
BER	Bit Error Rate
BLER	Block Error Rate
SER	Symbol Error Rate
Pb(e)	Bit Error Probability
Pm(e)	Symbol Error Probability
AWGN	Additive White Gausian Noise
PSK	Phase Shift Keying
FSK	Frequency Shift Keying
ASK	Amplitude Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
FDMA	Frequency-Division Multiple Access
TDMA	Time-Division Multiple Access
CDMA	Code-Division Multiple Access
SDMA	Space-Division Multiple Access
OFDMA	Orthogonal frequency-division multiplexing
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
LTE	Long Term Evolution
RAN	Radio Access Network
SISO	Single Input Single Output
SIMO	Single Input Multiple Output
MISO	Multiple Input Single Output
MIMO	Multipe Input Multiple Output
ECR	Effective Code Rate
PedA	Pedestrian type A Channel model
PedB	Pedestrian type B Channel model
Vehicular-A	Vehicular type A Channel Model

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

Atualmente, os sistemas de comunicação têm passado por um período de expansão, sendo cada vez mais difundidos e necessários em todos os lugares do mundo. Nas últimas décadas a demanda por sistemas de comunicação sem fio cresceu e avançou em proporção, como jamais imaginado. Com a tecnologia sendo difundida cada vez mais, a necessidade de sistemas cada vez mais velozes, mais estáveis, mais confiáveis e capazes de suprir as necessidades de vários usuários simultaneamente é crescente.

Para aumentar a velocidade, a capacidade, e a confiabilidade destes sistemas, a engenharia deve avançar sempre em direção a otimização dos mais diversos parâmetros envolvidos, de maneira a acompanhar a demanda de mercado, e atingir metas com especificações mais restritas e que a tempos atrás seriam impossíveis de serem realizadas.

1.2 Definição do problema

Um grande problema enfrentado por engenheiros projetistas de sistemas de comunicação móveis é o de projetar uma antena que atenda as especificações necessárias para a transmissão e recepção de um sinal. Durante o período em que as tecnologias analógicas prevaleciam, um importante parâmetro da onda transmitida, a ser levado em consideração ao projetar uma antena era o comprimento de onda do sinal transmitido.

Com a expansão da tecnologia de transmissão de sinais, e a expansão da era digital, surgiram métodos para transmitir sinais digitais, com características incorporadas a ondas analógicas, de maneira que estas passassem a possuir diversas peculiaridades, além de seu comprimento de onda e sua frequência. Todo esse avanço foi possível graças ao desenvolvimento de técnicas de modulação digital, que permitiram incorporar à portadora, as mais diversas características de sinais digitais, tornando assim possível a transmissão e recepção de sinais.

Com o surgimento das mais diversas tecnologias que possibilitaram a transmissão de sinais

digitais, resta saber como essas características digitais, que são incorporadas à portadora, podem influenciar no projeto de uma antena, que é indispensável para transmissão de informação. Além disso, faz-se necessária a análise de diversos outros parâmetros que possibilitem o aumento das taxas de transmissão.

1.3 Objetivos do projeto

Nesse projeto, serão estudadas as alterações nos parâmetros de uma portadora em uma modulação digital, e as suas prováveis influências, que devem ser levadas em consideração para o design de uma antena. Esse projeto ainda engloba uma análise e simulação computacional, utilizando o pacote de simulação de sistemas LTE(*LTE Link Level Simulator*) e o programa GRADMAX, para auxiliarem a descobrir os efeitos de diferentes modulações digitais na transmissão de um sinal, e os parâmetros ótimos de uma antena, para a especificação desejada.

1.4 Apresentação do manuscrito

Nos capítulos 2 e 3 é feita uma revisão bibliográfica e uma breve explanação sobre os temas de estudo mais importantes, relativos ao processamento de sinais e antenas, respectivamente. Em seguida, o capítulo 4 descreve os simuladores utilizados e suas principais funções. Resultados experimentais são discutidos no capítulo 5, seguido das conclusões no capítulo 6. Os anexos contém material complementar.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Ondas Eletromagnéticas

É impossível pensar na existência dos mais diversos sistemas de comunicação sem a aplicação da teoria de ondas eletromagnéticas. As ondas eletromagnéticas são nada mais nada menos, do que campos eletromagnéticos radiantes, que têm a capacidade de propagação nos mais diferentes meios. Nessas ondas, compostas de campos elétricos e magnéticos, há uma direção de propagação perpendicular, de maneira que o ângulo de separação do campo elétrico e magnético é de 90 graus.

O comprimento de onda (λ) e a frequência são parâmetros importantes de especificação de características de ondas. O comprimento de onda é uma grandeza que expressa a distância entre dois pontos de iguais magnitudes em períodos de oscilação diferentes. A frequência (f), por sua vez, é uma grandeza que indica o número de oscilações por segundo de uma onda eletromagnética.

A velocidade de propagação de uma onda eletromagnética é uma medida importante que caracteriza o seu comportamento, essa grandeza pode ser expressa matematicamente em função do comprimento de onda e a frequência, de acordo com a seguinte expressão matemática:

$$v = \lambda \times f$$

Ao considerarmos a propagação de ondas eletromagnéticas no espaço livre notamos que o meio é desprovido de fontes ($\rho = J = 0$). Sob essas condições, as equações de Maxwell podem ser escritas em termos de E e H somente como:

$$\bigtriangledown \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\bigtriangledown \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \partial \mathbf{D} \partial t$$

$$\bigtriangledown \cdot \mathbf{D} = \rho_v$$

$$\bigtriangledown \cdot \mathbf{B} = 0$$

Ambos os campos Elétrico(E) e Magnético(H) possuem intensidades no plano transversal à direção de propagação. Por essa razão, tal onda é as vezes chamada de onda *transversal eletro-*

magnética(TEM). A variação espacial necessária a ambos os campos na direção normal às suas orientações ocorrerá portanto apenas na direção de propagação - ou normal ao plano transversal. Em uma onda plana uniforme, as direções de E e H são mutuamente ortogonais. A velocidade de propagação de uma onda TEM também pode ser expressa, matematicamente como [1]:

$$\nu = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3 \times 10^8 \text{m/s} = c$$

2.2 Análise de Espaço de Sinais

Por meio do processo de ortogonalização de Gram-Shmidt [2] é possível gerar uma base ortonormal para a representação de um conjunto de sinais. A análise em espaço de sinais é baseada na representação geométrica de sinais.

No espaço de sinais, cada forma de onda é representada por um vetor em que os coeficientes de projeção dos sinais estão em função das bases. Ao espaço dimensional utilizado para representar os sinais em espaço de estados, como um Espaço Euclidiano, é denominado Sinal [2].

Algumas definições matemáticas para vetores também tem alta relevância para a Análise de espaço de sinal, a raiz quadrada da distância Euclidiana da origem ao ponto no espaço, por exemplo, é equivalente a energia do sinal. O produto escalar de dois vetores no espaço de sinais é equivalente à correlação destes.

2.3 Modulação e Demodulação Digital

O processo de mapeamento de bits em uma forma de onda de um sinal analógico apropriado para transmissão em um canal é denominado processo de modulação digital. O modulador digital é responsável pela interface do canal, e mapeia um conjunto de bits em uma forma de onda do sinal.

Existem três formas básicas de modulação binária sendo elas: Modulação Binária em mudança de Amplitude (BASK), Modulação binária em mudança de fase (BPSK) e Modulação Binária em mudança de Frequência (BFSK), estas formas básicas de modulação digital podem ter suas ordens de modulação expandidas para dessa forma proporcionar uma maior taxa de transmissão e maiores velocidades de transmissão. Esses tipos de modulação e seu efeito sobre a portatora pode ser visto na figura 2.1

Ao conjunto de estados possíveis, ou seja, aos pontos possíveis de diferentes modulações, dá-se o nome de constelação, dessa forma, a cada tipo de modulação digital é atribuída uma constelação em particular.

Em uma modulação de ordem M, a sequência de bits é subdividida em blocos de k= log2(M) bits denominado símbolo e cada bloco ou símbolo é representado por uma das M=2k formas de onda. O mapeamento de k bits de informação as M formas de onda possíveis é feito utilizando codificação em código de Gray.

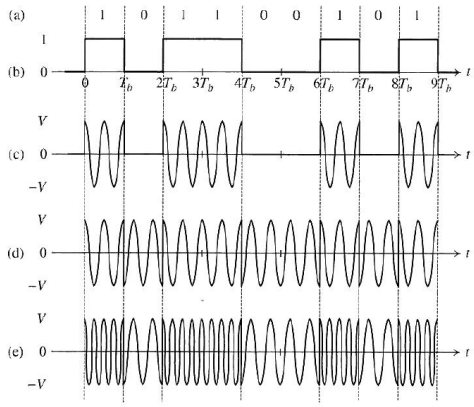

Figura 2.1: Modulações Digitais mais comuns

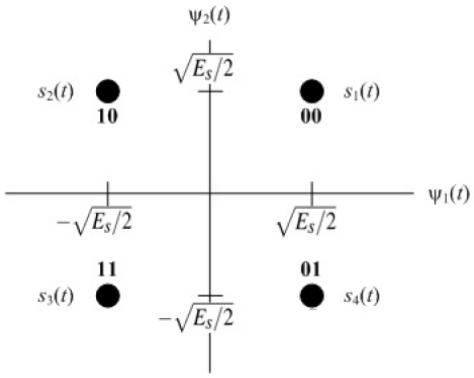

Figura 2.2: Exemplo Constelação QPSK representada pelo espaço de estados

Em um código de Gray, figura 2.3, cada palavra código difere em apenas um bit da outra palavra em sua vizinhança. Por meio da utilização dessa técnica é possível diminuir a relação sinal ruído do sistema.

Decimal	Binary	Gray Code
0	000	000
1	001	001
2	010	011
3	011	010
4	100	110
5	101	111
6	110	101
7	111	100

Figura 2.3: Exemplo de Código de Gray

Em comunicações analógicas a relação sinal ruído ou do inglês SNR é uma figura de mérito, considerada para se determinar a intensidade da energia do sinal e a energia do ruído. Em comunicações analógicas esse parâmetro é importante para se determinar a potência em que um

determinado sinal deve ser transmitido para um padrão de qualidade estipulado na recepção, considerando para tanto a interferência que o ruído do canal proporciona ao sinal recebido.

Em Comunicações Digitais, por outro lado, usa-se a razão entre a energia do bit e a potência do ruído espectral de densidade Eb/No, caso seja um ruído gaussiano, o que seria o equivalente a fazer uma forma normalizada do SNR. Existem diversas maneiras de expressar matematicamente a relação Eb/No, em função da Energia do bit (Eb), Densidade de Potência Espectral do ruído (No), a potência do sinal (S), a potência do ruído (N), a largura de banda (W), a duração do bit (Tb), e a taxa de bit (RB), como expressas a seguir: [2]

$$\frac{Eb}{No} = \frac{STB}{N/W} = \frac{S/Rb}{N/W} = \frac{S}{N}\frac{W}{Rb}$$

A relação Eb/No é uma relação adimensional,por convenção, seu valor é especificado em dB.

$$\frac{Eb}{No}(dB) = 10\log\frac{Eb}{No}$$

2.4 Técnicas de Modulação Digital em Banda Passante

2.4.1 Modulação por chaveamento de fase (PSK)

A tecnologia de Modulação por chaveamento de fase - *Phase Shift Keying*(PSK) foi desenvolvida durante os anos iniciais do programa espacial; Nos dias de hoje, a tecnologia é amplamente utilizada nos sistemas de comunicação Militar e Comercial. A expressão analítica de um sistema PSK é dada por: [3]

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}}cos[\omega_0 t + \phi(t)],$$
$$0 \leqslant t \leqslant T; i = 1, ..., M$$

Sendo: T o período, e M a ordem da modulação, e a função $\phi(t)$ tipicamente dada por:

$$\phi(t) = \frac{2\pi i}{M}$$

Para uma modulação Binária com M=2, conhecida como *Binary Phase Shift Keying*(BPSK), tem-se que a fase do sinal $s_i(t)$ é chaveada em dois estados, ou zero ou π

2.4.2 Modulação por chaveamento de frequência(FSK)

A expressao analítica geral de uma modulação por chaveamento de frequência - *Frequency Shift Keying*(FSK) é dada por [3]:

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}}cos[\omega_i t + \phi],$$
$$0 \leqslant t \leqslant T; i = 1, ..., M$$

Sendo: T o período, e M a ordem da modulação.

As modulações do tipo FSK podem não satisfazer o requisito da ortogonalidade, para tanto existem críterios que visam garantir essa ortogonalidade, que também é influenciada pelo espaçamento entre diferentes tons, na prática valores típicos de M utilizados são potências de dois.

2.4.3 Modulação por chaveamento de Amplitude(ASK)

Na Modulação por Chaveamento de Amplitude - *Amplitude Shift Keying*(ASK), a amplitude do sinal assume valores de amplitude diferentes ao longo do tempo, a sua expressao analítica geral é dada por [3]:

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E_i(t)}{T}} cos[\omega_0 t + \phi],$$
$$0 \leqslant t \leqslant T; i = 1, ..., M$$

Sendo: T o período, e M a ordem da modulação.

