

Universidade de Brasília - UnB
Campus Darcy Ribeiro
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

**OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO:
ANÁLISE DE MODULAÇÕES DIGITAIS**

Guilherme Franco Santos
Samuel Gomes Quintanilha

**Brasília, DF
2015**

Universidade de Brasília - UnB
Campus Darcy Ribeiro
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

**OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO:
ANÁLISE DE MODULAÇÕES DIGITAIS**

Guilherme Franco Santos
Samuel Gomes Quintanilha

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Marco Antônio Brasil Terada

Banca Examinadora

Prof. Dr. Marco Antônio Brasil Terada - Orientador

Prof. Dr. Franklin da Costa Silva - Examinador Interno

Prof. Dr. Rafael Rabelo Nunes – Examinador Externo

**Brasília, DF
2015**

Esse trabalho é dedicado às nossas famílias, que nos ofereceram apoio emocional e financeiro e permitiu que nós tenhamos chegado tão longe.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Deus por tudo que nos tem oferecido e a todos os nossos amigos e familiares que nos apoiaram durante nossa jornada na faculdade e na vida.

RESUMO

Um dos grandes desafios encontrados no setor de telecomunicações consiste em transmitir informação de maneira eficiente, ou seja, utilizando o mínimo possível de recursos para efetuar a transferência de informação. O presente trabalho se propõe a analisar um cenário em que um processo de comunicação é estabelecido em uma antena, de tal forma que se consiga controlar e limitar a interferência dos lóbulos secundários gerados por essa antena em estações rádio base vizinhas a essa, realizando uma otimização de seu diagrama de radiação. Essa situação pode ter aplicações práticas em sistemas que demandam alta taxa de transferência de dados e que requerem um alto aproveitamento da banda disponível, tal como o LTE, pois gera economia de potência de transmissão das estações.

ABSTRACT

One of the greatest challenges that can be found at the telecommunication sector consists on transmitting information efficiently, i.e. using the minimum required resources to accomplish information transference. This paper proposes to analyze a scenario where a communication process is established in an antenna, in a way that is possible to control and limit the interference of the secondary lobes generated by this antenna in some base transmission stations that are physically close to this antenna, optimizing its radiation pattern. This situation can be useful in practical applications, such as systems that demands high data transfer rates and requires a high utilization of the spectrum, such as LTE, making possible an economy of the transmission power of the stations.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	PANORAMA GERAL	1
1.2	CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.3	OBJETIVO	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	INTRODUÇÃO	3
2.2	TEORIA ELETROMAGNÉTICA	3
2.3	MODULAÇÃO DIGITAL	6
2.4	TÉCNICAS DE MODULAÇÃO DIGITAL	7
2.4.1	MODULAÇÃO POR CHAVEAMENTO DE AMPLITUDE (ASK)	7
2.4.2	MODULAÇÃO POR CHAVEAMENTO DE FASE (PSK)	8
2.4.3	MODULAÇÃO POR CHAVEAMENTO DE FREQUÊNCIA (FSK)	9
2.5	MODULAÇÃO EM QUADRATURA M-QAM	9
2.6	MODULAÇÃO OFDM	12
2.7	RUÍDO	15
2.7.1	RELAÇÃO SINAL/RUÍDO	16
3	ANTENAS	19
3.1	INTRODUÇÃO	19
3.2	DIAGRAMAS DE RADIAÇÃO	19
3.3	CONJUNTOS DE ANTENAS	20
3.4	MÉTODO DOLPH-CHEBYSHEV	22
4	SIMULADORES	26
4.1	INTRODUÇÃO	26
4.2	MATLAB	26
4.3	LTE LINK LEVEL SIMULATOR	26
4.4	GRADMAX	27
5	ANÁLISE E RESULTADOS	30
5.1	INTRODUÇÃO	30
5.2	CENÁRIO	30
5.3	ALTERAÇÃO DE CENÁRIO - APROXIMAÇÕES PELO MÉTODO DAS MÁSCARAS	34
5.4	APLICAÇÕES FUTURAS NA OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO	38
6	CONCLUSÃO	40
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
8	ANEXO	42
	INTEGRAÇÃO DO JAVA NO MATLAB	42

Lista de Tabelas

2.7	TABELA I – TIPOS DE RUÍDO.....	16
5.2	TABELA II – TAXA DE ERRO DE BIT (BER)	31
5.2	TABELA III - GEOMETRIA E REDE DE ALIMENTAÇÃO DO PONTO DE PARTIDA DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO.....	33
5.3	TABELA IV – GEOMETRIA DE REDE DE ALIMENTAÇÃO DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO PARA O NOVO CENÁRIO	37

Lista de Figuras

2.1	PROPAGAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS	5
2.4-1	MODULAÇÃO POR CHAVEAMENTO DE AMPLITUDE	8
2.4-2	MODULAÇÃO POR CHAVEAMENTO DE FASE	9
2.4-3	MODULAÇÃO POR CHAVEAMENTO DE FREQUÊNCIA	9
2.5-1	CONSTELAÇÃO 16 QAM	10
2.5-2	CONSTELAÇÃO 64 QAM	11
2.5-3	CURVAS DE BER PARA 16 QAM E 64 QAM	12
2.6-1	MODELO MULTIBANDA OFDM	13
2.6-2	ESQUEMÁTICO TX E RX PARA OFDM	14
2.7	RUÍDO	15
2.7-1	SNR DE 20 DB PARA 16 QAM (SIEMENS)	17
2.7-1	SNR DE 20 DB PARA 16 QAM (SIEMENS)	17
3.2-1	ANTENA ISOTRÓPICA X NÃO-ISOTRÓPICA	19
3.3-1	SISO	20
3.3-2	SIMO	21
3.3-3	MISO	21
3.3-4	MIMO	22
3.4	ANTENA DE 5 ELEMENTOS – DOLPH-CHEBYSHEV	25
4.3-1	DETERMINAÇÃO DA ANTENA A SER UTILIZADA NO GRADMAX	28
4.3-2	DETERMINAÇÃO DO POSICIONAMENTO DE ELEMENTOS NO GRADMAX	28
4.3-3	DETERMINAÇÃO DA EXCITAÇÃO DOS FIOS NO GRADMAX	29
5.2-1	CENÁRIO	30
5.2-2	BER SISO PARA 16 QAM E 64 QAM	31
5.2-3	ANTENA DE 3 ELEMENTOS COM SLL DE 6 DB	33
5.2-4	OTIMIZAÇÃO VIA MÉTODO DAS MÁSCARAS E ALGORITMOS GENÉTICOS	34
5.3-1	CENÁRIO ALTERADO	35
5.3-2	NOVA MÁSCARA	36
5.3-3	NOVO DIAGRAMA DE RADIAÇÃO	37
5.3-4	DIAGRAMA DE RADIAÇÃO COM POSICIONAMENTO ALTERADO	38

Acrônimos

BER – Bit Error Rate

ERB – Estação Rádio-Base

FTT – Fast Fourier Transform

Kbps – Kilobits por segundo

Mbps - Megabits por segundo

QAM – Quadrature Amplitude Modulation

OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing

SNR – Signal Noise Ratio

FDD – Frequency Division Duplexing

TDD – Time Division Duplexing

AWGN – Additive White Gaussian Noise

LTE – Long-Term Evolution

SLL – Side Lobe Level

QoS – Quality of Service

ISI – InterSymbol Interference

IP – Internet Protocol

1. Introdução

1.1 - Panorama Geral

O mercado de telecomunicações atualmente é bastante sofisticado e acessível se comparado ao século passado. Muito disso se deve ao aumento do poder computacional que permitiu que programas auxiliassem sobremaneira a mente humana em cálculos matemáticos complexos, economizando muito tempo nesse processo e com isso diminuindo a margem de erro, além de tornar possível diversas abordagens antes impossíveis por conta da inexistência de processadores de computação, capazes de realizar milhares de operações matemáticas por segundo.

A tecnologia portátil ao longo dos anos alavancou a disseminação de celulares, *tablets* e serviços de internet de banda larga. O fluxo de informação nunca foi tão intenso, e a consequência mais crítica e imediata disso está nas dificuldades relacionadas ao processo de comunicação como a limitação de banda disponível, problemas relacionados à potência dissipada e interferência entre enlaces vizinhos, custos relacionados à infraestrutura de torres que visam suportar um número cada vez maior de antenas, etc. A engenharia tem o papel de otimizar recursos e com isso, suprir a demanda intensa nos dias atuais, oferecendo velocidade e confiabilidade de maneira barata e eficiente. Por isso existe a necessidade de buscar a implementação de cenários e configurações de enlace que satisfaçam condições, no âmbito do estabelecimento de um processo de comunicação, cada vez mais exigentes e complexas.

1.2 - Contextualização

O projeto de antenas que atenda a sistemas de comunicações móveis é sempre um desafio para os engenheiros uma vez que existem múltiplas variáveis que influenciam o desempenho de uma antena e muitos deles não são controlados pelo homem. Diante dessa conjectura, garantir que a antena atinja as especificações de desempenho na transmissão e recepção nem sempre é uma tarefa simples.

Muitas características da onda portadora podem ser alteradas para adequá-la à situação desejada. Antes das comunicações digitais, a comunicação analógica foi primeiramente realizada com o AM (modulação por amplitude), depois novas modulações foram ganhando mais espaço como a modulação por frequência (FM) e a modulação por fase (PM).

1.3 - Objetivo

O foco desse trabalho está em conseguir aproveitar a extensão máxima do diagrama de radiação de uma determinada antena para um cenário proposto. Serão utilizadas ferramentas computacionais capazes de gerar gráficos e dados que permitam uma análise qualitativa da situação estudada. Assim, programas de simulações de sistemas LTE, como o *LTE Link Level Simulator* [1], e de simulações de diagramas de radiação, como o GRADMAX [2], serão usados para se obter uma visão geral do processo em estudo.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 – Introdução

Nesta seção é apresentada a base teórica dos diversos conceitos envolvidos na elaboração dos cenários e das simulações a serem realizadas.

2.2 - Teoria Eletromagnética

Todas as tecnologias de sistemas de comunicações atuais têm base nas teorias eletromagnéticas de Maxwell [3]. As ondas eletromagnéticas são compostas por campos elétricos e magnéticos, formados por variações de tensão e corrente. Essas ondas possuem a propriedade de irradiação, funcionando como meio de transporte da energia de um ponto a outro.

Existem grandezas que são consideradas como parâmetros-chave no entendimento e comportamento dessas ondas. Entre eles podemos citar o comprimento de onda (λ), que simboliza a distância entre repetições de uma forma de onda, para o caso de uma onda senoidal é a distância entre dois picos ou cristas da mesma, e a frequência (f), que representa o número de oscilações por segundo que uma onda eletromagnética realiza, sendo sua unidade de medida o hertz (Hz). A partir da interação entre essas duas grandezas, pode-se chegar ao conhecimento da velocidade de propagação que uma onda descreve em um meio tal que:

$$v = \lambda \cdot f \quad (2-1)$$

Onde o termo à esquerda da equação representa a velocidade.

O eletromagnetismo descreve uma interação entre cargas elétricas, por meio da ação de um campo elétrico e outro magnético, que coexistem em uma propagação desse tipo de onda. Assim há a formação de um fenômeno conhecido como campo eletromagnético. A interação entre duas cargas elétricas distantes acontece, intermediada pelos campos, do seguinte modo:

Uma carga elétrica positiva produz um campo elétrico, ele é influenciado por outra carga, positiva ou negativa, que por sua vez também produz o próprio campo elétrico, de forma que a interação entre esses campos gera o deslocamento das cargas, representando assim sua propagação no espaço. Com o movimento das cargas, observa-se uma variação no campo elétrico resultante, de forma que é gerado um campo magnético variante no tempo.