A técnica de modulação binária ASK, ou seja M=2, foi bastante utilizada em radiotelegrafia no início do século. A modulação ASK não é mais amplamente utilizada em comunicações digitais.

2.5 Taxa de Erro de Bit e Taxa de erro de Símbolo

A taxa de erro de bit, do inglês Bit Error Rate (BER), é uma medida numérica de eficiência para se comparar o desempenho de um par modulador/demodulador. BER é o número de erros de bit dividido pelo total de bits transmitidos. Para o caso em que uma quantidade infinita de bits é transmitida, há mais sentido em falar em probabilidade, ou seja, na Probabilidade de Erro de bit (Pb(e)).

A taxa de erro de símbolo, do inglês *Symbol Error Rate*- (SER), é outra medida numérica de desempenho para comparar a eficiência de diferentes pares moduladores/demoduladores. SER é definido como sendo o número de erros de símbolo dividido pelo total de símbolos transmitidos. Para um espaço amostral infinito, em que uma quantidade infinita de símbolos é transmitida tem-se a Probabilidade de erro de símbolo (Pm (e)).

A probabilidade de erro de determinado tipo de modulação depende de diversos fatores, entre eles, o método utilizado na detecção de bits pelo demodulador, o método de mapeamento de bits utilizado na modulação e a ordem da modulação. A tabela 2.1 contém uma referência dos valores de probabilidade de erro para os mais diversos esquemas de modulação digital. [2]

Tabela 2.1: Tabela de Erros de Probabilidade para as Modulações Digitais mais comuns

Modulação	Probabilidade de Erro
M-PSK	$Pb(e) = \frac{2}{k} Q(\sqrt{\frac{2kEb}{No} \sin \frac{\pi}{M}})$
M-QAM	$Pb(e) = 1 - [1 - \frac{4}{k}(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}) Q(\sqrt{\frac{3k}{(M-1)} \frac{Eb}{No}})]^2$
M-PAM	$Pb(e) = \frac{2(M-1)}{Mk} Q(\sqrt{\frac{6k}{M^2-1} \frac{Eb}{No}})$

2.6 Modelagem do Ruído

Por interferir nos mais diversos tipos de sinais, reduzir ou tentar eliminar o ruído é um grande desafio para a Engenharia de sistemas de telecomunicações. Pois este está presente em todos os meios de comunicação, como na telefonia fixa e móvel, comunicação via satélite, rádio e nos demais sistemas de radiodifusão. Dessa forma, todo o canal de comunicação está sujeito a uma interferência no sinal transmitido. A grande questão nos sistemas de comunicação é de minimizar seus efeitos, para que a perda de informação no receptor seja a menor possível.

Existem diversos modelos matemáticos, que tentam representar os efeitos do ruído nos sinais, dentre eles está um dos mais utilizados e que até os dias atuais, consegue expressar bem os seus efeitos. Este modelo caracteriza o ruído como sendo aditivo, branco e gaussiano denotado pela maioria dos autores como AWGN, sigla para o termo em inglês *Additive White Gausian Noise*.

O termo aditivo para o modelo AWGN do ruído significa que os efeitos causados por este podem ser determinados simplesmente considerando uma adição do sinal de interesse com a interferência ocasionada pelo ruído.

O termo gaussiano, por sua vez indica que ,no modelo, o ruído é representado como sendo um processo randômico, modelado por uma função gaussiana de média zero (Figura 2.4).

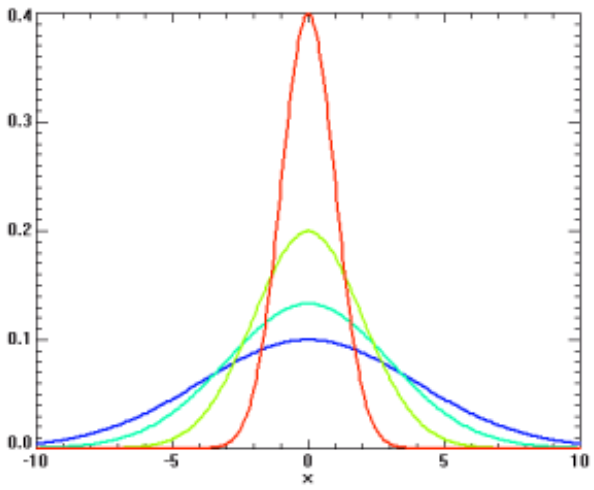

Figura 2.4: Ruídos Gaussianos de diferentes variâncias

2.7 Multiplexação

Técnicas de múltiplo acesso permitem que a fonte de comunicação de um canal seja dividida de uma forma a ser utilizada por vários usuários que desejam se comunicar. Existem diversas diferenças entre Multiplexação e Múltiplo acesso. Múltiplo acesso é referente ao compartilhamento remoto de um canal de comunicação como satélite ou rádio de usuários dispersos em diversos locais. Porém um sistema multiplexado refere-se ao compartilhamento de um canal como de telefone, por usuários confinados em um mesmo local. Em um sistema de múltiplo acesso é desejável que o compartilhamento seja atingido sem causar interferências entre os diferentes usuários do sistema. Existem diversas formas de multiplexação em sistemas de comunicação, a seguir estão destacados os mais utilizados comercialmente nos dias de hoje, sendo elas: [4]

1. Múltiplo Acesso por Divisão de Frequência - *Frequency-Division Multiple Access*(FDMA) : Nesse tipo de técnica de acesso múltiplo, cada banda de frequências é alocada a diferentes usuários em uma base de tempo contínua. Com o objetivo de reduzir interferências entre usuários alocados a bandas de canais adjacentes, são utilizadas bandas de guarda como medida para diminuir a interferência entre diferentes canais. Essas bandas de guarda são imprescindíveis ao sistema em razão da impossibilidade de se produzir um filtro ideal em aplicações práticas.

2. Múltiplo Acesso por Divisão do Tempo - *Time-Division Multiple Access*(TDMA): Nesse sistema de múltiplo acesso, cada usuário utiliza a banda inteira de frequência do canal, mas apenas por certa duração de tempo denominada slot de tempo. Como método de redução de erros e incertezas que surgem das imperfeições dos sistemas, que podem ser gerados por atrasos na recepção, ou transmissão.

3. Múltiplo acesso por Divisão de código - *Code-Division Multiple Access*(CDMA) : Nessa técnica de acesso múltiplo o compartilhamento do canal é feito de forma híbrida, como sendo uma combinação das técnicas de FDMA e TDMA, o que representa uma forma específica de múltiplo acesso por divisão de código chamada de CDMA. Uma importante vantagem do sistema CDMA em relação ao FDMA e TDMA é que este pode ser utilizado de maneira mais segura para sistemas de comunicação.

4. Múltiplo Acesso por Divisão Espacial - *Space-Division Multiple Access*(SDMA): Em técnicas de múltiplo acesso por divisão espacial, o recurso de múltiplo acesso é explorado na separação individual de cada usuário individualmente. Em particular antenas com múltiplos feixes são utilizadas para separar sinais de rádio por meio do diferente apontamento em regiões diferenciadas. Desta forma, diferentes usuários ficam possibilitados a receber o sinal, em uma mesma faixa de frequência, e em um mesmo período de tempo.

2.8 Multiplexação por Divisão Ortogonal de Frequência (OFDM)

A Multiplexação por Divisão Ortogonal de Frequência, do inglês *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*(OFDM) é um subconjunto de multiplexação por divisão de frequência em que um único canal utiliza múltiplas sub portadoras em frequências adjacentes. Além disso, as portadoras

em um sistema OFDM se sobrepõem umas as outras de maneira a maximizar a eficiência espectral. Em geral, quando há uma sobreposição de canais adjacentes há uma interferência de uma portadora em relação a outra, o que prejudica o sinal em questão, todavia, as subportadoras do sistema OFDM são precisamente ortogonais uma a outra. Portanto, é possível sobrepor as portadoras sem que ocorra interferência significativa entre elas. Como resultado, sistemas OFDM são capazes de maximizar a eficiência espectral sem causar interferência entre canais adjacentes. [5]

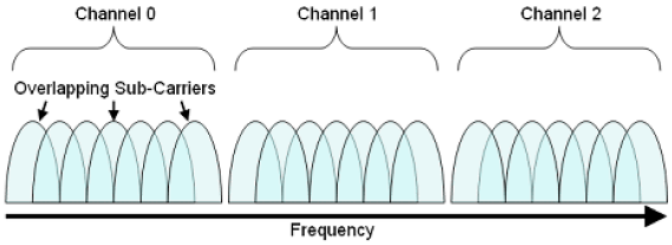

Figura 2.5: Sobreposição de Portadoras

Sistemas de comunicação OFDM são capazes de utilizar o espectro de frequência com uma maior eficiência pois dispensam banda de guarda entre as portadoras pois estas se sobrepõem. Essas portadoras, que são ortogonais, têm a capacidade de se sobrepor sem que haja interferência em função de sua máxima potência ser correspondente a mínima potência da portadora adjacente, como pode ser visto pelo espectro de frequência de um sistema OFDM, figura 2.6.

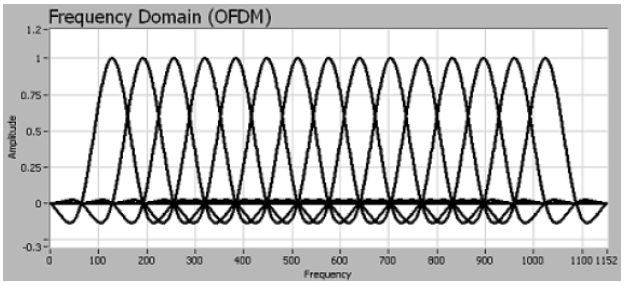

Figura 2.6: Sobreposição de Portadoras Ortogonais

Além da maior eficiência espectral, sistemas que utilizam a tecnologia OFDM permitem que haja uma redução na taxa de transmissão em decorrência do aumento na duração dos símbolos transmitidos em cada subportadora, o que causa uma diminuição da sensibilidade em frequência(dispersão no tempo) causada por multipercursos.

Uma maneira intuitiva de pensar na demodulação de um sinal OFDM é por meio da utilização de osciladores coerentes, o que seria uma maneira complexa e cara. Esses processos de modulação e demodulação, entretanto, podem ser feitos de maneira mais simples utilizando algoritmos da transformada rápida de Fourier (FFT) da transformada inversa rápida de Fourier (IFFT).

O sinal OFDM é resultado do somatório de várias subportadoras. Os sinais de N_s subportadoras QAM espaçadas de $\Delta f = 1/T$ e iniciando em $t = t_s$ são dados por [6]:

$$s_i(t) = Re\{d_i.exp[j2\pi\frac{i}{T}](t-ts)\}, \text{ sendo: } t_s \leq t \leq t_s + T$$
$$s_i(t) = 0, t_s + T < t < t_s$$
$$i = 1, 2, 3, 4, 5, ..., (N_s - 1)$$

O sinal OFDM resultante é então dado por:

$$s_l(t) = Re\{\sum_{i=0}^{N_s-1} d_i.exp[j2\pi\frac{i}{T}](t-ts)\}, \text{ sendo: } t_s \leq t \leq t_s + T$$
$$s_l(t) = 0, t_s + T < t < t_s$$

Portanto, o diagrama de blocos de um receptor analógico OFDM é representado como mostrado na figura 2.7:

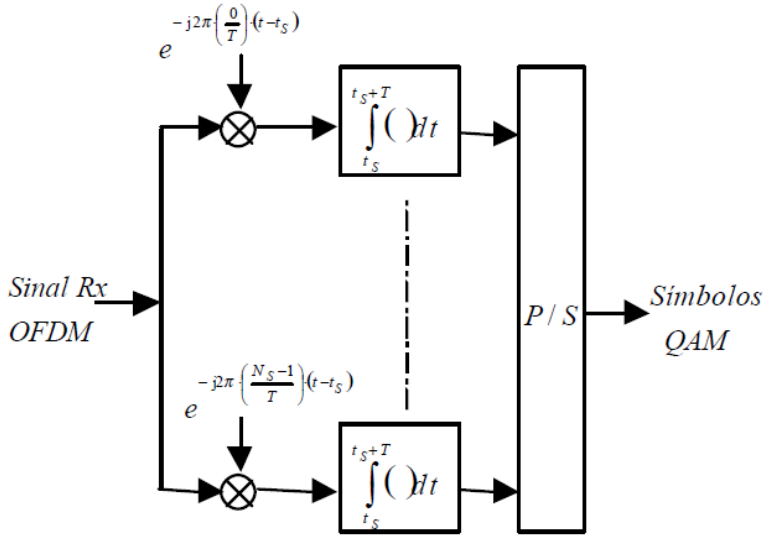

Figura 2.7: Transmissão Analógica OFDM

A recuperação dos símbolos complexos no receptor é realizada pela passagem do sinal OFDM através de um banco de N_s correlatores , seguidos de comparações seguidos de limiares de decisão adequados. Admitindo-se que a entrada do receptor é um sinal sem ruído, a saída do j-ésimo correlator será dada por [6]:

$$r_j = \int_{t_s}^{t_s+T} exp[-j2\pi\frac{j}{T}(t-ts)]s_l(t)dt$$
$$\text{Sabendo que : } s_l(t) = Re\{\sum_{i=0}^{N_s-1} d_i.exp[j2\pi\frac{i}{T}](t-ts)\}$$
$$r_j = \sum_{i=0}^{N_s-1} d_i \int_{t_s}^{t_s+T} exp[-j2\pi\frac{i-j}{T}(t-ts)]dt = d_j.T$$

O sinal complexo OFDM em banda base $s_l(t)$ é equivalente a transformada inversa de Fourier (IDFT) da sequência discreta formada pelos N_s subsímbolos QAM que compõem cada símbolo OFDM. Portanto, na prática são utilizados algoritmos da transformada rápida de Fourier para a modulação e demodulação de sinais OFDM [6].

O diagrama de blocos do receptor pode ser representado pela figura 2.8.

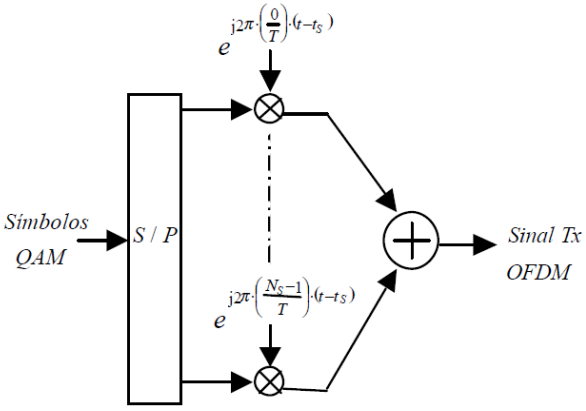

Figura 2.8: Recepção Analógica OFDM

2.9 Capacidade do canal

Considerando todos os multi níveis e multi fases de técnicas de codificação, o teorema de Shannon-Hartley estabelece um limite teórico máximo para a taxa de informação que pode ser transmitida de forma clara. O teorema é baseado considerando que o canal é modelado como sendo AWGN de potência N, com demonstração detalhada em [7] a formulação matemática é expressa por:

$$C = Blog_2(1 + \frac{S}{N})$$

2.10 Modelos de Canal ITU

Existem 3 modelos de canal utilizados pela ITU. Esses modelos são indicados para simulações, nesses modelos a forma de onda recebida pelo receptor é sintetisada em uma taxa $\frac{P}{Tc}$ onde Tc é o intervalo de pulso. e P é o fator de sobre amostragem (*oversampling*), em cada modelo diferente é utilizado um mapeamento ao $\frac{Tc}{P}$ mais próximo. [8]

Nas recomendações da ITU, diversos tipo de modelo são discutidos para uma grande diversidade de canais de comunicação para diversas situações diferentes. Os canais de pedestre são utilizados para modelar um ambiente de usuários tanto dentro de casa como nas ruas, com pequenas células, baixa potência de transmissão fora das estações base e com baixas alturas de antenas. Em constraste ao ambiente de pedestre, o caso veicular também previsto pela ITU, considera grandes tamanhos de céluas e potência transmitida. Existem dois canais que modelam o caso para pedestres, o tipo A e tipo B, sendo que o tipo é definido como o que apresenta pequenos atrasos no caso de espalhamento e o caso B que é definido como o que utiliza a mediana dos atrasos em caso de espalhamento. [9]

Nas simulações apresentadas nesse trabalho, considerando o objetivo de modelar um sistema de comunicação móvel sem fio, foi optada pela utilização do modelo PedB em todas as simulações, de maneira a considerar a mediana dos atrasos devido ao espalhamento e que o sistema analisado

é predominantemente utilizado por usuários móveis que possam ser modelados dessa forma.

2.10.1 Pedestrian A Channel - PedA

A intensidade multicaminho do perfil PedA é definida como:

Tabela 2.2: Modelo de canal PedA ITU

Atraso Relativo	0	110	190	410
Potência Relativa	0.0	-9.7	-19.2	-22.8

2.10.2 Pedestrian B Channel - PedB

A intensidade multicaminho do perfil PedB é definida como:

Tabela 2.3: Modelo de canal PedB ITU

Atraso Relativo	0	200	800	1200	2300
Potência Relativa	0.0	-0.9	-4.9	-8	-7.8

2.10.3 Vehicular-A Channel

A intensidade multicaminho do perfil *Vehicular-A* é definida como:

Tabela 2.4: Modelo de canal Vehicular-A ITU

Atraso Relativo	0	310	710	1090	1730	2510
Potência Relativa	0.0	-1	-9.0	-10	-15	-20.0

Capítulo 3

Antenas

3.1 Antenas

3.1.1 Parâmetros de Radiação

Antenas são importantes dispositivos de propagação eletromagnética, estas permitem a conversão de sinais elétricos em ondas eletromagnéticas, a depender da função para a qual foi projetada para desempenhar. A conversão entre uma onda eletromagnética recebida em um sinal elétrico também pode ser realizada a depender da aplicação para a qual a mesma foi projetada.

Segundo a IEEE, a definição de antenas é dada aos dispositivos de sistemas que transmitem ou recebem ondas eletromagnéticas. A maioria das antenas é tratada como transmissoras ou receptoras e se comportam da mesma maneira, quanto recebem ou quando transmitem sinais. No modo receptivo, antenas se comportam de maneira a coletar ondas e direcioná-las ao ponto de alimentação, onde uma linha de transmissão é fixada. Em alguns casos, antenas focam ondas de rádio, assim como as lentes focam ondas ópticas. Em todos os casos, antenas possuem características direcionais; ou seja, densidade de potência eletromagnética é radiada de uma antena transmissora com intensidade que varia um certo ângulo ao redor da antena. [10]

O padrão de radiação de uma antena fornece a variação angular da radiação a uma distância fixa de uma antena quando a antena está transmitindo um sinal. Quantitativamente, a radiação é o valor da densidade de potência a uma distância fixa da antena. Na recepção, a antena responde a uma onda recebida de alguma direção de acordo com o seu valor padrão de radiação naquela direção. Um padrão típico de radiação para uma antena contém lóbulos principais e secundários, conforme exemplo figura 3.1. [10]

Algumas antenas, com padrão de radiação específico, são consideradas como referência para as mais variadas aplicações. A antena omnidirecional, por exemplo, é uma denominação da característica padrão de radiação constante em algum plano.

A diretividade de uma antena expressa o quão grande o pico de radiação de potência é, se comparado com a potência irradiada por uma antena se esta fosse distribuída uniformemente em

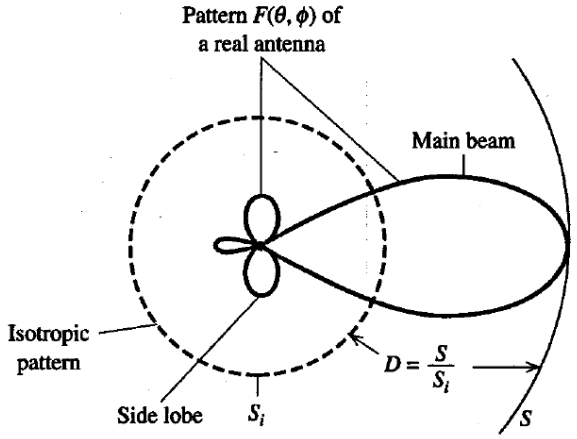

Figura 3.1: Parâmetros e padrão de radiação de uma antena

torno de seu centro. A antena isotrópica é uma denominação de uma antena ideal, que é capaz de irradiar ondas eletromagnéticas uniformemente em torno de seu centro. Dessa forma a diretividade é a potência de uma antena em determinada direção, se comparada à isotrópica. [10]

A impedância de entrada de uma antena é a razão da tensão e corrente nos terminais da antena. O objetivo comum é de casar a impedância de entrada da antena com a impedância característica da linha de transmissão. A largura de banda é a faixa de frequências que pode ser captada pela antena com uma performance aceitável.

3.1.2 Múltiplas Antenas

Assim como mostrado por Shannon em seu teorema, a capacidade de um sistema é limitada a interferência e não pode ser aumentada com o aumento da potência transmitida. Além disso, com o passar do tempo, e o avanço de tecnologias sem fio, o espectro de frequências tem se tornado uma fonte escassa e bastante cara. Aumentar a eficiência espectral por meio de múltiplas antenas transmissoras e receptoras abre uma nova dimensão, o espaço, oferecendo altas taxas de transmissão de bits sem o aumento da potência transmitida e alocação da largura de banda. [11]

Avanços tecnológicos recentes tem mostrado que por meio da utilização simultânea de conjuntos de antenas no transmissor e no receptor, a propagação por caminhos múltiplos pode ser explorada para implementar canais paralelos múltiplos operando simultaneamente e a mesma frequência e com a mesma potência transmitida. [11]

Sistemas SISO, do inglês, *Single Input/Single Output (SISO)*, são sistemas que apresentam uma única saída e uma única entrada, utilizando dessa forma uma única antena transmissora e uma única antena receptora, estes sistemas são modos de comunicação mais comumente encontrados. Sistemas MISO, do inglês, *Multiple Input/Single Output*, possuem múltiplas estações base para transmissao a um usuário. Ainda existem os sistemas SIMO, do inglês, *Single Input/ Multiple Output* que são utilizados em sistemas de uplink via celular, em que o dispositivo possuí uma

antena que transmite para uma diversidade de antenas no receptor. Os sistemas MIMO, *Multiple Input/ Multiple Output*, utilizam múltiplos transmissores e múltiplos receptores. [12]

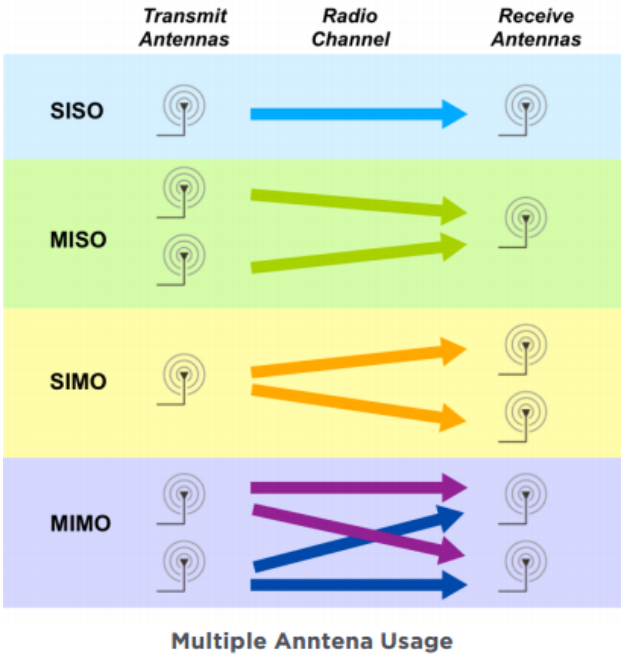

Figura 3.2: Sistemas de Múltiplas Antenas

Enquanto redes de comunicação WiMAX e LTE utilizam a tecnologia 2x2 MIMO (em que são utilizadas duas antenas transmissoras e duas antenas receptoras), sistemas futuros da tecnologia LTE pode vir a utilizar sistemas 4x4 MIMO e até mesmo antenas com configurações de dimensões ainda maiores. É projetado que sistemas avançados LTE terão a capacidade de utilizar sistemas 8x8 MIMO como configuração. [12]

Com utilização de sistemas com múltiplas antenas, sejam elas no receptor ou no transmissor, é possível aumentar o limite da capacidade de transmissão estabelecido por Shannon. Com a utilização de múltiplos receptores, é possivel criar uma certa diversidade para combater o desvanecimento, porém não se altera diretamente o crescimento da capacidade, dessa forma, a formulação matemática da capacidade é alterada para: [11]

$$C = Blog_2(1 + \frac{S}{N})$$

Com a utilização de múltiplos conjuntos de receptores e transmissores, é possivel aumentar diretamente a capacidade do canal, a expressão matemática aproximada para esse tipo de sistemas é dada por:

$$C = M.Blog_2(1 + \frac{S}{N})$$

Desta forma teoricamente é possível dobrar a capacidade de um sistema duplicando o número de transmissores e receptores.