A maneira como uma carga elétrica percebe o campo eletromagnético é dado pela *força de Lorentz* expressa pela seguinte equação:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2-2)$$

Onde:

- q representa a carga (C);
- \vec{E} é o vetor de intensidade de campo elétrico (C/m);
- \vec{v} é o vetor da velocidade de propagação (m/s);
- \vec{B} é o vetor densidade de fluxo magnético (T).

O modo como esses campos são gerados a partir das cargas e as condições que devem satisfazer são descritos pelas equações de Maxwell. São apresentadas a seguir as *equações de Maxwell* no seu formalismo integral:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{1}{\epsilon_0} q \quad (2-3)$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (2-4)$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (2-5)$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 i + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int \vec{E} \cdot d\vec{A} \quad (2-6)$$

O termo acrescentado por Maxwell tem a dimensão da constante de permeabilidade magnética, μ_0 , multiplicado por uma corrente, chamada por razões históricas de *corrente de deslocamento*:

$$i_d = \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int \vec{E} \cdot d\vec{A} \quad (2-7)$$

Esse termo extra aparece com uma constante, $\mu_0 \epsilon_0$, muito pequena. Tal constante possui o valor: $\mu_0 \epsilon_0 = \frac{1}{c^2}$, onde $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$ é a velocidade da luz no vácuo.

A seguir as *equações de Maxwell* são apresentadas num outro formalismo, o formalismo diferencial. Nas equações (2.8 - 2.11) $\vec{\nabla} = \hat{i} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{j} \frac{\partial}{\partial y} + \hat{k} \frac{\partial}{\partial z}$ é o operador diferencial do cálculo vetorial, ρ é a densidade de carga e \vec{j} é a densidade de corrente elétrica.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho \quad (2-8)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2-9)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{B} \quad (2-10)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \vec{E} \quad (2-11)$$

Este formalismo pode ser encontrado em [3].

A seguir, é apresentado um esquemático do processo de propagação de ondas eletromagnéticas:

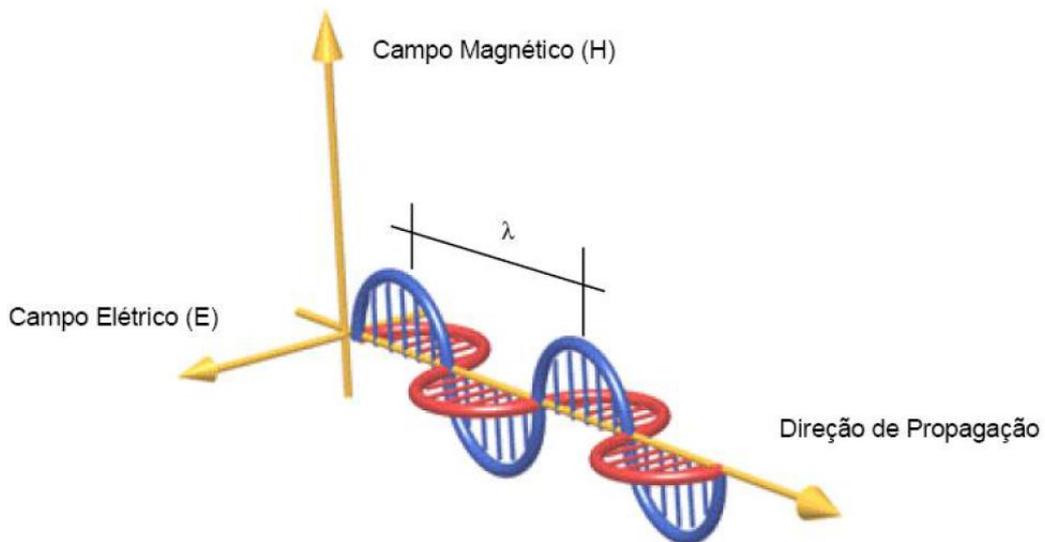


Figura 2.1 – Propagação de ondas eletromagnéticas

Para o caso apresentado na figura 2.1, os campos estão perpendiculares entre si, de forma que o plano formado pelos dois é transversal à direção de propagação. Essas ondas nessa configuração são conhecidas como TEM, ou, transversais eletromagnéticas.

2.3 - Modulação Digital

Para facilitar a transmissão de um sinal através dos meios físicos, além de adequar as frequências aos sistemas de comunicação, se utiliza um processo em que um sinal banda-base é utilizado para modificar algum parâmetro de uma onda, chamada portadora. [4]

A onda portadora é um sinal senoidal caracterizado por três variáveis: Amplitude, Frequência e Fase. Esses parâmetros, no processo de modulação, são variados proporcionalmente ao sinal banda-base. Por definição, este sinal existe ao longo de todo o tempo, ou seja, com "t" variando de menos infinito a mais infinito.

A equação de uma onda portadora é dada por:

$$F = A.\text{sen}(\omega t + \theta) \quad (2-12)$$

Onde:

- F é a amplitude em um determinado instante t;
- A é a amplitude máxima da onda;
- ω , é a frequência angular da portadora, tal que $\omega = 2.\pi.f$ (onde f é a frequência da onda em hertz);
- θ é a fase da onda portadora.

O sinal modulante é o próprio sinal que se deseja transmitir, mas, que devido a suas características de baixa frequência, deve ser superposto a uma onda portadora de frequência mais alta de tal forma que possa se propagar através dos meios físicos de transmissão.

A modulação digital também é denominada modulação discreta ou codificada. É utilizada em casos em que se está interessado em transmitir uma forma de onda, ou mensagem, que faz parte de um conjunto finito de valores discretos, representando um código. No caso da comunicação binária, as mensagens são transmitidas por dois símbolos apenas. Por exemplo, um dos símbolos pode ser representado por um pulso $s(t)$ correspondente ao valor binário "1" e o outro pela ausência do pulso (nenhum sinal) representando o dígito binário "0".

A diferença fundamental entre os sistemas de comunicação de dados digitais e analógicos (dados contínuos) é intuitiva. No caso dos dados digitais, envolve a transmissão e detecção de uma dentre um número finito de formas de onda conhecidas, também chamadas

de amostras, enquanto que, nos sistemas contínuos há um número infinitamente grande de mensagens, cujas formas de onda correspondentes não são todas conhecidas.

Nos sistemas digitais o problema da detecção (demodulação) é de vital importância. Durante a transmissão, as formas de onda da onda portadora modulada são alteradas pelo ruído do canal. Quando este sinal é recebido no receptor, é necessário decidir qual das duas formas de onda possíveis conhecidas foi transmitida. Uma vez tomada a decisão, a forma de onda original é recuperada com ruído sobremaneira reduzido.

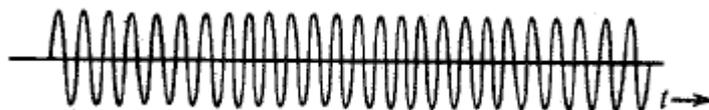
Do mesmo modo que há diversas técnicas de modulação para sinais analógicos, as informações digitais também podem ser colocadas sobre uma portadora de diferentes modos.

2.4 - Técnicas de Modulação Digital

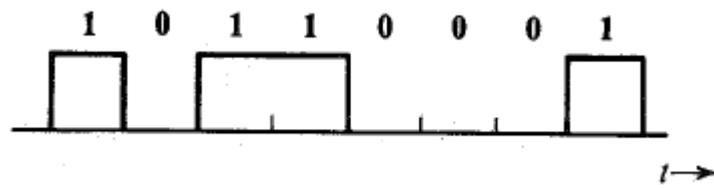
As técnicas de modulação digital consistem em modificar um ou mais parâmetros da onda portadora com o objetivo de transmiti-la com a menor potência e distorção possíveis, ao mesmo tempo que leva em conta a facilidade de recuperação da informação original no receptor. As técnicas que se seguem podem ser encontradas em [4].

2.4.1 - Modulação por chaveamento de amplitude (ASK)

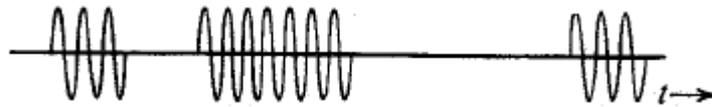
Nesse tipo de modulação, um sinal banda-base é do tipo *on-off*, ou seja, quando um bit 1 deseja ser representado, ocorre um pulso e quando um 0 deseja ser representado ocorre a ausência de um pulso. Assim ele é correlacionado no tempo com uma portadora não modulada de forma a gerar um sinal modulado na frequência da portadora e que obedeça às amplitudes do sinal base. Esse tipo de modulação é mostrado na figura 2.4-1.



(a)



(b)



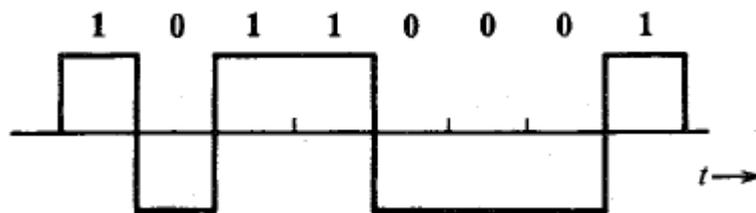
(c)

Figura 2.4-1 – Modulação por chaveamento de amplitude

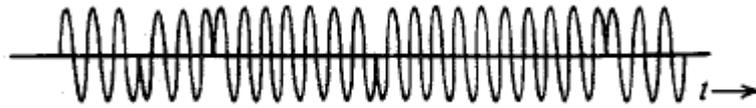
Sendo que nas figuras 2.4-1-a, b, c são representadas, respectivamente, a portadora, o sinal banda-base e o sinal modulado.

2.4.2 - Modulação por chaveamento de fase (PSK)

Para esse tipo de modulação, é desejado um sinal banda-base com codificação polar, de forma que os pulsos que representam o 0 e 1 lógicos são diferenciados por uma mudança de fase de π radianos. Assim, a informação reside na fase do pulso, de forma que, considerando a mesma portadora do caso anterior, o sinal modulado apresentará variação de sua fase, indicando que houve uma mudança entre os bits 0 e 1 como mostrado na figura a 2.4-2:



(a)



(b)

Figura 2.4-2 - Modulação por chaveamento de fase

Na figura 2.4-2-a é mostrado o sinal banda base e na figura 2.4-2-b o sinal modulado.

2.4.3 - Modulação por chaveamento de frequência (FSK)

Para esse tipo de modulação, o 0 lógico do sinal banda-base é transmitido por um pulso de frequência w_0 , enquanto o 1 lógico é transmitido por um pulso de frequência w_1 . Assim, a informação sobre os dados a serem transmitidos se encontram na frequência da portadora. O sinal modulado por essa técnica está representado na figura 2.4-3:

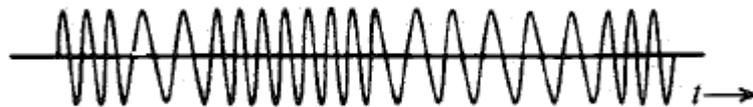


Figura 2.4-3 - Modulação por chaveamento de frequência

2.5 - Modulação em Quadratura (M-QAM)

Essa modulação foi gerada a partir da combinação das técnicas ASK (amplitude) e PSK (fase) de forma que o QAM é conhecido como modulação de amplitude e fase [4]. Algumas características dessa técnica são o fato de apresentar maiores ordens de modulação, frente às outras apresentadas anteriormente. Devido ao maior número de símbolos em sua constelação, a amplitude do sinal modulado é variável e assim há a exigência de amplificadores lineares nos equipamentos de transmissão. Nesta forma de modulação, os símbolos são mapeados em um diagrama de fase e quadratura, sendo que cada símbolo apresenta uma distância específica da origem do diagrama, de forma que essa distância representa a sua amplitude. Isto significa que as informações são inseridas nos parâmetros de amplitude e quadratura da onda portadora.