Para ter uma idéia da influência da utilização de múltiplas antenas na capacidade de um sistema de comunicação, é possivel utilizar as equações matemáticas da capacidade para sistemas MIMO, para observar a influência do número de receptores e transmissores no sistema. Considerando o mesmo número de receptores e transmissores (NT=NR), pode-se facilmente implementar uma rotina em MatLab para comparação teórica, o que apresentaria o seguinte resultado:

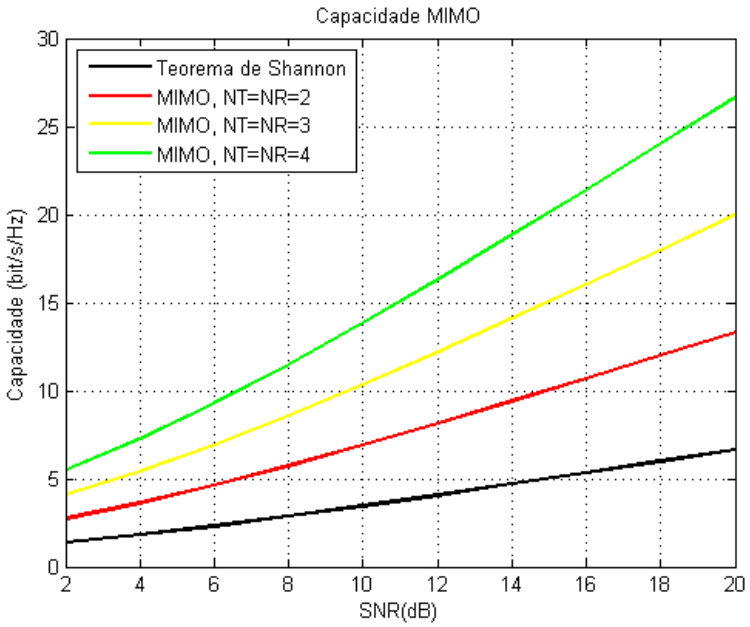

Figura 3.3: Capacidade de Sistemas MIMO comparados com SISO(Teorema de Shannon)

Capítulo 4

Simuladores Computacionais

4.1 A tecnologia 4G e o padrão LTE

Atualmente a tecnologia 4G tem sido muito comentada ao redor do mundo por ser uma tecnologia de transmissao de dados sem fio a altas taxas de transmissão. Mas afinal de contas, em que consiste a tecnologia 4G? Segundo a ITU uma determinada tecnologia é considerada como sendo 4G quando for reconhecida como um sistema IMT-Advanced(4G). Em outubro de 2010 a ITU anunciou oficialmente a LTE-Advanced e WirelessMAN-Advanced, parte do Wimax IEEE 802.16m como tecnologias IMT-Advanced(4G). Essas tecnologias têm sido altamente difundidas ao redor do mundo e são implementadas com diversas taxas de transmissão que estão relacionadas com a velocidade do sistema. Dessa forma, estudar esse tipo de tecnologia, hoje em acensão, é importantíssimo para que tecnologias ainda mais avançadas possam ser desenvolvidas. Com o objetivo de estudar meios de otimização dos mais diversos sistemas de comunicação a Universidade de Vienna na Áustria desenvolveu o pacote de simulações LTE que permite analisar os mais diversos parâmetros envolvidos em uma conexão e em um sistema de comunicação. Nas próximas seções serão apresentados maiores detalhes sobre o pacote.

4.2 Simuladores LTE de Vienna

LTE, *Long Term Evolution*, é atualmente um passo revolucionário para sistemas futuros de comunicação sem fio de sistemas móveis.LTE foi introduzido no lançamento da parceria de projetos da terceira geração e contém inovações surpreendentes com relação a gerações de comunicação do passado. Uma das principais razões para as grandes mudanças na rede de acesso de rádio, *Radio Access Network* - (RAN) é a de oferecer uma maior eficiência espectral, menor atraso, e maior número de usuários flexíveis do que as redes de comunicação anteriormente utilizadas.

Com o objetivo de desenvolver os padrões LTE, assim como seu processo de implementação de fabricantes de equipamentos, há a necessidade de criar simulações para testar e otimizar algorítmos e procedimentos. Para tanto, faz-se necessário a utilização de simulações em nível de conexão e de sistema. Com essa visão, membros do instituto de telecomunicações da Universidade de Tecnologia

de Vienna criaram dois simuladores que permitem reproduzir a tecnologia LTE de sistemas de comunicação sem fio. Ambos os simuladores possuem códigos fonte disponíveis em uma versão acadêmica, não comercial, permitindo sua utilização por pesquisadores que desejem estudar e ter acesso e compreensão a respeito do padrão LTE.

4.2.1 Simulador em nível de conexão

O simulador em nível de conexão, *Link Level Simulator*, permite observar diversos parâmetros a respeito de uma conexão estabelecida, utilizando o padrão LTE. Por meio deste simulador, é possivel observar diversos fenômenos, parâmetros e diversas medidas que devem ser consideradas para utilização de tal tecnologia permitindo analisar e explorar os mais diversos graus de liberdade do sistema, em busca de melhorias e aperfeiçoamentos. Nesse tipo de simulação, o sistema é representado basicamente por três blocos principais, sendo eles: Transmissor, Canal e Receptor, como pode ser visto na figura 4.1.

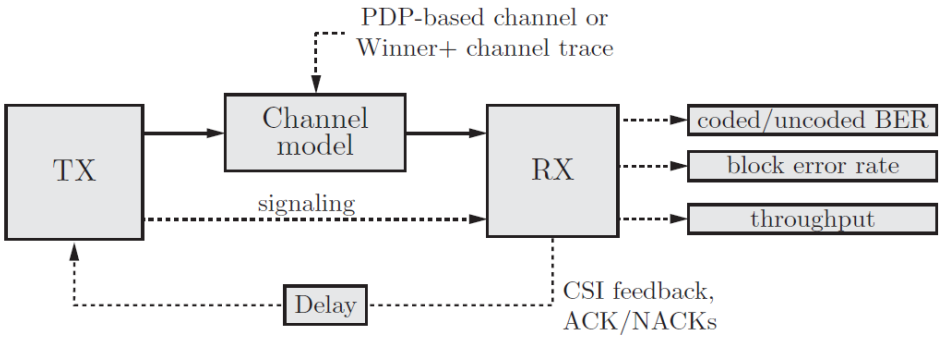

Figura 4.1: Diagrama de Blocos do Simulador a nível de Conexão

4.2.1.1 Transmissor

Os algoritmos que fazem parte desse bloco são responsáveis por diversas funções que permitem que o sinal seja transmitido. Nesse bloco, se encontram os blocos fonte para a transmissão do sinal. Nessa etapa, o sinal é modulado, podendo utilizar os mais diversos esquemas de modulação como modulações 4,16 ou até mesmo 64-QAM. Nesse bloco também são determinados os modos de transmissão, como por exemplo, múltiplas saídas que poderão formas sistemas MIMO ou MISO. Tal bloco permite explorar diversidade de frequências, diversidade de tempo, diversidade espacial e até mesmo a diversidade de múltiplos usuários [13]. O diagrama de blocos detalhado do transmissor empregado na simulação desse pacote pode ser visto na figura 4.2.

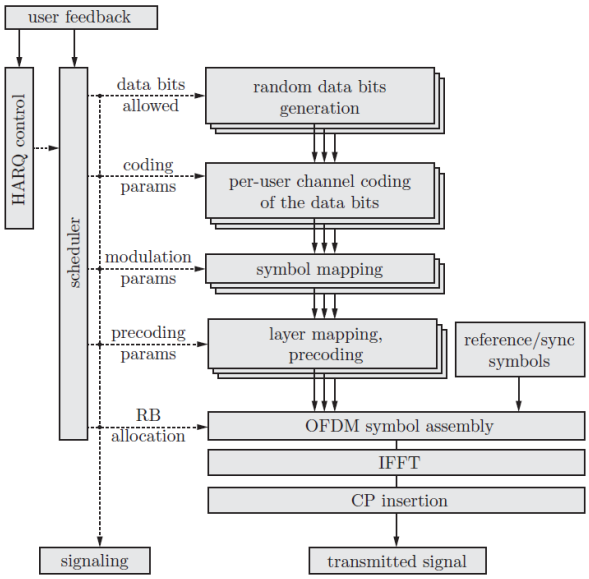

Figura 4.2: Diagrama de Blocos Transmissor

4.2.1.2 Canal

É importante que esse tipo de simulação leve em consideração que o sinal enfrenta diferentes meios para chegar ao receptor, para tanto o simulador possui diversos modelos de canal que podem ser utilizados, incluindo modelos que consideram o desvanecimento que o canal pode oferecer ao sinal. Até a versão utilizada, esse bloco possuía suporte aos seguintes modelos:
a) Ruído Aditivo Branco Gaussiano (AWGN)
b) Desvanecimento Plano de Rayleigh
c) Modelos de canal baseados em perfil de atraso de potência, como *ITU Pedestrian B,* ou ITU vehicular A
d) *Winner Phase II+*

4.2.1.3 Receptor

No receptor, são feitas as detecções necessárias para receber um sinal multiplexado, podendo ser um sinal OFDM, por exemplo. Esse bloco oferece suporte a técnicas de *Zero-Forcing(ZF)*, *Least Minimum Mean Square Error (LMMSE)*, e diversas técnicas de decodificação para obter os bits de dados. Além disso, ainda oferece suporte a observação de diversas figuras de mérito utilizadas, como: BER, BLER e capacidade.

Na versão mais atual do simulador, este oferece suporte a quatro diferentes tipos de estimadores de canal sendo eles:
a) Least Square;
b) Minimum Mean Squared Error (MMSE);
c) Aproximate LMMSE;

d) Genie-Driven perfect channel knowledge.

O diagrama de blocos detalhado do modelo de receptor utilizado pelo simulador pode ser visto pela figura 4.3.

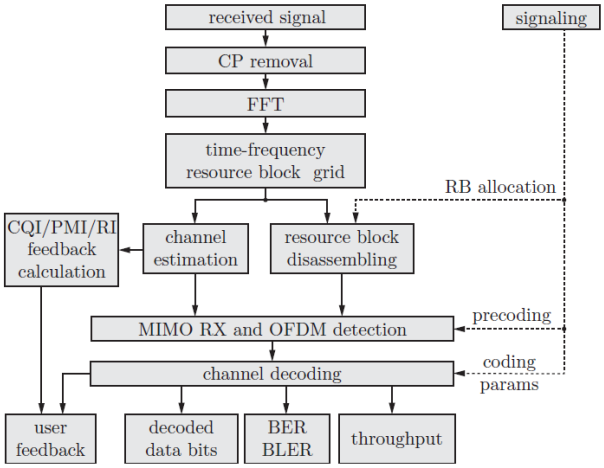

Figura 4.3: Diagrama de Blocos Receptor

4.2.2 Simulador em nível de sistema

Em simulações a nível de sistema, o objetivo é analisar o desempenho do sistema como um todo. Em LTE, tal rede possui uma grande quantidade de eNodeBs(hardware que é conectado a rede do sistema de telefone que se comunica diretamente com os aparelhos celulares) que cobrem áreas específicas nas quais os terminais móveis estão localizados ou se movem ao redor. Simples realização de simulações de várias conexões entre os terminais e estações base ao mesmo tempo, são intangíveis para simulações do sistema por requerer enormes recursos computacionais. Dessa forma é necessário utilizar modelos mais abstratos e simplificados que capturem a dinâmica essencial do sistema, com alta acurácia e baixa complexidade. A figura 4.4 mostra três diferentes cenários que podem ser ajustados por meio deste tipo de simulação.

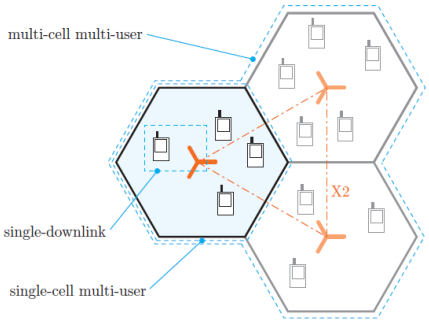

Figura 4.4: Cenários que podem ser ajustados na simulação em nível de sistema

O simulador a nível de sistema é constituído de duas partes: (i)um modelo de medição de conexão e (ii) um modelo de desempenho de conexão. O modelo de medição consiste em um modelo que reflete a qualidade da conexão, informada por um equipamento de medição. O modelo de qualidade é avaliado por subportadora. Baseado na medida SINR(Signal to Interference and Noise Ratio), o equipamento do usuário UE, computa a realimentação (PMI, RI, e CQI), que é empregado na adaptação na eNodeB. O algoritmo então atribui recursos aos usuários para otimizar o desempenho do sistema (por exemplo, com relação a sua capacidade) baseado na realimentação. Seguido do modelo de medição da conexão, o modelo de desempenho de conexão prevê um valor para BLER da conexão, baseado no valor SINR recebido e os parâmetros de transmissão (por exemplo: modulação e codificação). A figura 4.5, mostra o diagrama de blocos que representa a relação entre os dois modelos. [13]

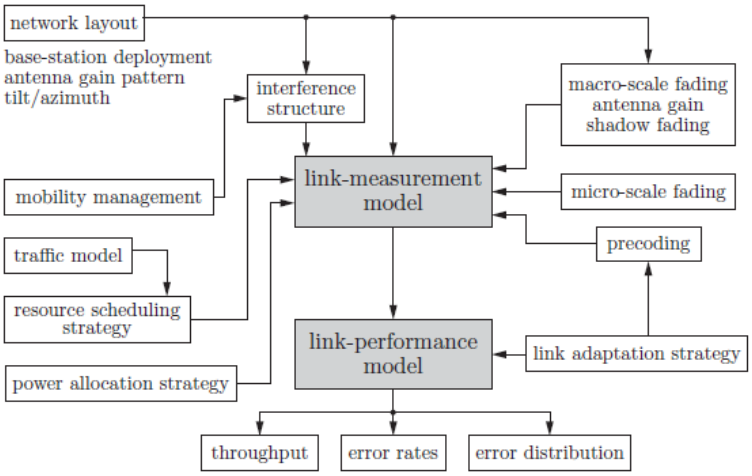

Figura 4.5: Diagrama de Blocos do Simulador a nivel de sistema

4.2.3 Comparação entre os simuladores em nível de sistema e de conexão

Para demonstrar a validade de seu simulador a nível de sistema, os desenvolvedores por meio da utilização de um cenário com único usuário em uma única célula com os parâmetros especificados na tabela da figura 4.6, puderam realizar uma simulação comparativa entre os dois modelos.

TEST SCENARIOS FOR THE CROSS-COMPARISON OF THE LINK AND SYSTEM LEVEL SIMULATORS (SU CASE).

	SISO	TxD	OLSM	CLSM
channel	TU[3]	TU	TU	TU
bandwidth	1.4 MHz	1.4 MHz	1.4 MHz	1.4 MHz
antenna conf.	1×1	2×2	2×2	4×2
CQI feedback	✓	✓	✓	✓
RI feedback	×	×	✓	✓
PMI feedback	×	×	×	✓
simulation time LL	3 200 s	9 500 s	19 500 s	14 200 s
simulation time SL	800 s	1 000 s	1 100 s	1 200 s
speed-up	4	9.5	17.7	11.8

Figura 4.6: Parâmetros utilizados na simulação comparativa

Assim como pode ser visto na figura 4.7, que apresenta a capacidade para os dois modelos, para todas as considerações deste cenário há uma excelente compatibilidade entre os resultados, confirmando a validade do modelo de previsão de erros de conexão utilizado na simulação a nível de sistema.

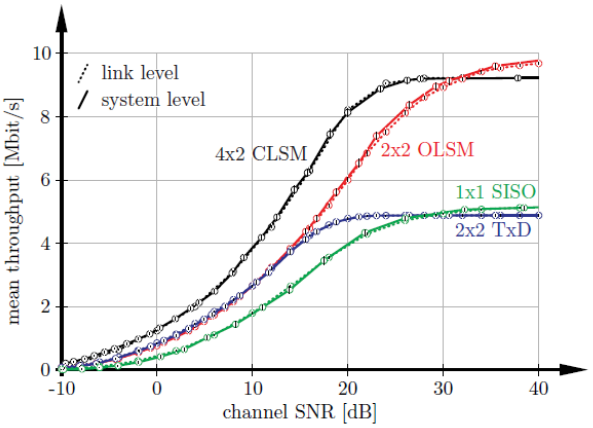

Figura 4.7: Capacidade do Canal em ambos os modelos de simulação

4.2.4 Modelos de Modulações Digitais disponíveis

Para simulações utilizando o pacote de Vienna, é possível utilizar diferentes tipos de modulações digitais, de diferentes ordens e diferentes valores de *ECR- Effective Code Rate*, que é basicamente o razão entre os bits de informação útil e o número de bits gerados pelo transmissor. Dessa forma quanto menor o valor de ECR, maior o número de redundâncias que são adicionadas a informação útil. A tabela da figura 4.8, mostra os tipos de modulação e os valores de ECR disponíveis para utlização.

CQI	Modulation	ECR	ECRx1024 [11]
1	4QAM	0.0762	78
2	4QAM	0.1172	120
3	4QAM	0.1885	193
4	4QAM	0.3008	308
5	4QAM	0.4385	449
6	4QAM	0.5879	602
7	16QAM	0.3691	378
8	16QAM	0.4785	490
9	16QAM	0.6016	616
10	64QAM	0.4551	466
11	64QAM	0.5537	567
12	64QAM	0.6504	666
13	64QAM	0.7539	772
14	64QAM	0.8525	873
15	64QAM	0.9258	948

Figura 4.8: Modulações disponíveis

4.3 Simuladores GRADMAX

O *GRADMAX* é um simulador de antenas a fio que implementa o método dos momentos [14] que é normalmente utilizado para obter soluções aproximadas da distribuição de correntes em uma antena de onde o comportamento elétrico pode ser obtido. Suas principais propriedades são [14]:

1. Análise de um antena a fio utilizando o método dos momentos:

a) Impedâncias de entrada em todos os pontos de alimentação;

b) Cálculo do ganho máximo da estrutura;

c) Padrão de radiação da estrutura analisada.

2. Possibilidade de simulação utilizando elementos concentrados (como capacitores e indutores).

3. Otimização de conjuntos de monopolo (ângulo e espaçamento).

4. A possibilidade de simular um plano terra perfeito (plano xy).

Além disso, o método do gradiente modificado também foi implementado ao GRADMAX de maneira a permitir encontrar geometrias que possam maximizar o ganho (essa opção não foi utilizada pelo presente trabalho). Tanto o formato do fio quando a distância entre os fios podem ser otimizados, mesmo que restritos aos monopolos. O método do gradiente tem a vantagem de ser mais robusto e aplicável a uma variedade ampla de problemas. [14]

4.3.1 GRADMAX *for web*

O código GRADMAX *for web* oferece diversos recursos e foi implementado em tecnologia *Java-applet*. Podendo ser rodado de qualquer plataforma que possuia suporte a linguagem *Java*. Além disso, está disponível no sítio: http://www.ene.unb.br/terada/antennas.

4.3.1.1 Visão geral do programa

Após abrir o endereço do programa, é aberta uma página que apresenta os recursos principais que são oferecidos. Por meio da aba principal do programa é possivel navegar em opções distintas de inserção de dados e outras funções. A figura 4.9 mostra como é a interface do programa e quais são as opções presentes na barra de menus do programa, sendo elas:

Definições(*Definitions*): Permite ter acesso a examplos pré-existentes e mudar a frequência do projeto, o número de fios, o número de cargas, o número de excitações e o valor desejado para truncamento.

Geometria da Antena(*Antenna Geometry*): Permite ter acesso a geometria de cada fio que compõe a antena, permitindo ter informação as coordenadas de cada um.

Controle(*control*): Fornece o acesso a excitação de cada fio, permitindo que sejam observados os valores e tensão(módulo e fase) e o número de pulsos.

Otimização(*Optimize*): Otimiza o diagrama e os parâmetros da antena baseado em dois critérios, o do ângulo e do da distância para que seja obtida uma antena com ganho na direção X otimizado. Essa opção não foi utilizada no presente trabalho, pois esse procedimento foi realizado por meio de algorítimos genéticos.

Importar e Exportar(*Import and Export*): Importa ou exporta valores de parâmetros obtidos em outras simulações.

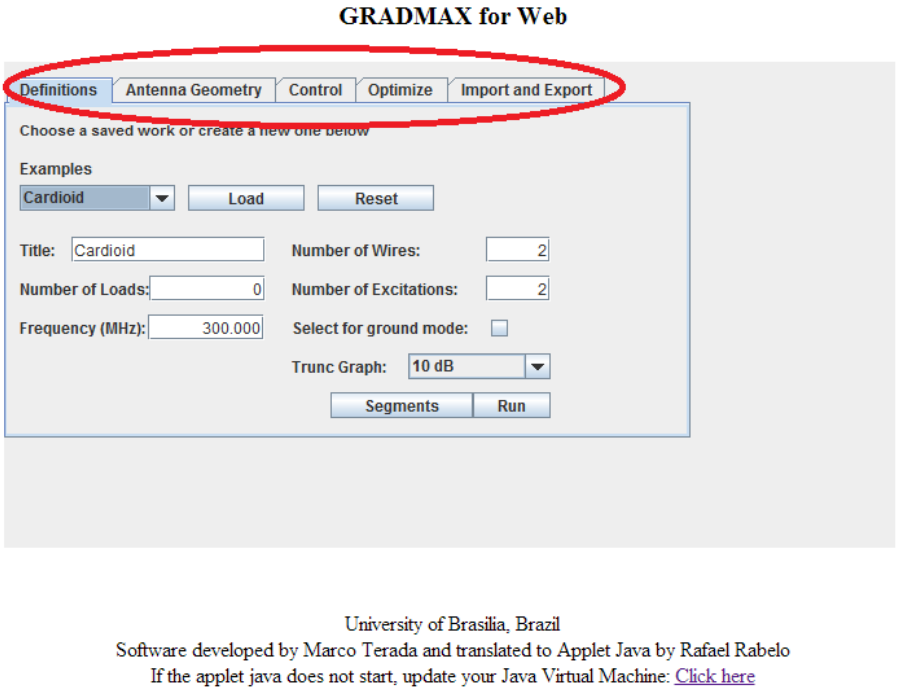

Figura 4.9: Janela de exibição do GRADMAX *for web*

O resultado típico do diagrama de radiação de uma antena com padrão de "Cardióide"é um exemplo contido no programa, e é apresentado na figura 4.10.

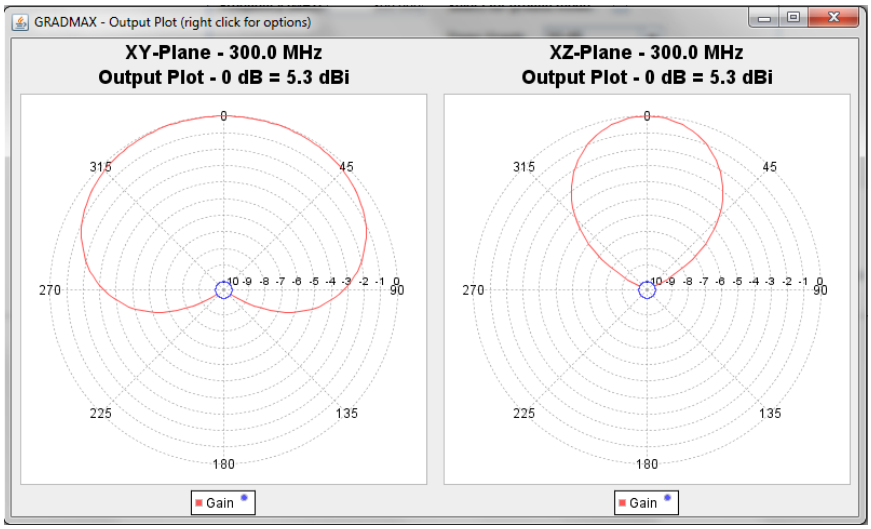

Figura 4.10: Janela de exibição - Diagrama de radiação Cardióide GRADMAX*for web*

Além do diagrama de radiação, o programa ainda apresenta ao fim da simulação, uma janela de resultados, que exibem informações importantes da simulação, contendo: As informações de alimentação para cada fio, e os ganhos original e após as iterações realizadas. Uma janela típica, também para o problema da Cardióide, pode ser encontrada na figura 4.11.

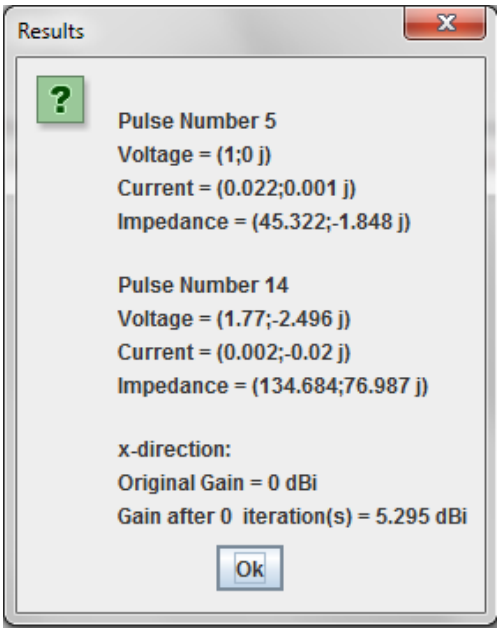

Figura 4.11: Janela de exibição de resultados GRADMAX*for web*

Capítulo 5

Resultados Computacionais

5.1 Introdução

Este Capítulo é dedicado a inclusão das simulações computacionais realizadas, e seus respectivos resultados. Os programas LTE Link Level Simulator [15] é um pacote de simulação, desenvolvido em linguagem C e Matlab, para simular um sistema de transmissão e recepção do sistema 4G LTE de comunicações móveis, sendo possível observar os mais diversos fenômenos relacionados a transmissão de sinais nessa tecnologia. O GRADMAX, por sua vez, foi utilizado para determinar os parâmetros ótimos de uma antena, para os parâmetros de transmissão desejados.

5.2 Simulação teórica das taxas de erro de bit utilizando a ferramenta Bertool

Inclusos ao toolbox de comunicações do Matlab, podem se encontrados diversos recursos que permitem analisar o desempenho, por meio da taxa de erro de bit (BER), de diversos sistemas de modulações digitais diferentes. Nesse toolbox, é possível plotar curvas de diversos sistemas diferentes, como QSPK, QAM, PAM entre outros. Por meio dessa ferramente também é possível analisar a influência do modelo do canal, sendo possível selecionar três tipos de modelos(AWGN, Rayleigh, Rician). Pela utilização dessa ferramenta, foi possível analisar a influência da ordem de modulação em sistemas de comunicação, tendo uma boa referência teórica para as demais simulações.

Essa ferramenta foi então utilizada para comparar o desempenho de dois sistemas, sendo eles o QAM16 e o QAM64, ambos em um canal AWGN, conforme figura 5.1.

Como podemos ver pela figura 5.1, a modulação QAM16 possui melhor performance do que a modulação QAM64, isso se deve ao fato de que para uma mesma relação sinal ruído, o esquema de modulação QAM de ordem inferior, apresenta menores erros e portanto, uma menor taxa de erro de bit. Todavia, como será visto nas próximas seções o esquema QAM64 ainda sim é vantajoso, pois pode possiblitar maiores capacidades de transmissão, visto que uma quantidade maior de bits

é utilizada para representar um único símbolo.