No caso do 16-QAM, a constelação apresenta 16 símbolos, sendo 4 em cada quadrante do diagrama, o que significa que cada símbolo representa 4 bits. Podemos ter também, por exemplo, o modo 64-QAM, cuja constelação apresenta 64 símbolos, cada um deles representando 6 bits. As figuras abaixo mostram as constelações geradas pelos dois modos QAM mencionados acima:

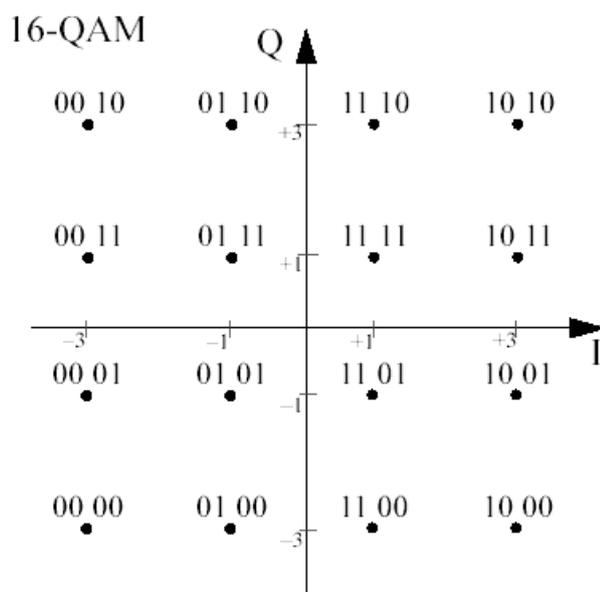


Figura 2.5-1 – Constelação 16 QAM

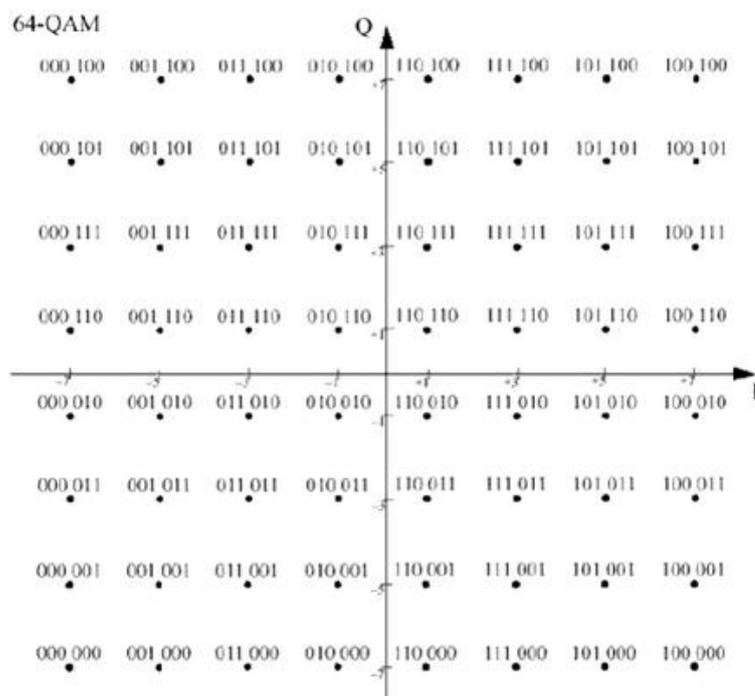
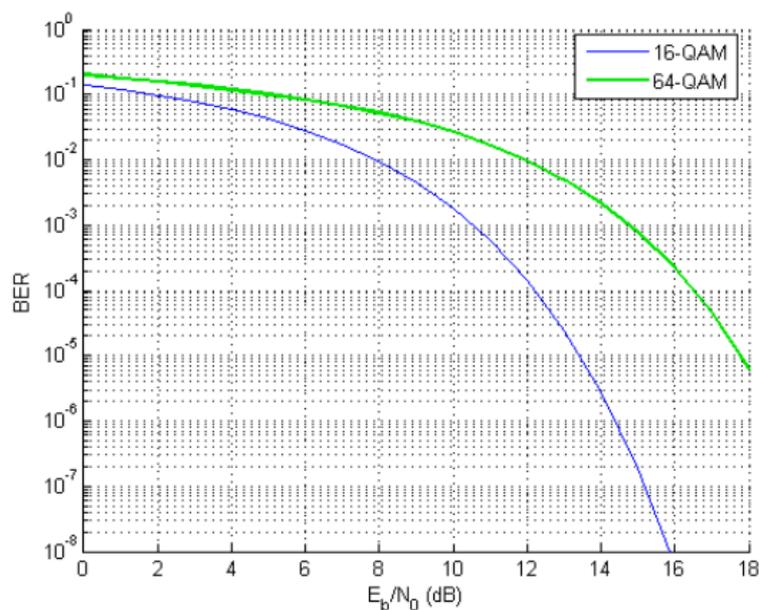


Figura 2.5-2 – Constelação 64 QAM

No modo 16 QAM alcança-se uma taxa de transmissão de dados menor do que no modo 64 QAM, uma vez que cada símbolo contém um número menor de bits. No entanto, no modo 16 QAM, a distância euclidiana entre os símbolos é maior do que no caso do modo 64 QAM. Isto permite que o modo 16 QAM possua uma maior robustez a ruídos, pois a maior distância entre os símbolos dificulta erros de interpretação no receptor quando este detecta um símbolo. A seguir é exemplificado em um gráfico o comportamento da BER das duas modulações, para diferentes níveis de $\frac{Eb}{No}$. Esse nível representa a razão entre a energia de um bit e o ruído presente na constelação e é um indicativo do quanto os bits, ou mesmo símbolos, são sensíveis ao ruído, característica esta essencial na tomada de decisão de receptores digitais quanto à natureza do bit (se o mesmo é um 0 ou 1).

O gráfico 2.5-3 foi obtido com o auxílio do programa *LTE Link Level Simulator*, a ser descrito futuramente nesse trabalho.



2.6 - Modulação OFDM

O OFDM, também conhecido como *discrete multitone modulation* (DMT) [5], é uma técnica de modulação baseada na ideia de multiplexação por divisão de frequência (FDM) onde múltiplos sinais são enviados em diferentes frequências. Muitos são familiarizados com FDM pelo uso de aparelhos de rádio e televisão: normalmente, cada estação é associada a uma determinada frequência (ou canal) e deve utilizá-la para realizar suas transmissões. OFDM parte deste conceito mas vai além, pois divide uma única transmissão em múltiplos sinais com menor ocupação espectral (dezenas ou milhares).

Uma das grandes vantagens do uso do OFDM em vez do FDM convencional está no aproveitamento de ocupação de banda pelas portadoras. Isso se deve ao fato de que para garantir uma baixa interferência entre os sinais, o FDM utilizava o recurso de bandas de guarda, de forma que com o espalhamento natural do sinal, podia-se diminuir a interferência, porém com a perda de recurso de banda, visto que as bandas de guarda impedem a utilização de partes do espectro. Quando se utiliza o OFDM esse problema é mitigado, pois agora as portadoras são dispostas de forma ortogonal, impedindo que as bandas laterais de sobreponham no canal. Isto adicionado com o uso de técnicas avançadas de modulação em cada componente resulta em um sinal com grande resistência à interferência.

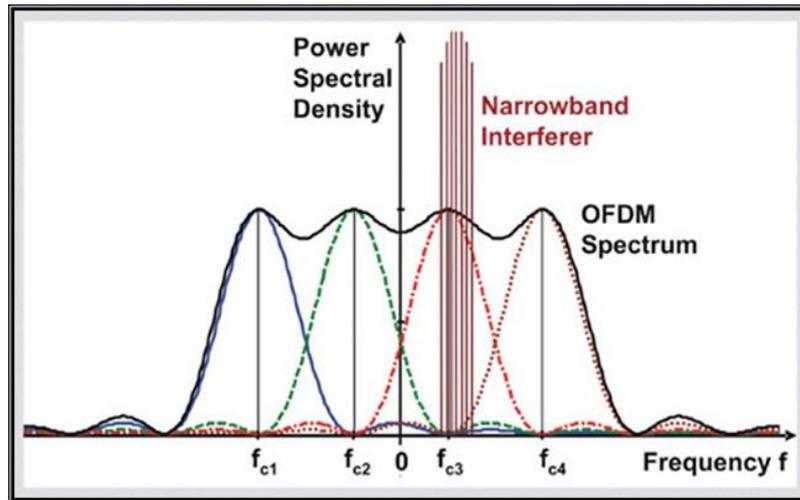


Figura 2.6-1 – Modelo multibanda OFDM

A figura 2.6-1 apresenta um modelo usado em termos de multibanda OFDM, no qual o espectro é separado em várias subportadoras. Cada uma delas transmite fluxos de dados ortogonais independentes.

A interferência de banda estreita é facilmente contornada com a retirada da subportadora comprometida, onde a banda estreita é persistente, no caso os dados são codificados por intermédio de todas as subportadoras. Isso é feito no receptor, mas pode ser realizado adicionalmente no transmissor, a fim de poupar energia.

O grande recurso do OFDM que garante a alta taxa de transmissão de dados que possui se dá na transmissão multi-portadora dividida em diversas sub-bandas, onde a informação é dividida em vários canais com uma taxa reduzida de bits, cada um deles possuindo uma sub-portadora associada e ortogonal às outras do sistema. Assim os zeros de cada sub-portadora coincidem entre si. Além da maior taxa de transmissão, é importante ressaltar que essa técnica também garante uma maior robustez frente ao desvanecimento seletivo de frequência. Esse desvanecimento tem por característica o fato de que para diferentes frequências o mesmo se comporta de maneira diferente também, o que gera uma forte interferência intersimbólica, ou ISI, causando dificuldades no processo de detecção do sinal pelo receptor, visto que os sinais sofrem distorção ao passar pelo canal. A seguir é mostrado um esquemático do processo de transmissão e recepção usando o OFDM, onde pode-se visualizar as sub-bandas, cada uma delas originada por um processo serial-paralelo aplicado ao sinal $b(k)$ e o uso de técnicas da transformada discreta inversa de Fourier, necessárias para a conversão serial-paralelo das sub-portadoras.

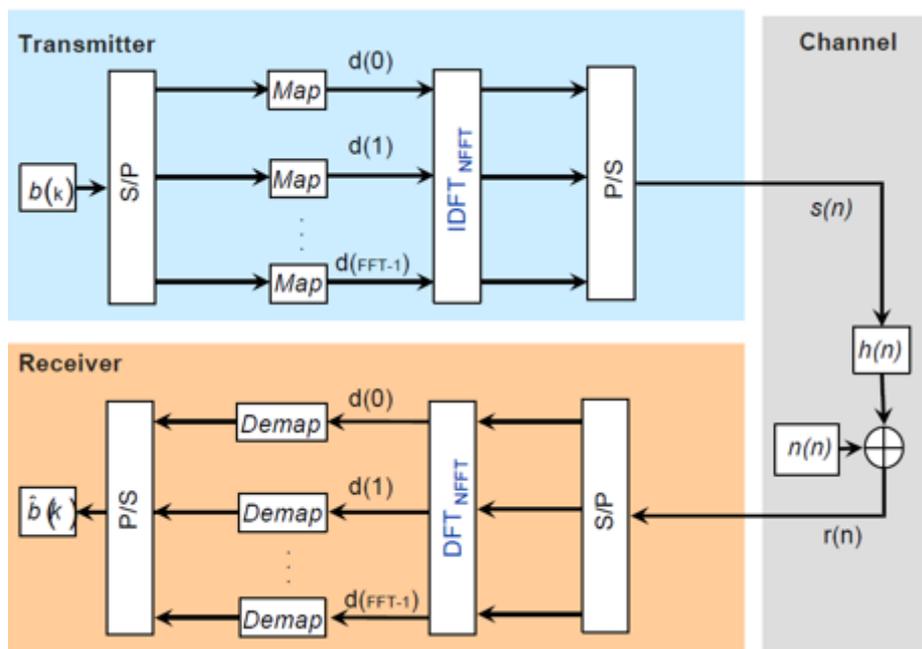


Figura 2.6.2 – Esquemático TX e RX para OFDM

Atualmente, o LTE (*Long Term Evolution*) utiliza como técnica de modulação o OFDM. O LTE se trata de uma evolução dos sistemas de redes móveis, garantindo a utilização de maiores larguras de banda, de forma a aumentar a velocidade de transmissão de dados. Inicialmente na concepção do projeto da quarta geração de redes celulares, era objetivado que o LTE garantisse taxas de *downlink* de 100 Mbps, suportando portadoras com largura de banda de 5 MHz até 20MHz. Isso se adequa à tendência que é apresentada nos dias de hoje em relação ao consumo de recursos de banda. Cada vez mais os consumidores têm utilizado os serviços de dados em seus aparelhos frente aos serviços de voz. Essa mudança na aplicação do uso dos celulares por parte do cliente faz com que seja necessário garantir cada vez mais altas taxas de velocidade na transmissão de pacotes, de tal forma que tecnologias como a do LTE tem ganhado cada vez mais espaço no mercado.

2.7 - Ruído

Ruído pode ser definido como um conjunto de sinais que não carregam informação útil até o destino [6]. Os meios de transmissão estão sujeitos a diversos tipos de ruídos com as mais diversas origens e isso configura um grande problema em telecomunicações uma vez que a presença do ruído afeta a tomada de decisão do receptor em distinguir o sinal correto do sinal errado.

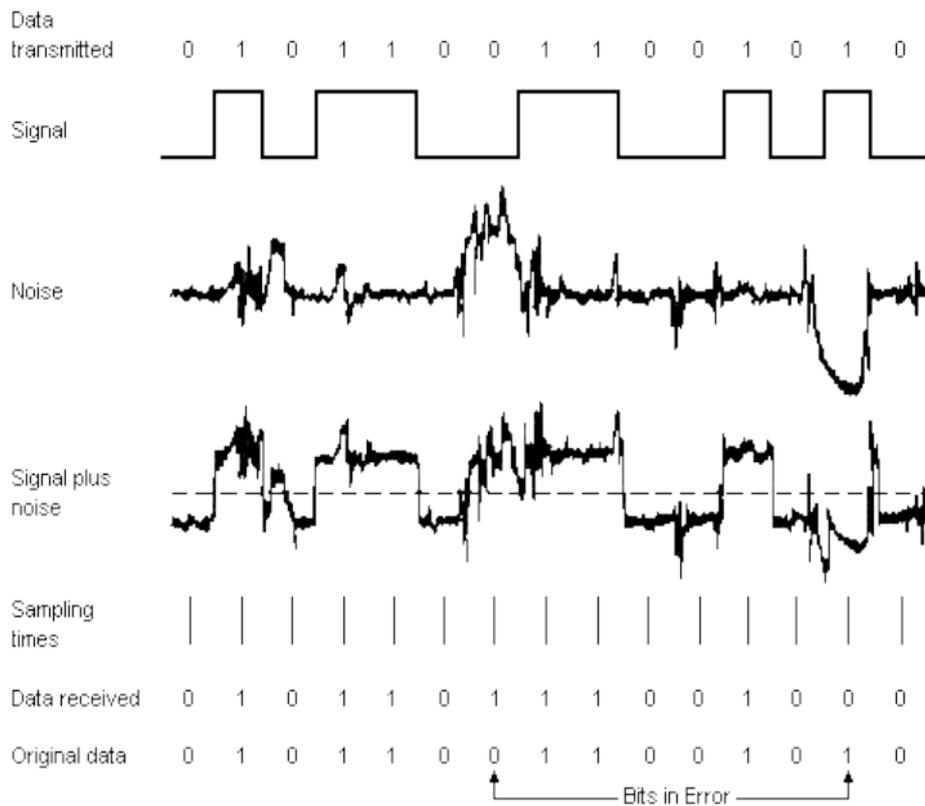


Figura 2.7 – Ruído

Pode-se observar na figura 2.7 que, caso o ruído tenha intensidade suficiente, o sinal original é distorcido a tal ponto que o receptor comete erro de interpretação em alguns bits e compromete a informação enviada originalmente.

Na tabela I é apresentado alguns tipos de ruído comuns em processos de comunicação e suas respectivas características:

Tabela I. Tipos de Ruído

Ruído	Características
Ruído Branco Gaussiano Aditivo (AWGN)	Ruído inerente ao meio físico e deriva da agitação dos elétrons acima do zero absoluto (0° K). Quanto maior a temperatura, maior é a agitação eletrônica e mais intenso é o ruído AWGN.
Ruído de Intermodulação ou Distorção	Ruídos provenientes dos equipamentos responsáveis por gerar o sinal, seja por conta da qualidade e organização dos circuitos utilizados na construção do equipamento ou por conta da baixa precisão do equipamento.
Ruído Impulsivo	Ruído induzido por fontes externas à transmissão, em geral os mais significativos são pulsos de energia muito intensos e de breve duração que geram campos eletromagnéticos intensos na região em que são gerados e acabam por distorcer o sinal que estiver passando em suas proximidades.

2.7.1 - Relação Sinal/Ruído

A SNR (*Signal Noise Ratio*) é um parâmetro de extrema importância na transmissão de sinais digitais modulados [6]. Tal parâmetro mostra a relação entre a potência do sinal recebido com a potência do sinal de ruído efetivo e a unidade de medida é dada geralmente em decibéis (dB).

$$SNR(dB) = 10 \cdot \log(S / N) \quad (2-13)$$

- S (*Signal*): potência do sinal;
- N (*Noise*): potência do ruído.

Essa avaliação é feita do ponto de vista do receptor, no ponto em que S tem o valor diminuído por conta da atenuação do sinal e N tem valor composto pela soma de todos os ruídos envolvidos no canal ou nos equipamentos. A performance da transmissão pode ser avaliada com base neste parâmetro, ou seja, quanto maior o valor de SNR, menor é a chance de o ruído vir a provocar desvios nos pontos de constelação do QAM e desviar os símbolos de suas posições ideais, diminuindo as chances de erro na tomada de decisão do receptor. Isso pode ser feito aumentando a potência do sinal de entrada S e/ou diminuindo a influência do ruído N no receptor. Um dos grandes problemas da atuação do ruído em sinais digitais está nos desvios dos pontos da constelação do sinal modulado, de forma que com esse

deslocamento, pode ser que o demodulador tome uma decisão errada e assim no processo de demodulação, um símbolo errado é considerado. Nas figuras 2.7-1 e 2.7-2 são mostrados exemplos de como o aumento do ruído frente à potência do sinal recebido faz com que haja o deslocamento acima exposto. As figuras foram retiradas de [6].

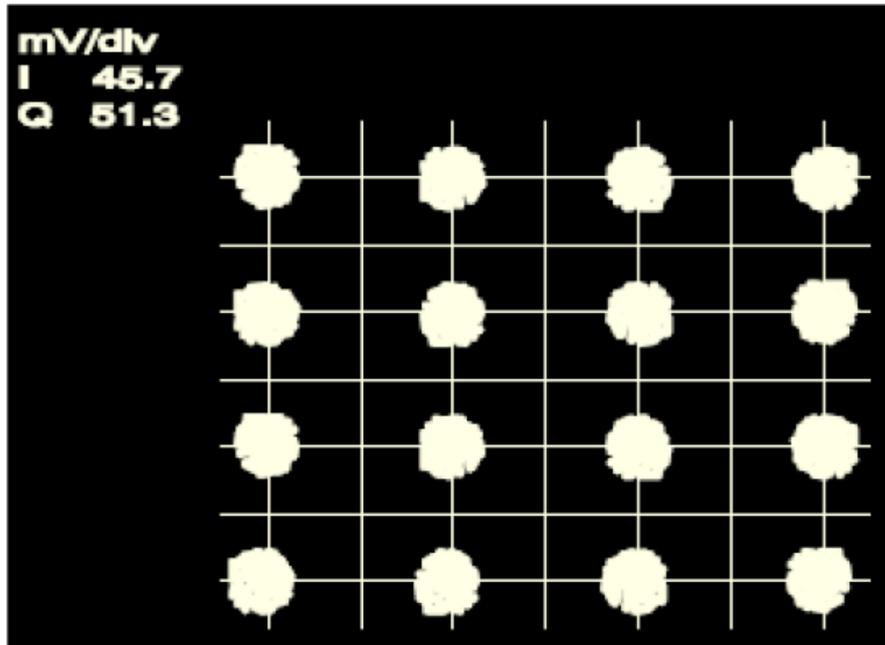


Figura 2.7-1 – SNR de 20 dB para 16 QAM

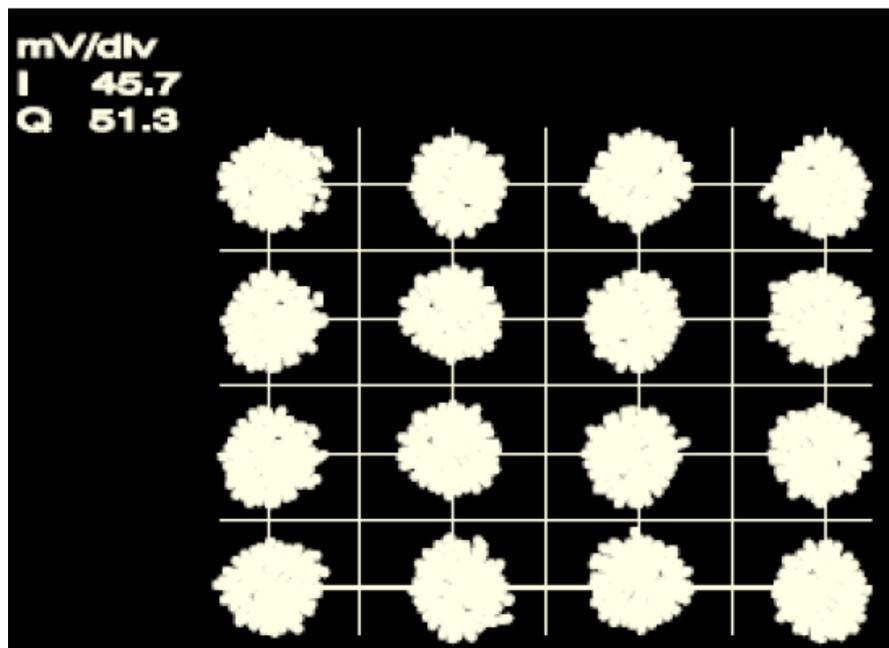


Figura 2.7-2 – SNR de 15 dB para 16 QAM

Em ambos os casos foi considerado uma modulação de 16-QAM, onde para a primeira figura a SNR era de 20dB e na segunda 15dB, de forma que é perceptível o deslocamento dos símbolos causado pelo ruído, de forma que para um receptor a dificuldade de tomada de decisão aumenta consideravelmente, pois agora os símbolos encontram-se mais próximos entre si. O erro na tomada de decisão acarreta prejuízos em todo o processo de comunicação, pois os pulsos elétricos que vão ser recebidos pelo usuário final encontram-se distorcidos em relação ao sinal original enviado pelo equipamento transmissor, de forma que há perda de informação útil.