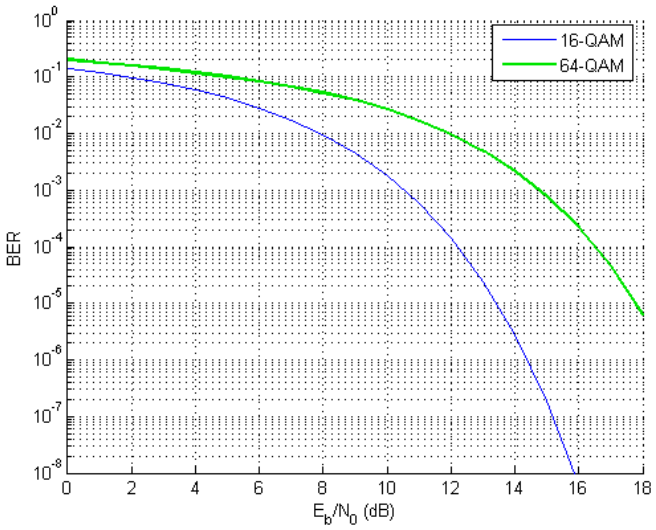

Figura 5.1: Curvas teóricas QAM16 e QAM64

5.3 Simulação de um Canal de Comunicação utilizando LTE Link Level Simulator

Nessa seção são apresentadas diversas simulações computacionais com o objetivo de facilitar a compreensão e a interpretação do funcionamento de sistemas SISO e MIMO para diferentes tipos de modulações digitais, observando quais fatores influenciam a taxa de transmissão e a taxa de erro desses sistemas de comunicação. Ao final dessa seção também é apresentada uma comparação entre os resultados obtidos com as simulações utilizando o LTE Link Level Simulator, e as curvas teóricas referentes a esses sistemas.

Para as simulações iniciais para os sistemas QAM-16 e QAM-64 tanto em SISO como em MIMO 2x2 foram utilizadas portadoras de frequência 5.8GHz e largura de banda de 20MHz(largura de banda mais utlizada pelas operadoras 4g ao redor do mundo). Para as simulações tambem preferiu-se escolher as modulações com os menores valores de ECR possiveis para que o sinal transmitido possuísse o maior número de informação redundante possivel.

5.3.1 Avaliação do Sistema em QAM-16 e QAM-64 em modo SISO

Para essa simulação, utilizou-se o simulador a nível de conexão para poder estabelecer uma comparação entre os dois tipo de modulação digital, possibilitando-se assim como comparação prática entre os dois tipo de ordem de modulação. Simulou-se para tanto, ambos os tipos de modulação em modo SISO, ou seja, uma utilizando-se uma antena transmissora e uma única antena receptora. Essas simulações foram realizadas independentemente em que foram inclusos os resultados em um único gráfico, como apresentado nas figuras 5.2 e 5.3. Sendo uma curva para a

taxa de erros de bloco e a outra para a taxa de transmissão respectivamente.

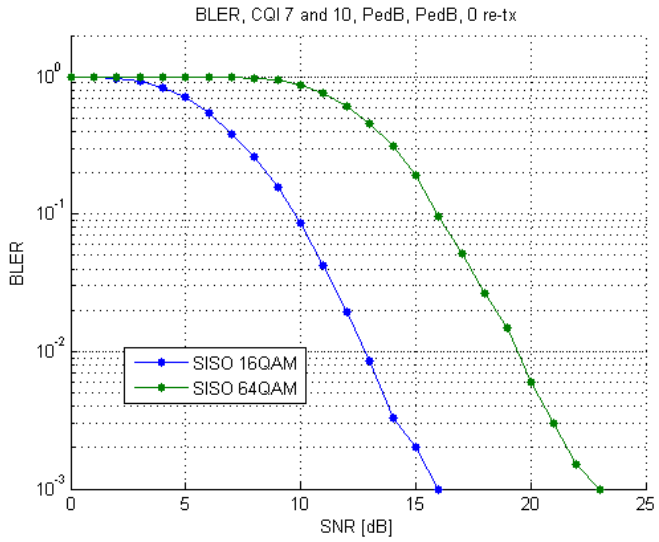

Figura 5.2: Curvas BLER simuladas QAM16 e QAM64 SISO

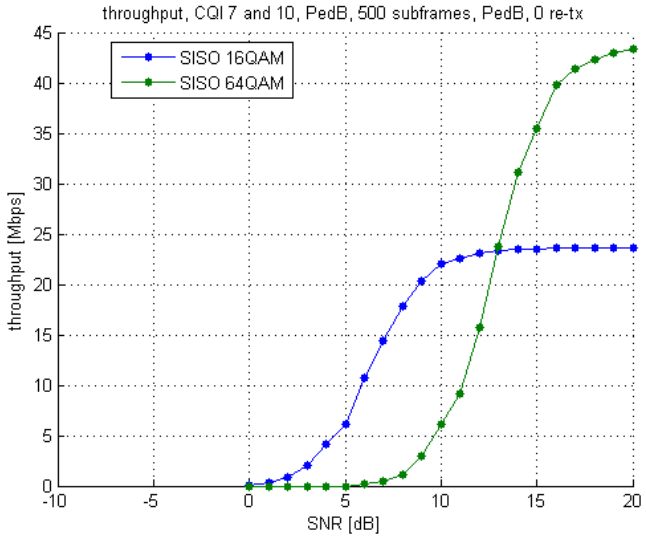

Figura 5.3: Curvas Taxa de transmissão simuladas QAM16 e QAM64 SISO

5.3.2 Avaliação do Sistema em QAM-16 e QAM-64 em modo MIMO 2x2

Para esta segunda seção, foram simulados por meio do simulador a nível de conexão, dois cenários para diferentes modulação(QAM16 e QAM64) para um sistema em modo MIMO, utilizando-se duas antenas transmissoras e duas antenas receptoras com o mesmo sinal transmitido, com o objetivo de proporcionar uma comparação entre o sistema SISO e observar quais as vantagens de se implementar um sistema com múltiplas antenas ao invés do sistema SISO convencional que utiliza apenas uma única antena transmissora e uma única antena receptora. Assim como os resultados para taxas de erro e de capacidade de transmissão sugerem, o sistema MIMO é um sistema que

apresenta taxas de erro equivalentes porém a menores valores de SNR, o que torna esse tipo de sistema mais eficiente para uma mesma capacidade de transmissão, visto que a relação sinal ruído para um mesmo valor de BLER e Taxa de transmissão são menores. Os resultados para a taxa de erro de bit e capacidade de transmissão podem ser observados pelas figuras 5.4 e 5.5

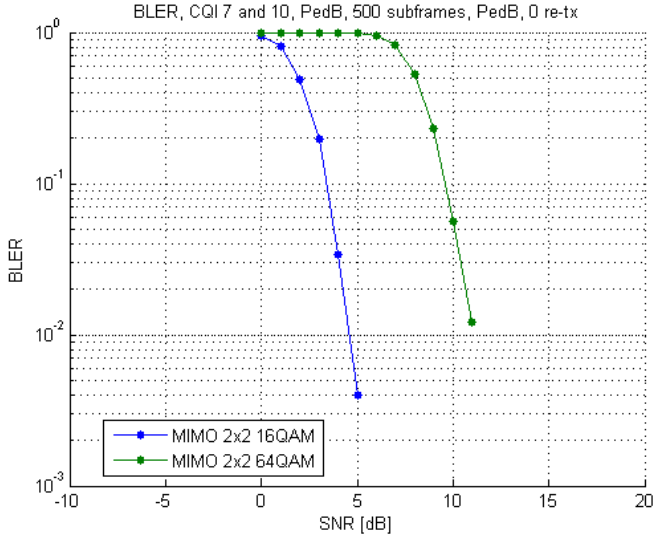

Figura 5.4: Curvas BLER simuladas QAM16 e QAM64 1

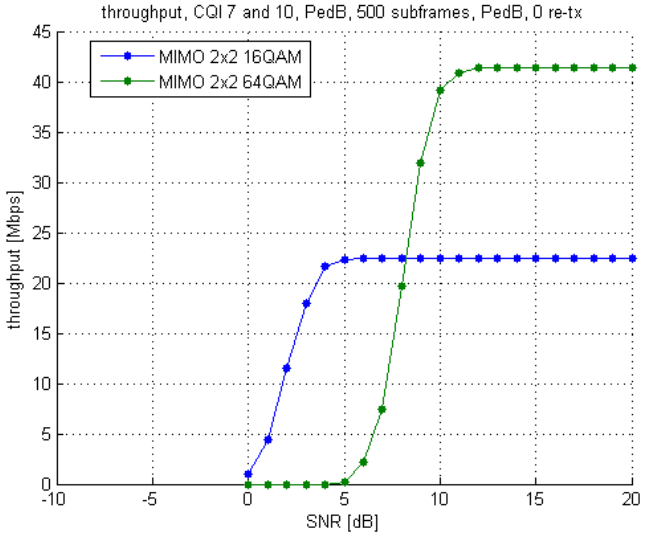

Figura 5.5: Curvas Taxa de transmissão simuladas QAM16 e QAM64 2

5.3.3 Interpretação dos resultados de processamento de dados

Para facilitar a interpretação de resultados e para utilizar os resultados nas próximas seções, fez-se necessária a troca de figura de mérito, utilizando-se BER ao invés de BLER, de maneira a ter uma comparação entre resultados, mais intuitiva. Modificando o código utilizado no pacote LTE de Viena, foi possível obter um novo resultado como mostrado na próxima figura 5.6.

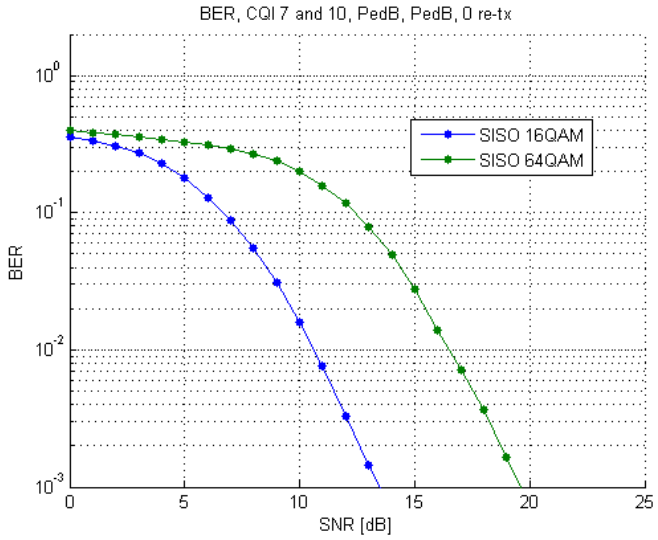

Figura 5.6: Taxa de erro de bit para QAM-16 e QAM-64

Outra conclusão importante a respeito das simulações realizadas com sistemas QAM-16 e QAM-64, é a de que os sistemas em QAM-64 são menos robustos ao ruído, e portanto apresentam maiores taxas de erro a maiores valores da relação sinal ruído, esse importante resultado será utlizada em seções futuras para se analisar o projeto de uma antena que leve em consideração interferências em outros enlaces de diferentes modulações.

Para esse cenário, pode-se determinar a diferença das relações sinal ruído entre a modulação QAM16 e QAM64 para uma taxa de erro de 10^{-3} que foi de aproximadamente 6dB, conforme pode ser observado pela tabela 5.1.

Tabela 5.1: Tabela com as relações sinais ruídos QAM16 e QAM64

BER	SNR QAM16 [dB]	SNR QAM64 [dB]	Diferença entre BER
10^{-1}	6.5	12	5.5
10^{-2}	11	16.5	5.5
10^{-3}	13.5	19.5	6

5.4 Otimização dos parâmetros de Antenas

Para essa seção relacionada a otimização, foi proposto um cenário em que existem diversos sistemas de transmissão de maneira a estudar a otimização de um projeto de uma antena que direcione a maior parte de sua energia para um sistema de modulação que seja menos robusto. O sistema mais sensível ao ruído não deve receber taxas de ruído menores do que o especificado e para isso a antena deve ser projetada de forma que a energia introduzida por seus lóbulos secundários não seja muito grande. Portanto, o objetivo principal dessa seção é de estudar maneiras de projetar uma

antena que seja adaptada a um cenário específico de transmissões, como detalhado nas próximas seções.

5.4.1 Cenário proposto para otimização

Para o cenário proposto, considerou-se dois enlaces "A"e "B", utilizando modulação QAM-16, dois enlaces "C"e "D", em modulação QAM-64, de maneira que a o sistema A estabeleça sua conexão com um sistema no centro da área delimitada por esses enlaces, como pode ser visto na figura 5.7

A antena a ser otimizada nesse cenário é a antena central, ou seja, transmissora que estabelece o enlace com "A"e cujos lóbulos secundários podem interferir no sinal dos demais enlaces, podendo interferir e muito no sinal dos outros enlaces, prejudicando assim, possíveis operadoras além de estar disperdiçando potência que poderia estar sendo melhor utilizada na tranmissão do sinal de forma útil a seus usuários.