3. Antenas

3.1 – Introdução

Esta seção é dedicada a explicar os detalhes de operação de antenas e algoritmos de otimização do uso delas.

3.2 – Diagramas de Radiação

As antenas são os elementos responsáveis por emitir e receber campos eletromagnéticos, por exemplo convertendo sinais elétricos de entrada em ondas eletromagnéticas e enviando-os através de um meio, conhecido como canal. Em enlaces convencionais, uma antena é utilizada como elemento transmissor, de forma que transmite as ondas eletromagnéticas a serem propagadas no canal, e outra um elemento receptor, que irá receber as ondas e irá canalizá-las para outros componentes a fim de que o sinal seja demodulado e interpretado. O diagrama de radiação de uma antena fornece a variação angular da radiação a uma distância fixa de uma antena quando a mesma está irradiando o sinal. A potência total irradiada em todas as direções é a mesma, porém a densidade de potência varia dependendo da distância de um ponto em relação à fonte em proporção ao quadrado do padrão. Todas as antenas reais possuem características direcionais, de forma que uma antena transmissora irradia e concentra a potência em uma certa direção de acordo com o determinado ângulo ao redor da antena.

De modo geral, a radiação da antena tem como representação quantitativa o valor da densidade de potência a uma distância fixa da antena e é mensurada com base no diagrama de uma antena isotrópica. Esse tipo de antena tem como característica um padrão de radiação hipotético, que irradia potência igualmente em todas as direções, de forma que é um modelo ideal não realizável, tendo o seu propósito na sua utilização como base de modelos reais.

A seguir é apresentado um exemplo da diretividade do diagrama de radiação entre uma antena real e uma isotrópica:

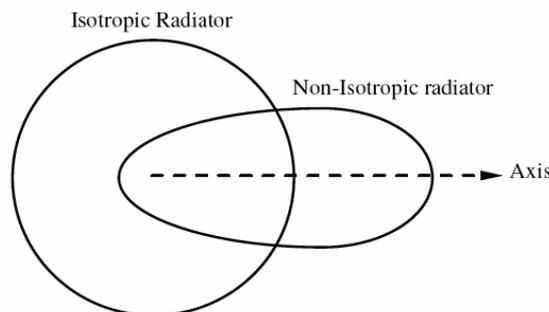


Figura 3.2-1 – Antena Isotrópica x Não-Isotrópica

3.3 – Conjuntos de Antenas

Além do uso de modulações com maiores taxas de transmissão, como visto nas técnicas digitais previamente expostas, é importante utilizar sistemas de propagação que garantam com que essas taxas permaneçam altas. Uma das técnicas que se tem utilizado e tem sido tema de pesquisa e desenvolvimento por diversas empresas é o MIMO, ou *multiple-input and multiple-output*. O diferencial dessa técnica é a possibilidade de enviar ou receber mais de um sinal de dados no mesmo canal de rádio ao mesmo tempo, utilizando uma propagação multi-percurso. Existem diversas configurações de MIMO, as mais utilizadas sendo o SISO, SIMO, MISO além do próprio MIMO original. Cada uma delas será exposta a seguir, sendo mostradas as diferenças entre as configurações [7].

SISO (*Single Input Single Output*)

É o método padrão para formação de enlaces de rádio, onde para um canal de rádio uma antena opera como transmissora e outra como receptora. A grande vantagem desse método se encontra em sua simplicidade, porém esse sistema é mais suscetível a interferências e influência do desvanecimento, ao se comparar com sistemas que utilizam mais antenas. Além disso, a largura de banda é limitada pela Lei de Shannon, definida como:

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (3-1)$$

Onde:

- C é a capacidade do canal em bits por segundo;
- B é a largura de banda do canal em hertz;
- $\frac{S}{N}$ é a relação sinal-ruído do sinal.

É apresentado a seguir um exemplo desse sistema:



Figura 3.3-1 - SISO

SIMO (Single Input Multiple Output)

Para esse sistema utiliza-se uma única antena como transmissora e o receptor possui múltiplas antenas, de forma que esse sistema é conhecido como de múltipla diversidade de recepção. Normalmente é utilizado quando um determinado receptor recebe sinais de um número alto de fontes independentes e deseja-se combater o desvanecimento. Uma das vantagens desse método, está na sua facilidade de implementação, sendo muito utilizado no processo de “escuta” de ondas curtas. Uma de suas desvantagens se encontra na alta capacidade de processamento que o receptor deve ter, visto a quantidade de sinais que o mesmo recebe, gerando custos maiores. É mostrada a figura 3.3-2 que exemplifica esse sistema:



Figura 3.3-2 - SIMO

MISO (Multiple Input Single Output)

Esse sistema tem a chamada diversidade de transmissão, de forma que o transmissor possui múltiplas antenas e no receptor somente uma. O transmissor envia informação redundante para o receptor, tal que este tem a capacidade de receber o sinal ótimo previamente enviado. A grande vantagem desse método é o fato de todo o processamento de múltiplas antenas, além da codificação de redundância agora é transferida para o transmissor, uma ERB por exemplo, de forma que o receptor pode ser mais simples. Em casos de comunicação celular isso é bem visto, pois o UE (equipamento do usuário) pode ter suas dimensões reduzidas, gerando custos menores de hardware e economia de energia. Na figura 3.3-3 é mostrado um exemplo dessa implementação:



Figura 3.3-3 – MISO

MIMO (*Multiple Input Multiple Output*)

Para essa técnica são utilizadas múltiplas antenas tanto no transmissor quanto no receptor, de forma uma codificação para separar os dados para diferentes percursos no canal. Assim é necessário um grande processamento a fim de garantir robustez do canal e alto *throughput* de dados. Apesar da dificuldade de custos e de recursos para implementar esse sistema, os ganhos em velocidade de transmissão de dados são altos, fazendo com que este seja um sistema que cada vez mais é utilizado no mercado. Na figura 3.3-4 é apresentado um exemplo da utilização dessa técnica:



Figura 3.3-4 - MIMO

3.4 – Método de *Dolph - Chebyshev*

Um dos grandes objetos de estudo no campo de antenas se encontra em como o diagrama de radiação das mesmas se comporta em um determinado ambiente. Assim, é importante obter conhecimento de métodos de construção desses diagramas. Com isso, nessa seção é abordado um dos métodos de construção de diagramas de radiação, o método de Dolph-Chebyshev.

O principal objetivo desse método se encontra em conseguir a maior diretividade possível a partir de um dado SLL. Consegue-se atingir esse objetivo quando os lóbulos laterais possuem o mesmo SLL e consegue-se atingir a menor largura de banda possível para essa configuração. Utiliza-se nesse método os polinômios de Dolph- Chebyshev [8], definidos na equação 3-2:

$$T_n(x) = \begin{cases} (-1)^n \cosh(n \cdot \cosh^{-1}|x|) \rightarrow x < -1 \\ \cos(n \cdot \cos^{-1} x) \rightarrow -1 < x < 1 \\ \cosh(n \cdot \cosh^{-1} x) \rightarrow x > 1 \end{cases} \quad (3-2)$$

Onde os polinômios de menor ordem podem ser definidos como:

$$\left[\begin{array}{l} T_0(x) = 1 \\ T_1(x) = x \\ T_2(x) = 2x^2 - 1 \\ T_3(x) = 4x^3 - 3x \\ T_4(x) = 8x^4 - 8x^2 + 1 \end{array} \right.$$

E para os casos de maior ordem através da equação recursiva:

$$T_{n+1}(x) = 2xT_n(x) - T_{n-1}(x) \quad (3-3)$$

A grande característica desses polinômios se encontra na propriedade que eles, para um intervalo de $-1 \leq x \leq 1$, possuem valores que permanecem entre -1 e 1, de forma que a máxima magnitude nesse intervalo é unitária. Graças a essas variações de amplitude restritas a tal região é que se garante os níveis iguais dos lóbulos laterais na modelagem. Além disso, a natureza das funções polinomiais permite que os *array factors* sejam escritos na forma de polinômios, o que é importante para o método. Os *array factors* são funções dependentes da geometria do diagrama de radiação de uma antena e da excitação dos elementos de antena, como fase e amplitude. A forma como os vetores e os polinômios são relacionados é feita considerando uma excitação simétrica tal que

$$i_{-m} = i_m$$

Onde a corrente i_0 se encontra na origem e a m -ésima excitação encontra-se no eixo z na distância $z_m = md$. Pode-se representar o *array-factor* pela seguinte relação:

$$f(\psi) = \begin{cases} i_0 + 2 \sum_{m=1}^N i_m \cos(m\psi) \\ 2 \sum_{m=1}^N i_m \cos \left[(2m-1) \cdot \frac{\psi}{2} \right] \end{cases} \quad (3-4)$$

Em que a primeira equação é utilizada para polinômios ímpares e a segunda para pares:

$$\psi = 2\pi\left(\frac{d}{\lambda}\right)\omega \quad (3-5)$$

Pode ser realizada uma transformação de variáveis entre ψ e x , tal que:

$$x = x_0 \cos \frac{\psi}{2} \quad (3-6)$$

Assim, o *array-factor* pode ser reescrito como:

$$f(\psi) = T_{p-1}\left(x_0 \cos \frac{\psi}{2}\right) \quad (3-7)$$

Antes de iniciar a explanação da aplicação do método é necessário o conhecimento de algumas relações, tais que:

- $SLL = -20 \log R$, onde SLL é o nível do lóbulo lateral em dB e R a razão entre o lóbulo principal e os lóbulos laterais;
- $x_0 = \cosh\left(\frac{\cosh^{-1} R}{P-1}\right)$, onde x_0 representa o ponto de origem no gráfico onde se encontra o lóbulo principal.

Assim, pode ser definida a metodologia de criação do diagrama de radiação por meio desse método.

Inicialmente, a partir de um SLL e um número de elementos especificado em um projeto, além do tipo de antena a ser utilizada, é possível escrever o *array-factor* da mesma, onde são mostrados os pesos de correntes. A partir deste, encontra-se o polinômio de Dolph-Chebyshev análogo de forma a realizar a transformação de variáveis previamente apresentadas. Feito isso, consegue-se reescrever cada peso de corrente em função do x_0 para que a partir de um R conhecido seja possível determinar o valor do ponto na origem. Com os valores dos pesos de corrente em mãos é possível construir graficamente tanto o lóbulo

principal, quanto os lóbulos laterais. A seguir é apresentada uma representação de um exemplo de uma antena de cinco elementos, espaçados em $\lambda/2$ e com SLL de -20 dB.

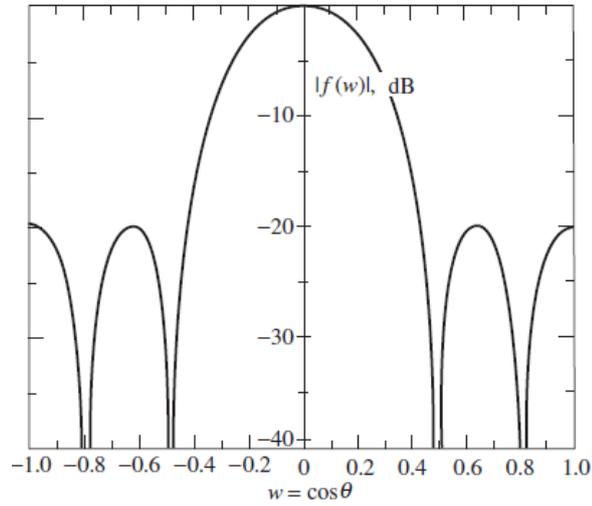


Figura 3.4 – Antena de 5 elementos – Dolph Chebyshev

Pode-se observar que no eixo das ordenadas plotam-se os módulos do *array-factor* e no eixo das abscissas o valor do ω correspondente.