A tabela 5.2, contém os dados necessários para a otimização, entre eles o posicionamento das antenas, expresso em coordenadas polares e a modulação utilizada.

Tabela 5.2: Tabela com as relações sinais ruídos QAM16 e QAM64

Raio	Ângulo(graus)	Modulação	Maior diferença entre o lóbulo adjacente
R	0	QAM-64	6 dB
R	90	QAM-16	6 dB
R	180	QAM-16	6 dB
R	270	QAM-16	6 dB

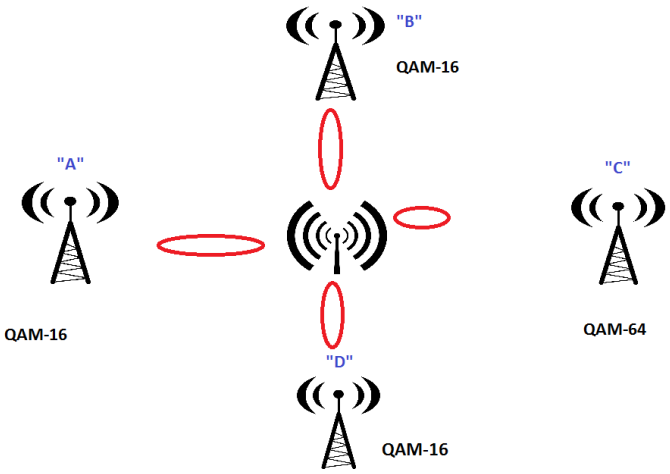

Figura 5.7: Cenário Proposto para otimização

Portanto, assim como brevemente abordado no capítulo a respeito de antenas, a energia que é

transmitida pelos lóbulos laterais será observada por meio da análise do diagrama típico de radiação desta. Para essa parte de otimização, e representação do diagrama de radiação, será utilizado o programa GRADMAX, como descrito na próxima seção.

5.5 Métodos de Otimização

Existem basicamente dois métodos para realizar a otimização do diagrama de radiação da antena proposta no cenário descrito na seção anterior. O método convencional consiste em diminuir para o menor valor possível a potência irradiada na direção do sistema menos robusto ao ruído, o problema nesse método é que se há uma conexão com um sistema mais robusto, disposto em simetria ao menos robusto, há um maior custo no projeto da antena, visto que a antena para tal tarefa é mais diretiva, podendo ter um custo maior. Por outro lado, há um método que consiste em criar uma antena assimétrica que considera a robustez de todas as outras conexões e que permite projetar uma antena menos diretiva que consiga atender a todos os requisitos mínimos de ruído de todos os enlaces.

Nas subseções a seguir, são apresentados ambos os métodos, como cada um é implementado, e como podem ser utilizados para o cenário desejado, na seção a respeito do métodos para antenas assimétricas, é ainda apresentado as simulações computacionais para o cenário proposto, desenvolvidas por meio do software GRADMAX, bem como por algorítimos genéticos.

5.5.1 Método para Antenas Simétricas

Nessa seção são discutidas diversas técnicas possiveis para se obter diagramas simétricos.

5.5.1.1 Método de Conjunto Linear de Dolph-Chebyshev

Essa técnica é baseada nos polinômios de Chebyshev, que são da forma:

$$T_m(x) = \begin{cases} (-1)^m \cosh(m \cosh^{-1} |x|) & \text{se} \quad x < -1 \\ \cos(m \cos^{-1} x) & \text{se} \quad -1 \leq x \leq 1 \\ \cosh(m \cosh^{-1} x) & \text{se} \quad x > 1 \end{cases}$$

Em que a ordem do polinômio dada por m é igual ao número de raízes. Nesse método se toma um conjunto alimentado simetricamente em relação a linha central que possui *2N+1* ou *2N* elementos. Expande-se então o conjunto de fatores em um polinômio com fatores $\cos(\Psi/2)$, onde $\Psi = kd\cos\theta + \delta$. O pico ocorre quando $\Psi = 0$. Se fizermos a correspondência para o valor *xo*, onde o polinômio de Chebyshev possui um valor R, os lóbulos laterais serão iguais a ondulação no nível *1/R*. Substituindo $x = x_0 \cos(\Psi/2)$, utilizamos o polinômio de Chebyshev para o conjunto polinomial como [16]:

$$T_m(x_0) = R$$

ou

$$x_0 = cosh\frac{R\cosh^{-1}}{m}$$

Em que 20 log R é o lóbulo lateral desejado em decibéis. Os zeros de *Tm(x)* são dados por:

$$x_p = \pm\cos\frac{(2p-1)\pi}{2m}$$

Utilizando a equação $x_p = x_0\cos\frac{\Psi}{2} = x_0(e^{j\Psi/2} + e^{-j\Psi/2})$, calcula-se então os ângulos dos zeros simétricos no plano W:

$$\Psi_p = \pm 2\arccos\frac{x_p}{x_0}$$

Ambos os valores de Ψ_p fornecem o mesmo par Ψ_p. Dados os zeros no plano W, multiplica-se as raízes do polinômio para calcular os coeficientes de alimentação do conjunto.

Em [16] é possível encontrar um exemplo de um projeto de uma antena utilizando o método de Chebyshev, em que se projetou uma antena com lóbulos laterais de 25dB. Como pode ser visto pelo diagrama de radiação da antena projetada e cujo diagrama de radiação resultado está apresentado na figura 5.8

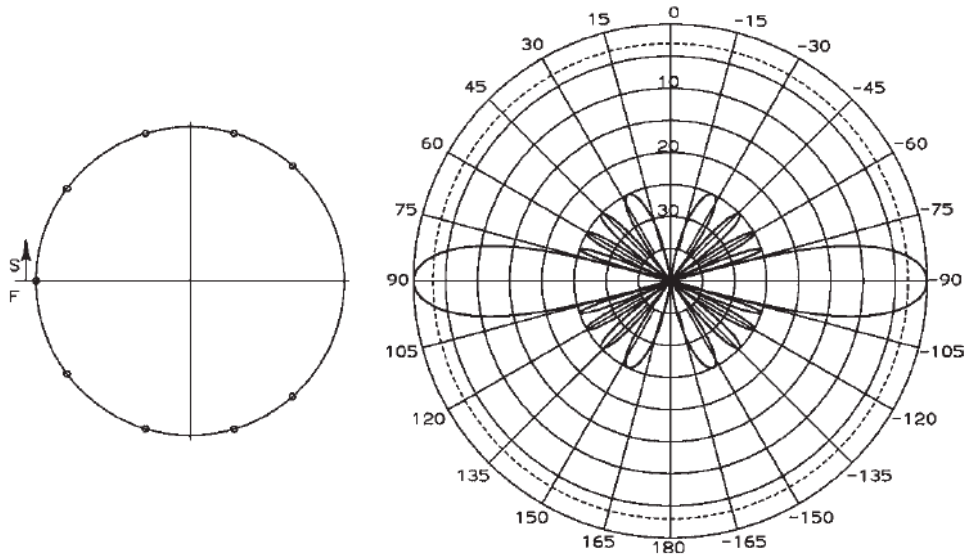

Figura 5.8: Antena projetada para lóbulos laterais de 25dB

Como pode ser visto pela figura 5.8, os lóbulos laterais apresentam as especificações desejadas, apresentando ainda simetria no plano W, dessa forma, como pode ser visto, o método é bastante eficaz ao se projetar uma antena com lóbulos laterais que atendam o desejado mas que não seja muito diretiva, visto que todo o seu projeto, leva em consideração que esta deve possuir diagrama de irradiação simétrico. Outros importantes métodos de projeto de antenas simétricas, baseado no método de Chebyshev, fogem ao escopo desse trabalho e podem ser encontrados em [16].

5.5.2 Método para Antenas Assimétricas

Os métodos para criar antenas assimétricas ainda são bastante limitados e sua abordagem é bastante diferente do método para antenas simétricas, esses métodos geralmente consistem em criar um padrão de radiação desejado e a partir de uma aproximação inicial, fazer com que o diagrama convirja para o desejado, permitindo obter assim os parâmetros necessários para isso.

Algoritmos com a finalidade de convergir uma antena a um diagrama desejado podem ser escritos com base em algorítmos genéticos e tomam em consideração uma melhor aproximação a cada passo, para servir como aproximação inicial para a iteração futura. O problema é que existem inúmeras maneiras de observar e realizar a convergência. Portanto, existem diversas maneiras de se aproximar do resultado desejado. [17]

Uma das maneiras mais eficazes para aumentar os graus de liberdade do problema está na precisão em que as restrições são estabelecidas. Dessa forma, criar um diagrama exatamente igual ao desejado pode ser uma tarefa muito árdua e até mesmo impossível, visto que em alguns casos, a aproximação nem ao menos converge para o desejado. Um dos método mais eficazes, para tanto, é a utilização do método das máscaras, que ao invés de estabelecer um diagrama específico como resultado desejado, aumenta substancialmente o espaço de soluções, definindo uma região que contenha o diagrama desejado. [17]

5.5.3 Antena de referência para determinação do novo diagrama

Para uma aproximação inicial para se determinar a antena mais adequada ao cenário proposto, buscou-se na literatura uma antena que possuísse um diagrama de radiação próximo ao desejado [18], contendo quatro lóbulos onde a maior parte da energia da antena fosse transmitida. A antena encontrada é assimétrica e possui uma diferença entre os lóbulos do plano XY em 0 e 180 graus, equivalente a 4,5dB [18].Os dados de excitação para essa antena, são apresentados na tabela 5.3.

Tabela 5.3: Dados de excitação para antena de partida

Fio	X(inicial - final)	Y(inicial - final)	Z(inicial - final)	Tensão(V)	Fase(Graus)
1	0,0-0,0 m	0,0-0,5 m	0,0-0,0 m	1,0	0,0
2	0,75 - 0,75 m	0,0-0,5m	0,0-0,0m	1,0	-45,0

5.5.4 Aproximação pelo método das máscaras

Nesse método de aproximação, uma antena inicial serve como base para que se obtenha os parâmetros de excitação de uma antena cujo o diagrama de radiação está contido na máscara que foi definida como sendo a antena desejada. Essa máscara na verdade, não representa um diagrama real, e serve apenas para restringir menos o espaço de soluções para o problema sugerido. O objetivo principal desse método é então: facilitar a convergência do diagrama inicial.

Por meio deste método é possivel encontrarmos uma antena que satisfaça as condições desejadas com um menor esforço computacional, e portanto, faz com que o diagrama inserido inicialmente, convirja para o diagrama desejado em um número menor de iterações. A função utilizada para comparar os diagramas desejado e encontrado é a função do erro quadrático médio, que fornece uma medida do quão próximo o diagrama encontrado está do diagrama desejado. Utilizando os dados de excitação da seção anterior é possivel obter o diagrama apresentado na figura 5.9.

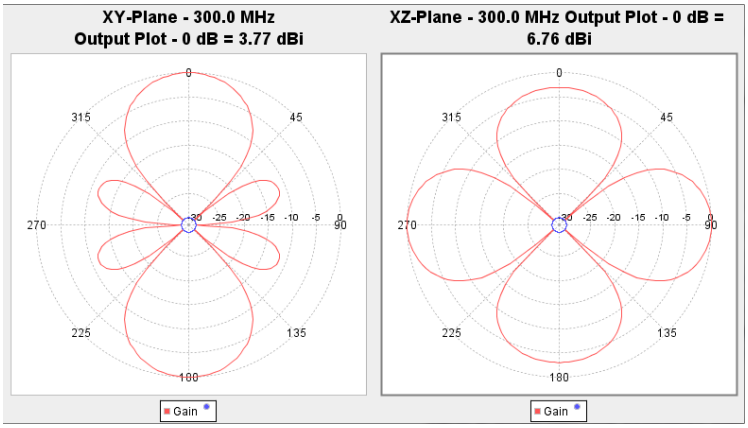

Figura 5.9: Antena Inicial para otimização

5.5.4.1 Encontrando uma antena com diferença entre os lóbulos de 6dB

Para essa seção, utilizou-se o diagrama assimétrico com diferença de 4,5dB e tentou-se obter os parâmetros de excitação de uma antena também assimétrica mas que tivesse a diferença entre os lóbulos de aproximadamente 6dB, o que satisfaria parte das condições necessárias para o cenário proposto. Após 4 iterações, o diagrama obtido se aproximou muito do diagrama desejado, apresentando uma diferença de aproximadamente 6dB entre os lóbulos cujo a máscara estabelecia uma diferença de 6dB. O resultado obtido pode ser observado na figura 5.10.

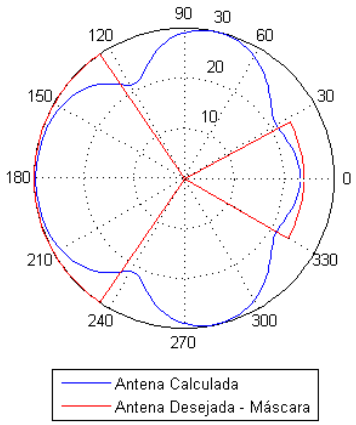

Figura 5.10: Antena com 2 dipolos assimétrica 6dB - Aproximação 1

Para a figura 5.10 obteve-se uma antena com diagrama de radiação compatível para o cenário proposto, com a diferença entre o lóbulo princial e secundário de aproximadamente 6dB. O problema encontrado ao se afirmar que essa antena satisfaz o cenário proposto é que a antena calculada possui lóbulos laterais não limitados, e dessa forma pode comprometer os elances com os pontos "B"e "D"visto que estes não foram considerados no projeto da máscara inserida para a primeira aproximação.