4. Simuladores

4.1 – Introdução

Esta seção apresenta os programas e pacotes necessários para as simulações computacionais dos cenários. Contamos com o auxílio do MATLAB para integrar e executar tais programas.

4.1 - MATLAB

O MATLAB é uma plataforma computacional amplamente utilizada por estudantes de engenharia ao redor do globo terrestre e é uma plataforma que conta com diversas bibliotecas que podem ser implementadas e executadas o que o torna um programa extremamente versátil e de fácil manuseio. O *software* realiza cálculos matriciais, de forma que é possível implementar códigos de processamento de sinais e imagens, além da construção de gráficos. Além dessas características, o mesmo pode ser utilizado em conjunto com outros programas, por meio da integração com softwares que utilizam a linguagem JAVA, por exemplo. No caso desse trabalho é apresentado um apêndice em que se explica como integrar o *applet* JAVA GRADMAX, a ser discutido posteriormente, e o MATLAB, de forma a gerar os diagramas de radiação discutidos.

4.2 – LTE Link Level Simulator

Foi utilizado um pacote disponível pela Universidade de Viena, o chamado *Vienna LTE Link Level Simulator* [1], capaz de realizar simulações de um enlace de comunicação, de forma que em sua estrutura é possível alterar parâmetros tanto no transmissor, quanto no canal e no receptor, levando em consideração modulações utilizadas, desvanecimento e técnicas de utilização de múltiplas antenas, como o MIMO. Assim é possível verificar o comportamento do enlace em um cenário previamente especificado.

4.3 - GRADMAX

O presente trabalho se utiliza do poder computacional do GRADMAX [2] para simular uma antena de fio de dipolo por meio da implementação do método dos momentos [9], que consiste em obter valores aproximados da distribuição de corrente (pesos) da antena a partir da análise de seu comportamento elétrico.

O GRADMAX realiza o cálculo do ganho máximo da antena, bem como estima o diagrama de radiação da estrutura simulada. O algoritmo de otimização (método dos gradientes) atua internamente ao programa. Para que o programa possa funcionar corretamente é necessário que seja definido pelo usuário os nós que compõe cada fio da antena a ser estudada. A partir dessa definição, estabelecem-se as conexões envolvidas entre esses nós, para que assim o programa possa estabelecer os diagramas de radiação, tanto no eixo XY, como no eixo XZ.

Após essa definição, é computado pelo usuário valores de tensão e de fase para cada excitação desejada, além de informações como a disposição dos fios no plano cartesiano, de forma que o programa entende isso como a geometria de cada fio. Com todo esse procedimento realizado, o GRADMAX é capaz de gerar os diagramas de radiação desejados. Além disso, há uma opção em que o próprio programa realiza uma otimização do diagrama em questão. Este processo é feito de forma automática pelo programa.

Por fim é possível realizar um acoplamento de informações entre o GRADMAX e o MATLAB, de forma a contemplar os gráficos e dados obtidos na plataforma matemática. Assim foi possível rodar *scripts* do GRADMAX no editor do MATLAB, de forma que foram realizadas alterações diretamente no último programa gerando uma variedade de diagramas. A seguir, são mostrados algumas das funcionalidades do GRADMAX por meio de fotografias retiradas do próprio ambiente visual do programa.

GRADMAX for Web

Definitions Antenna Geometry Control Optimize Import and Export

Choose a saved work or create a new one below

Examples

Cardioid Load Reset

Title: Cardioid Number of Wires: 2

Number of Loads: 0 Number of Excitations: 2

Frequency (MHz): 300.000 Select for ground mode:

Trunc Graph: 10 dB

Segments Run

Fig 4.3-1 – Determinação da antena a ser utilizada no GRADMAX

Na figura 4.3.1 é mostrada a possibilidade de escolha que o programa oferece da antena a ser utilizada. O mesmo contém em seu acervo diversos exemplos como a cardioide, o dipolo e o monopolo.

GRADMAX for Web

Definitions Antenna Geometry Control Optimize Import and Export

Geometry of each wire (meters):

Wire 1/2

NS: 10 X1: 0.0 Y1: 0.0 Z1: -0.25 C1: 0

R: 0.0050 X2: 0.0 Y2: 0.0 Z2: 0.25 C2: 0

< Previous Wire Next Wire >

Fig 4.3-2 – Determinação do posicionamento de elementos no GRADMAX

Na figura 4.3.2 é mostrada como se pode variar o posicionamento dos elementos de cada fio do antena a ser otimizada, além do número de segmentos a serem utilizados e da impedância relativa aos fios.

GRADMAX for Web

The screenshot displays the 'Control' tab of the GRADMAX for Web interface. It features two main sections: 'Excitation 1/2' and 'Load 1/0'. The 'Excitation 1/2' section includes input fields for 'Pulse Number' (set to 5), 'Voltage Magnitude' (set to 1.0), and 'Phase (degree)' (set to 0.0). Below these fields are two buttons: '< Previous Excitation' and 'Next Excitation >'. The 'Load 1/0' section includes input fields for 'Pulse Number' (set to 0.0), 'Resistance::' (set to 0.0), and 'Reactance:' (set to 0.0). Below these fields are two buttons: '< Previous Load' and 'Next Load >'. The interface also shows a navigation bar at the top with tabs for 'Definitions', 'Antenna Geometry', 'Control', 'Optimize', and 'Import and Export'.

Fig 4.3-3 – Determinação da excitação dos fios no GRADMAX

Na figura 4.3.3 é mostrado como se pode alterar a excitação aplicada a cada fio, onde pode-se modificar tanto a magnitude da tensão, quanto a fase e as características da carga a ser utilizada.

5. Resultados e Análise

5.1 – Introdução

Nesta seção serão incorporadas as simulações no trabalho e analisados os resultados de modo a aperfeiçoar os parâmetros da antena para o cenário proposto.

5.2 – Cenário

Considerando a situação em [10,14], desejamos que o cenário seja otimizado de modo que o sistema de comunicação das antenas obedeça a uma taxa de ruído específica, sendo o principal objetivo alcançar um diagrama de radiação em que a maior parte de sua energia esteja concentrada no enlace a ser otimizado, de forma que a potência irradiada pelos lóbulos secundários seja a menor possível na direção do sistema com menor robustez ao ruído. Assim a magnitude desses lóbulos secundários deve ser limitada a um determinado nível, prevenindo a interferência com antenas adjacentes e diminuindo a BER.

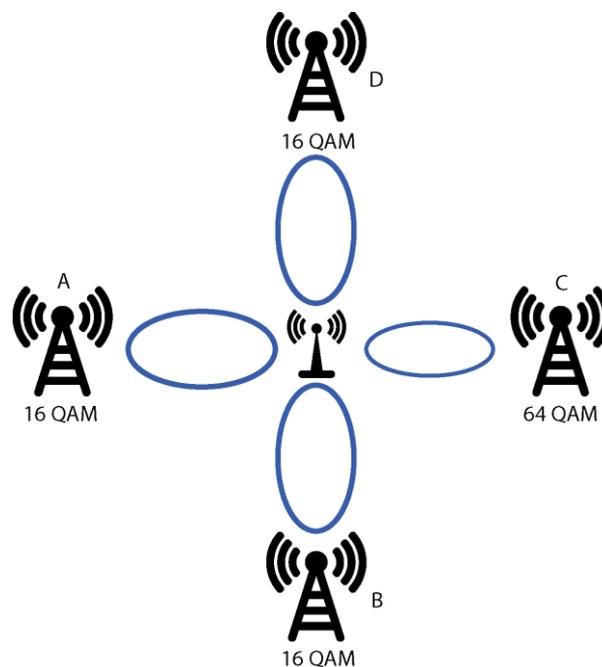


Fig 5.2-1 – Cenário

Reduzindo a máxima interferência entre *links* adjacentes, é possível economizar potência utilizada pela ERB no estabelecimento da comunicação, assegurando um maior QoS para os serviços providenciados.

Utilizando o MATLAB [11] e o *LTE Link Level Simulator*, foram realizadas simulações que comparam as diferenças entre as curvas de BER de um sistema de comunicação SISO estabelecido em um link, quando se usa 16-QAM e 64-QAM. Os parâmetros para o código consistem em uma portadora de frequência 5.8 GHz e banda de 20 MHz, parâmetros característicos utilizados na tecnologia 4G. Assim foi obtido o seguinte resultado.

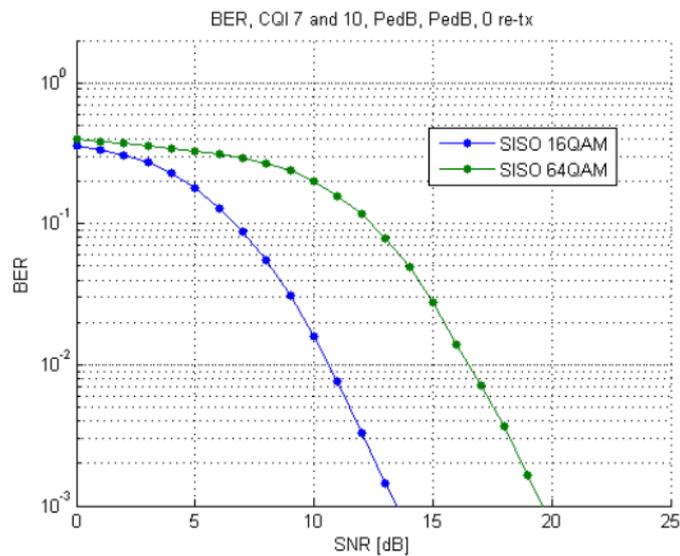


Fig 5.2-2 - BER SISO para 16-QAM e 64-QAM

Tabela II. Taxa de erro de bit (BER)

BER	SNR 16-QAM (dB)	SNR 64-QAM (dB)	Diferença BER (dB)
0.1	6.5	12	5.5
0.01	11	16.5	5.5
0.001	13.5	19.5	6

Pode ser observado da tabela II que para uma taxa de erro de 0,001, a relação sinal ruído, SNR, entre as modulações gira em torno de 6 dB, um valor que pode ser considerado suficiente para a diferença entre os lóbulos principal e secundários, garantindo assim a baixa

interferência desejada nas premissas do projeto. Esses lóbulos são formados pela antena otimizada, direcionados para as ERBs “A”, “B” e “D” em relação à “C”.

Para este cenário, buscou-se na literatura um método padrão de projeto de diagramas de radiação de antenas que atendesse às especificações da situação. Foi decidido então o uso do método de Dolph-Chebyshev [8] por causa de sua ampla utilização e possibilidade de implementação em simuladores de computador, como o MATLAB. Foi selecionada uma antena do tipo *endfire* para o cenário proposto devido à sua alta diretividade. A partir daí, parâmetros tais como o número de elementos e a diferença em dB entre o lóbulo principal e lóbulos secundários, têm seus valores alterados de forma que sejam adequados ao cenário.

Como discutido anteriormente, foi considerado nas simulações que uma diferença de 6 dB entre o lóbulo primário e os secundários é suficiente para satisfazer os requisitos mínimos para a transmissão e recepção do sinal, a fim de gerar menor interferência entre os *links* adjacentes.

Uma outra metodologia para a otimização de antenas, que propõe resultados promissores, é o chamado método das antenas assimétricas, conhecido como método das máscaras, o qual foi adicionalmente melhorado pelos autores deste trabalho em combinação com a teoria de Algoritmos Genéticos [12]. A ideia subjacente ao método de otimização em questão é que, a partir de uma estimativa inicial e um padrão desejado de radiação, o diagrama inicial convirja para a forma final desejada. Nessa técnica, em vez de estabelecer um diagrama específico como um resultado desejado, o espaço de soluções é aumentado, definindo uma região que contém os limites especificados do diagrama.

A plataforma de otimização foi implementada no MATLAB, simulando internamente em JAVA o GRADMAX, gerando assim os diagramas de radiação a fim de realizar uma comparação de resultados obtidos.

Para o primeiro método, foram utilizados códigos em que o algoritmo do Dolph-Chebyshev foi incorporado. Eles podem ser encontrados em [11] e foram sintetizados em forma de códigos recursivos, que são capazes de alterar parâmetros específicos, a fim de criar e conseqüentemente otimizar os diagramas de radiação. Os parâmetros que foram inseridos no programa envolvem o tipo de antena a ser utilizado, o espaçamento entre os elementos de antena, em unidades de comprimento de onda, o número de elementos a serem utilizados e o nível relativo dos lóbulos secundários em relação ao primário em dB.

Para a primeira simulação foi considerado uma antena de 3 elementos, com um espaçamento entre eles de $\lambda / 4$, onde λ é o comprimento de onda e SLL (nível dos lóbulos

laterais) de 6 dB. O resultado foi alcançado com o uso de uma caixa de ferramentas específica do MATLAB. Portanto, obteve-se o seguinte padrão de radiação:

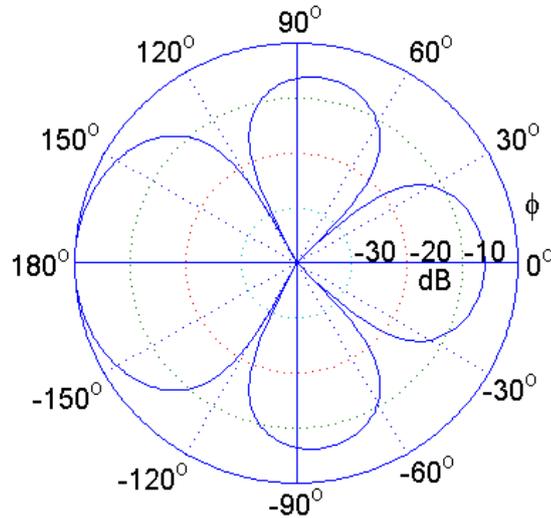


Fig 5.2-3 - Antena de 3 elementos com SLL de 6 dB

Alternativamente, a fim de usar o Método das Máscaras combinado com Algoritmos Genéticos para a simulação e otimização do cenário proposto, foi procurado na literatura uma antena que possuísse um diagrama de radiação tão perto quanto possível do desejado [13]. Esta antena foi utilizada como uma base para o processo de otimização posteriormente aplicado e é de um tipo assimétrico com diferença entre os lóbulos principal e secundários de 4,5 dB. A geometria da rede de alimentação é listada na Tabela III.

Tabela III. Geometria e rede de alimentação do ponto de partida do processo de otimização

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

A função de erro médio quadrático é usada como a base deste cálculo para obter os parâmetros de excitação de uma antena possuindo uma diferença entre os lóbulos direcionados às ERBs "A", "B", "D" em relação ao direcionado à ERB "C", de aproximadamente 6 dB. Então, utilizando a plataforma de otimização do GRADMAX [2]

com os parâmetros iniciais listados na Tabela III, o seguinte padrão de radiação da Fig. 4 foi obtido, mostrando que os requisitos para o cenário proposto foram cumpridos.

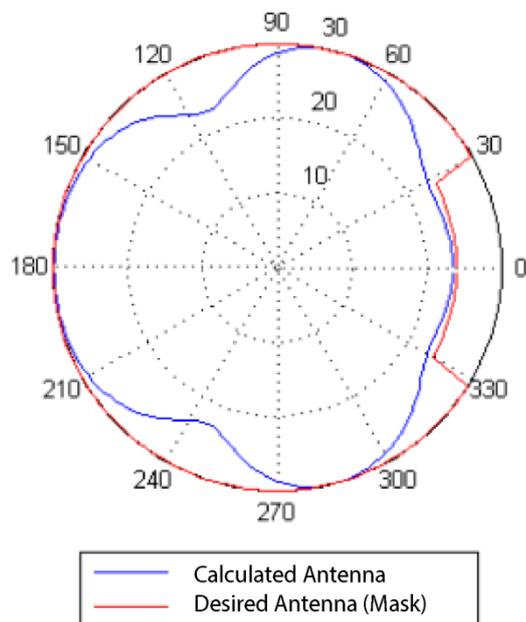


Fig 5.2-4 - Otimização via método das máscaras e Algoritmos Genéticos

Para esta situação específica, pode ser apreendido que seja utilizando o método de antenas simétricas ou assimétricas, um resultado satisfatório é obtido. Através do Método das Máscaras em combinação com os Algoritmos Genéticos, é possível utilizar um menor número de elementos de antena para conseguir um padrão de radiação desejado, de modo que em um desenho de projeto real, haveria redução de custos, particularmente na fabricação e manutenção das antenas.

Finalmente, a técnica de antenas assimétricas pode ser considerada mais confiável devido ao fato de que leva em conta a geometria real das antenas e alimentações, bem como o acoplamento mútuo entre elas, enquanto o de Chebyshev considera elementos isotrópicos.

5.3 – Alteração de Cenário: Aproximações pelo Método das Máscaras

O cenário a ser analisado é análogo ao anterior e consiste em um esquema que é composto por quatro estações rádio-base, dispostas de maneira equidistante em relação a um sistema central de antenas de referência, com posicionamento inalterado, em formato de

diamante. O objetivo reside em realizar um estudo de otimização do diagrama de radiação da antena de modo que a maior parte da energia seja direcionada para o sistema com modulação menos robusta ao mudar a máscara, ou seja, mudar a direção em que desejamos que o diagrama de radiação seja propagado e manter as características de aproveitamento do espectro sem mudar a posição dos fios, um princípio análogo ao que fariam as chamadas antenas inteligentes (*smart antennas*) [15] que tem *arrays* que se adaptam às mudanças do ambiente em que estão inseridas e mudam o padrão dos lóbulos de modo a atender as condições em que estão submetidas.

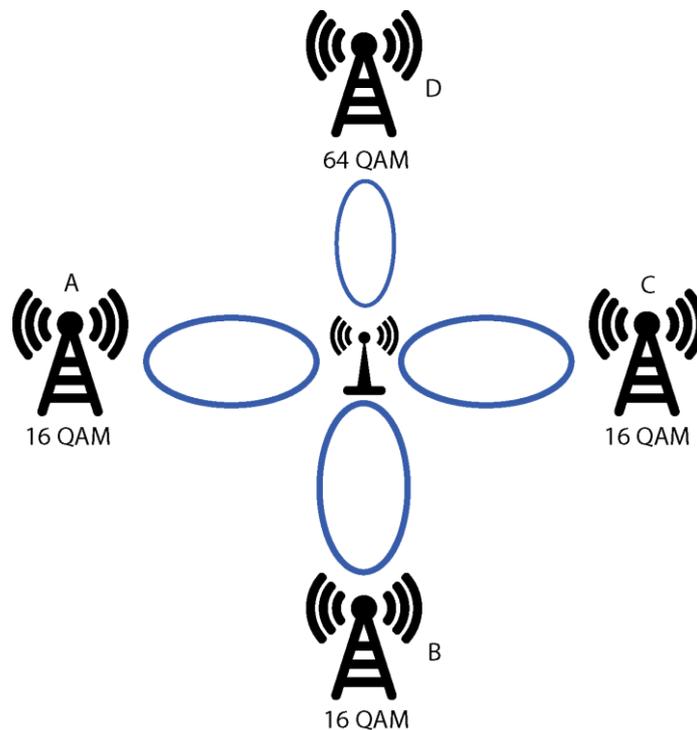


Fig 5.3-1 – Cenário Alterado

Ao mesmo tempo, existe a preocupação com a interferência entre sinais por conta dos lóbulos secundários de uma antena transmissora invadindo o espaço de irradiação da antena transmissora adjacente a ela. Espera-se que a antena consiga estabelecer comunicação com a ERB 'A' de maneira que cause a menor interferência possível com as ERBs próximas, ou seja, que a potência dos lóbulos secundários seja a menor possível.

Observando a figura 5.3.1, as ERBs 'A', 'B' e 'C' estão operando com 16-QAM ao passo que a ERB 'D' trabalha com 64-QAM. O método convencional de otimização assume que nós precisamos de uma maior potência irradiada na direção do *link* onde a modulação é menos robusta, no nosso caso as ERBs 16-QAM. Esquemas de modulação mais altas podem suportar alta capacidade de transmissão de dados, em geral com tráfego de baixa prioridade

enquanto que esquemas de modulação mais baixos são adequados para baixa capacidade de transmissão e serviços de alta prioridade, tais como a transmissão de voz.

Essa alteração de cenário foi realizada a fim de efeito de comparação, de forma a gerar um entendimento das mudanças relacionadas à criação de máscaras e utilização do GRADMAX do novo cenário. O objetivo, no caso, é a verificação de como o diagrama de radiação deveria ser alterado caso as modulações entre os enlaces formados entre as ERBs “C” e “D” em relação à antena central fossem alterados, ou seja, o enlace relacionado à ponta “C” teria uma modulação de 16 QAM e o relacionado à ponta B de 64 QAM

Para esse caso só será feita a análise utilizando o método das máscaras, pois assim como exposto anteriormente, é uma técnica que garante resultados mais próximos do real, pois considera a aplicação de geometrias assimétricas. Inicialmente, considera-se uma nova máscara que delimita o lóbulo secundário na direção da ponta “D” em 4,5dB. A máscara nesse caso é análoga ao estudado anteriormente, porém rotacionada em 90° no sentido anti-horário em relação ao cenário anterior. Realizando alterações no script do programa em JAVA, foi obtida a máscara a seguir:

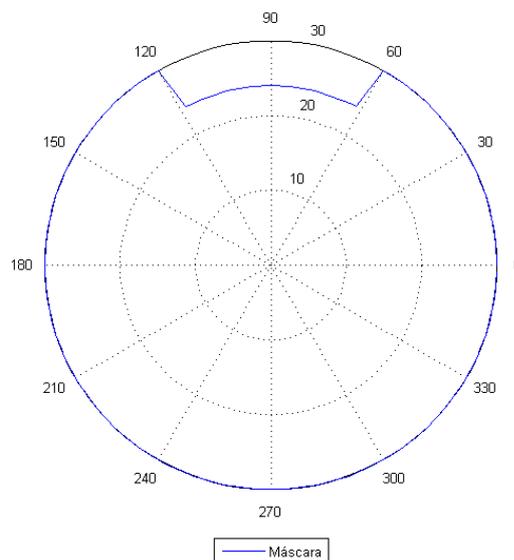


Fig 5.3-2 – Nova máscara

Em posse dessa nova máscara, alteramos o *script* do MATLAB relacionado ao novo cenário de forma a gerar um novo diagrama de radiação com base nessa máscara. O resultado, após parada predeterminada em 11.500 iterações, segue:

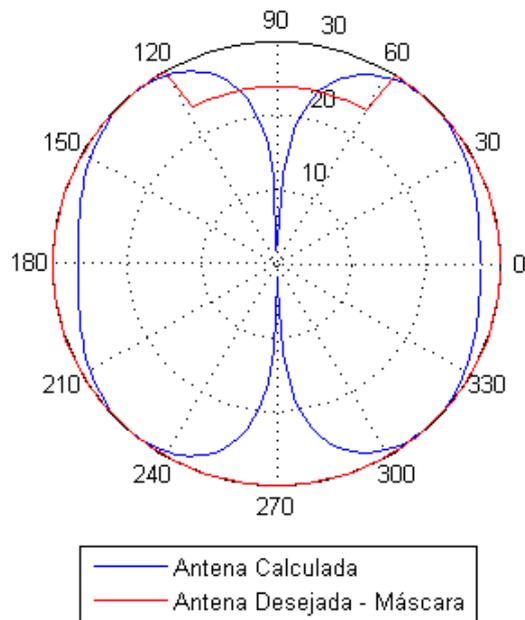


Fig 5.3-3 – Novo diagrama de radiação

Pode ser verificado pelo diagrama da figura anterior que o objetivo nesse caso não foi alcançado, a máscara não consegue modelar o diagrama de radiação. Uma das possíveis explicações para o ocorrido envolve a rotação da máscara que acaba por alterar a região a ser limitada pelo diagrama e pelo fato de estar sendo utilizadas antenas dipolo que possuem uma região de nulo em 90°. Essa região nula é levada em conta no algoritmo e gera variáveis no MATLAB que não se estabilizam, inviabilizando assim que o programa convirja para uma solução possível.