Em busca de uma antena que não pudesse interferir os enlaces "B"e "D"reprojetou-se a máscara de maneira a restringir também os lóbulos laterais de maneira que se obtivesse uma antena cujo diagrama apresentasse uma diferença de aproximadamente 6dB com relação ao lóbulo responsável pelo enlace em "C". Após a redefinição da máscara, obteve-se após 17 iterações, um diagrama compatível com o cenário prosposto, esse diagrama está mostrado na figura 5.11.

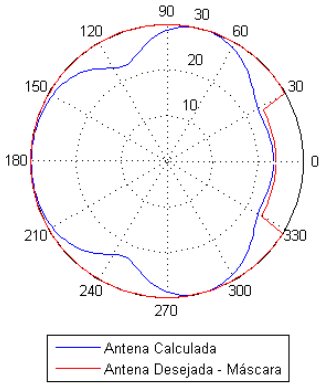

Figura 5.11: Antena com 2 dipolos assimétrica 6dB - Aproximação 2

5.5.4.2 Utilizando o método do pior caso para o cenário proposto

Em algumas aproximações, se utiliza a técnica do pior caso, de maneira a aproximar todos os lóbulos laterais para a maior diferença entre o lóbulo principal. Seguindo essa abordagem, considera-se que uma antena que apresente um diagrama de radiação com o lóbulo principal com a mesma diferença entre os outros satisfaz as condições do cenário. Para o cenário proposto nessa monografia, um antena que possui uma diferença de 6dB entre o lóbulo principal e todos os outros secundário, já seria capaz de satisfazer o que é necessário para que não haja interferências significativas entre os enlaces propostos.

Após definir uma nova máscara para ser utilizada, foram realizadas buscas por meio de iterações computacionais, que pudessem fornecer uma aproximação válida para o cenário. No entanto, após a realização de 74737 iterações, não se conseguiu um resultado satisfatório de convergência, o que permite afirmar, que para o cenário proposto, talvez a utilização do método computacional descrito em [17] não sirva para convergir um diagrama desejado para qualquer máscara selecionada com dois elementos e para o cenário proposto. Como pode ser visto pelos resultados, mesmo após o grande número de iteração utilizado, pode-se notar, figura 5.12, que a antena obtida tem lóbulos

laterais incompatíveis com o que era definido pela máscara, com exceção do lóbulo principal que atendeu as especificações. Isso demonstra que o diagrama assimétrico considerando todo o cenário pode apresentar soluções possíveis de serem implementadas quando o diagrama assimétrico para o pior caso, não for possível.

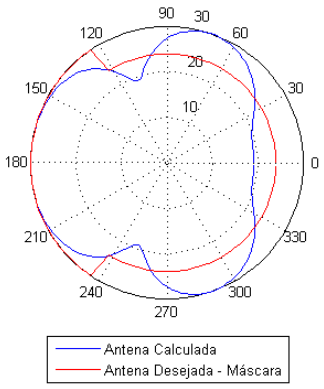

Figura 5.12: Aproximação obtida após 74737 iterações

Apesar de não poder encontrar utilizando a plataforma computacional em [17], buscou-se na bibliografia, alguns métodos numéricos que pudessem oferecer resultados satisfatórios para o método do pior caso para o cenário proposto. Dessa forma, encontrou-se em [19] alguns métodos numéricos que permitem a aproximação do diagrama de radiação para algo próximo do desejado, como o método de Dolph-Chebyshev, brevemente abordado neste trabalho. É importante se ressaltar, no entanto, que esse método se baseia em uma aproximação com elementos isotrópicos (não levando em consideração, parâmetros como: geometrias reais, acoplamento mútuo, etc...). Para esse cenário considerando-se o pior caso, observou-se que a antena do tipo *endfire* é uma antena bastante diretiva, em que a diferença entre o lóbulo principal e todos os outros secundários, é constante, o que satisfaz a máscara sugerida para a aproximação. Uma antena do tipo pode ser vista em 5.13 e foi obtida utilizando o método de Chebyshev [19].

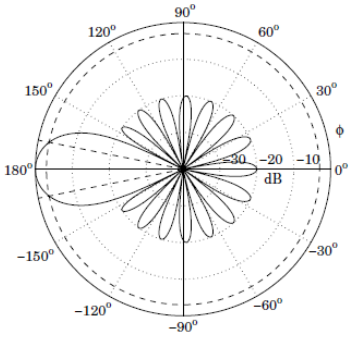

Figura 5.13: Antena do tipo *endfire* obtida pelo método de Dolph

Tomando a antena obtida em 5.13 como referência, alterou-se alguns parâmetos para que o resultado obtido pudesse satisfazer as condições necessarias para o cenário em questão. Ao alterar

o número de elementos para 3, e utilizar uma diferença entre os lóbulos primário e secundário de 6dB, foi possível obter um resultado compatível para o cenário, utilizando um método de projeto de antenas simétricas, o resultado está mostrado na figura 5.14.

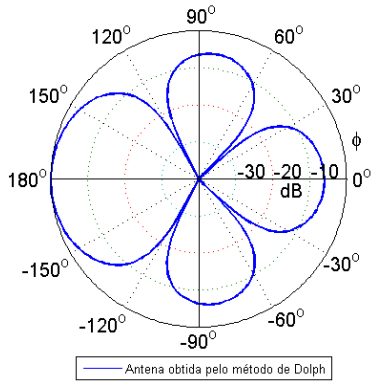

Figura 5.14: Antena com 3 elementos para o cenário proposto obtida pelo método de Dolph-Chebyshev, utilizando apenas elementos isotrópicos

5.5.4.3 Analisando o pior caso possível do LTE

O pior caso possível, ou seja, que oferece a maior diferença entre diferentes modulações digitais, é o caso em que se compara, para uma mesma taxa de sinal ruído, o valor de BER para a modulação 4QAM e 64QAM, em que a modulação 4QAM possuí o menor número de bits redundantes oferecido pelo simulador e a modulação 64QAM com o maior número de bits redundantes disponível. Com essa configuração, e mantendo os outros parâmetros com o mesmo valor da simulações anteriores, obteve-se uma diferença de 9dB entre as curvas, para um mesma relação sinal ruído, como pode ser visto em 5.15.

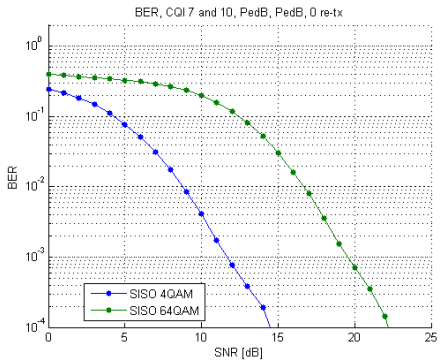

Figura 5.15: Curvas BER para 4QAM e 64QAM

Utilizando o método do erro quadrático médio, com uma máscara de 9dB de assimetria, foi possivel obter o resultado mostrado pela figura 5.16. Esse resultado foi obtido após 63171 iterações, utilizando a técnica do erro quadrático médio descrito em [17] e mostrou ser bastante dispendioso e de alto esforço computacional.

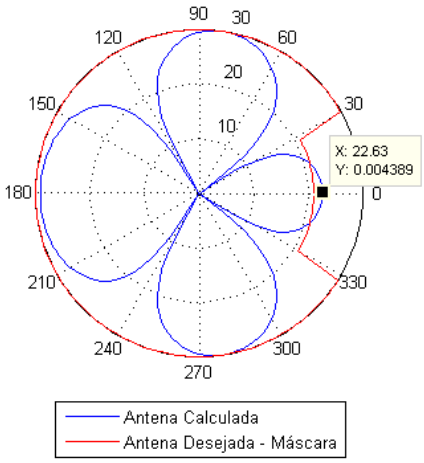

Figura 5.16: Antena com dois dipolos assimétrica 9dB para o cenário proposto

Por outro lado, desejou-se também analisar o método de Dolph-Chebyshev, também utilizado para obter os resultados da figura 5.14, para dessa forma, também desenvolver uma antena pelo método de Dolph, considerando o pior caso, para o cenário que agora deve ditar uma diferença de 9 dB entre o lóbulo principal e secundários. Sem muito esforço, e repetindo o procedimento utilizado, modificando apenas a diferença entre os lóbulos para 9dB, foi possivel obter o resultado apresentado na figura 5.17.

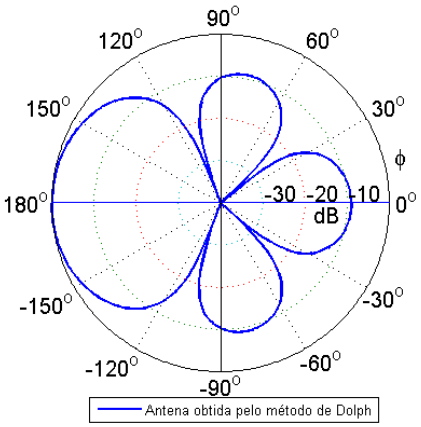

Figura 5.17: Antena com 3 elementos para o cenário proposto obtida pelo método de Dolph-Chebyshev, utilizando elementos isotrópicos

Capítulo 6

Conclusões

Em projetos de sistemas de comunicação, diversos fatores devem ser levados em consideração, a saber: o tipo de modulação utilizado, a capacidade de transmissão do sistema, além de outros fatores como o alcance e as taxas de erro oferecidas.

Ao longo desse projeto, foram estudados alguns dos fatores relevantes a um sistema de comunicação. Foram realizadas simulações computacionais em plataforma LTE, que puderam mostrar a real influência do tipo e ordem de modulação no sistema. Além disso, foram abordados alguns métodos de múltiplas antenas que oferecem um caminho promissor para aumentar as taxas de transmissão.

Foram também estudados os diagramas de radiação de antenas à fio, e algumas estratégias para projetá-las de acordo com um cenário específico. Por meio dos resultados, foi possível concluir no contexto investigado que o projeto proposto de antenas com diagrama assimétrico apresenta vantagens com relação à técnicas tradicionais de projeto de antenas com diagrama simétrico (i.e., Dolph-Chebyshev), como por exemplo o uso de um menor número de elementos e consequente maior facilidade de construção e manutenção.

Além disso, a técnica proposta para diagramas assimétricos pode resultar em ganhos mais elevados e permitir o uso de diversidade de polarização, muito usada em sistemas móveis terrestres. A técnica proposta se baseia em uma análise e otimização precisa das configurações de fios, levando-se em conta a real geometria das antenas e alimentações, acoplamento mútuo, diagramas em diversos planos, etc...

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] HAYT, W. H.; BUCK, J. A. Engineering electromagnetics. *New York*, Mc Graw Hill, 2006.

[2] PROAKIS, J. G. et al. Communication systems engineering. Prentice-Hall Englewood Cliffs, v. 2, 1994.

[3] SKLAR, B. Digital communications. Prentice Hall NJ, v. 2, 2001.

[4] HAYKIN, S. Communication systems. *New York*, IET, 2001.

[5] INSTRUMENTS, N. Ofdm and multi-channel communication systems. National Instruments, 2013.

[6] PINTO, E. L. e; ALBUQUERQUE, C. P. de. A técnica de transmissao ofdm. Revista Científica Periódica, 2002.

[7] LATHI, B. P. Modern digital and analog communication systems 3e osece. Oxford university press, 1998.

[8] NETWORK, T. S. G. A. 3rd generation partnership project. *UE Radio Transmission and Reception*, 2002.

[9] SU, W.; KWASINSKI, A. Cooperative communications and networking. Cambridge University Press, 2009.

[10] BALANIS, C. A. Antenna theory: analysis and design. John Wiley & Sons, 2012.

[11] VALENZUELA, R. Multiple antenna systems: A new wireless communication technology of extraordinary bandwidth efficiency for 3g and beyond. Lucent Technologies, Bell Labs Innovations.

[12] WIRELESS, T. connectivity; SERVICES. Distributed antenna systems and mimo technology. 2011.

[13] MEHLFÜHRER, C. et al. The vienna LTE simulators - enabling reproducibility in wireless communications research. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, Vol. 2011, p. 1–13, 2011.

[14] RABELO, R.; TERADA, M. Analysis and optimization of wire antennas over the internet. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 52, 2010.

[15] IKUNO, J. C.; WRULICH, M.; RUPP, M. System level simulation of LTE networks. Taipei, Taiwan, maio 2010.

[16] MILLIGAN, T. A. Modern antenna design. John Wiley & Sons, 2005.

[17] TERADA, M.; RABELO, R. Taxa de rejeição sistêmica no projeto de antenas: Um novo conceito multi-camadas em redes de comunicação sem fio. *MOMAG*, 2010.

[18] HALL, G. The arrl antenna book. The Antenna Radio Relay League, 1988.

[19] ORFANIDIS, S. J. Electromagnetic waves and antennas. Rutgers University, 2002.