Logo, para que se conseguisse delimitar os lóbulos secundários de forma a garantir uma menor interferência na ERB “D”, é necessário alterar o posicionamento dos elementos de antena. Para isso, foi feita a seguinte alteração:

Tabela IV. Geometria e rede de alimentação do processo de otimização para o novo cenário

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

Como pode ser observado foi necessária uma alteração no posicionamento dos elementos entre os eixos X e Z, de forma que após essas mudanças o seguinte diagrama de radiação é criado:

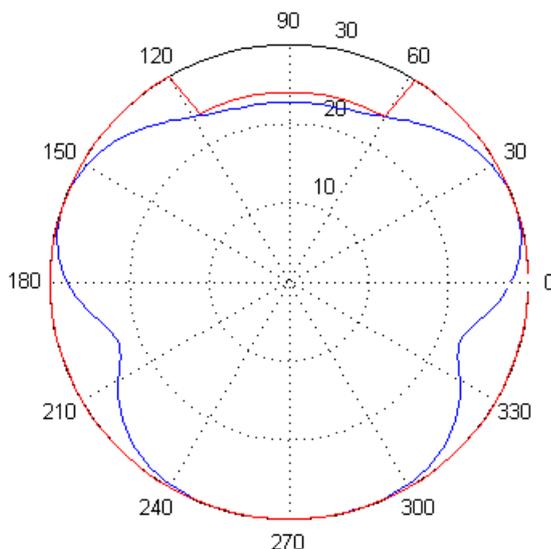


Fig 5.3-4 – Diagrama de radiação com posicionamento alterado

Com isso, prova-se que para o cenário alterado acima, o diagrama só acompanha a nova condição se também rotacionarmos os elementos das antenas. Para o caso do nosso cenário, a antena transmissora pode atender a antenas receptoras que não fazem parte do cenário proposto ou até mesmo ter seus elementos distribuídos. A transmissora poderia dispor de um sistema mecânico que rotacionasse os elementos para atender outras antenas, com outras condições de limitação dos lóbulos e ainda assim aproveitar ao máximo toda a extensão do diagrama de radiação da maneira mais eficiente possível, conceito este que pode ser entendido como o de antenas semi-inteligentes.

5.4 – Aplicações futuras na otimização de sistemas de comunicação

Algumas tecnologias têm sido desenvolvidas no sentido de aumentar o aproveitamento das antenas no atendimento a um grande número de usuários em redes celulares. Para situações onde uma ERB encontra-se “sobrecarregada” pelos usuários de uma determinada região, é necessário que se obtenha soluções para que não haja perda de qualidade nos serviços prestados aos clientes. Uma das tecnologias que se mostra promissora para esse caso é a de antenas inteligentes [15]. Uma das características dessas antenas está na capacidade de realizar mudanças, nos lóbulos formados pela mesma, dinamicamente, para que os mesmos

num determinado momento “iluminem” uma região específica da célula, de forma que se tem um padrão de cobertura do diagrama de radiação que aumenta a capacidade do sistema.

Assim é possível modificar o tamanho das células dinamicamente, balanceando as demandas de tráfego entre diversas ERBs. Graças a essa tecnologia obtém-se vantagens na redução da potência utilizada nas ERBs, a possibilidade de diversos usuários compartilharem um determinado recurso do espectro, possibilidade de aplicar diferentes classes de QoS para usuários com necessidades diferentes, capacidade de trabalhar em conjunto com estações convencionais e redução de custos, algo essencial para a aplicação comercial de sistemas de comunicação.

Em conjunto à essa tecnologia pode-se utilizar o conceito de rádios cognitivos. Os mesmos são modalidades de rádio que fazem o uso de faixas do espectro subutilizadas sem causar, no entanto, interferências. Com isso tem-se o aumento de banda utilizável pela ERB à um custo menor do que utilizando rádios convencionais.

Aliado a essa nova categoria de rádios, no sentido da cooperação na otimização do sistema de comunicação, pode-se realizar técnicas de reuso de espectro, onde codificações e modulações adaptativas são colocadas em prática, de forma que um enlace de rádio pode modificar seu esquema de modulação em reação a alguma mudança nas próprias condições do enlace. Assim quando o sistema requerer alta capacidade sem uma necessidade de priorização de tráfego, utiliza-se modulações mais altas.

Quando o sistema requerer baixa capacidade, no sentido de priorizar algum serviço, como o de voz, utiliza-se modulações mais baixas. Todas essas mudanças, porém, dependem de fatores intrínsecos ao ambiente em que se está operando. Condições de desvanecimento, por exemplo, podem dificultar a eficiência dessas técnicas, além de características climáticas, que podem gerar diversas interferências.

6. Conclusões

No trabalho proposto, foram levados em consideração diversos parâmetros necessários para um projeto de um sistema de comunicação, tais como as influências de diferentes ordens de modulação no estabelecimento de enlaces, as taxas de erros para cada uma dessas modulações e a importância que se deve dar à maneira como um diagrama de radiação de uma antena se comporta frente a diversas ERBs próximas entre si.

O diagrama de radiação de uma antena foi o tema mais explorado, de forma que foram estudadas metodologias de construção desses diagramas para antenas de fio e quais são as vantagens e desvantagens apresentadas entre os métodos propostos.

O método de antenas simétricas foi explorado como uma forma em que seria possível gerar os diagramas permitindo que os lóbulos secundários de uma determinada antena fossem controlados a fim de que não interferissem em sistemas que utilizassem modulações menos robustas ao ruído. Além deste foi explorado o método das antenas assimétricas, que em comparação com o método anterior, se mostrou como mais vantajoso em alguns aspectos, devido ao fato de contabilizar geometrias de antenas reais e da possibilidade de utilizar menos elementos de antena para um determinado diagrama de radiação desejado.

Somando-se a esses métodos o conhecimento de técnicas de utilização de múltiplas antenas, é possível otimizar sistemas de comunicação, como no LTE, de forma a aumentar os ganhos e as taxas de transmissão de dados, gerando uma maior qualidade de serviço em redes móveis e melhorando a utilização da banda disponível, recurso cada vez mais escasso nos dias atuais.

Com isso o objetivo do trabalho consistiu em, por meio da utilização de processos computacionais, realizar alterações no processo da radiação de antenas [14]. Nesse aspecto, pode ser entendido como um trabalho futuro a aplicação de *loops* externos em que caso haja alguma alteração do cenário, como a mudança das modulações dos enlaces e problemas de interferência, o programa seja capaz de realizar dinamicamente as alterações necessárias no diagrama de radiação, de forma que este contemple a nova configuração de cenário.

7. Referências Bibliográficas

- [1] CHRISTIAN; C.I. JOSEP; S. MICHAL; STEFAN, W. M. E R. MARKUS. *Os Simuladores LTE de Viena – Permitindo Reproducibilidade em Pesquisas de Comunicação sem Fio*.
- [2] RABELO, R. E TERADA, M., *Plataforma Computacional para Otimização de Antenas Multi-Lóbulos Eficientemente Integradas a Sistemas de Comunicação sem Fio*, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, 2012.
- [3] HALLYDAY, D. WALKER, J. E RESNICK, R. *Fundamentos da Física 3- Vol. 3 Eletromagnetismo*, 8ª Edição, Editora LTC
- [4] LATHI, B.P., *Sistemas de Comunicações Analógicos e Digitais Modernos*,. 4ª edição, Editora LTC.
- [5] ORTIZ, F. E TERADA, M. *Tecnologia 4G LTE: Futuro e Tendências no Brasil*, Trabalho de Graduação, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, 2011.
- [6] HORTA A. C. L. *Rádio Enlace Digital – Conceitos Básicos*. Artigo da SIEMENS Publicado por Doc-Services LTDA
- [7] VALENZUELA, R. *Multiple Antenna Systems: A New Wireless Communication Technology of Extraordinary Bandwidth Efficiency for 3G and Beyond*. Bell Lab Innovations
- [8] STUTZMAN, W. E THIELE, G., *Antenna Theory and Design, 3rd edition* John Wiley & Sons, 2014.
- [9] RABELO, R. E TERADA, M. *Análise e Otimização de Antenas de Fio pela Internet*. IEEE Antennas and Propagation Magazine. Vol. 52, pp. 188-194, Fevereiro de 2010.
- [10] KLEY, R. E TERADA, M., *Otimização de Sistemas de Comunicação: Modulação Digital e Antenas*, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, 2014.
- [11] SOPHOCLES J. ORFANDIS, *Electromagnetic Waves and Antennas*.
- [12] K. F. MAN, K. S. TANG, S. KWONG, *Genetic Algorithms: Concepts and Designs, Vol .1*, Springer, 1999.
- [13] HALL, G. *The arral antenna book. The Antenna Radio Relay League*, 1988.
- [14] FRANCO, G.; QUINTANILHA. S E TERADA, M, *Optimization in Antenna Communication Systems: Digital Modulation Analysis*. Article submitted to International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC) 2015 – Porto de Galinhas/PE - BR
- [15] STEVANOVI I., SKRIVERVIK A. E MOSIG, R., *Smart Antenna Systems for Mobile Communications*. Article submitted by Ecole Polytechnique Federale de Lausanne

8. ANEXO – Integração do JAVA no MATLAB

As simulações encontradas neste trabalho foram realizadas com o auxílio da ferramenta computacional GRADMAX, software criado pelo orientador deste trabalho, Prof. Dr. Marco Antônio Brasil Terada e traduzido para a linguagem JAVA pelo Prof. Dr. Rafael Rabelo.

A cada versão do MATLAB, novas linhas de código são introduzidas e pequenas alterações na estrutura de funcionamento do programa influenciam sua operação. Considerando as novas versões do MATLAB a partir da versão 2013a, encontramos problemas para integrar a versão JAVA do GRADMAX no MATLAB por meio de manuais escritos anteriormente, que já não satisfazem todas as condições necessárias para a integração entre essas duas ferramentas. A seguir é apresentada uma atualização do passo a passo para a integração entre ambas.

Como incluir um arquivo JAR do JAVA para rodar o GRADMAX no MATLAB a partir da versão 2013a?

1. Fechar o MATLAB caso esteja aberto.
2. Compilar o projeto Java utilizando a versão 1.3 do Java para gerar um pacote GRADMAX.JAR. O MATLAB tem problemas em utilizar versões posteriores, sendo assim, deve-se utilizar a versão 1.3.
3. Copiar o arquivo GRADMAX.JAR gerado para a pasta `$MATLABROOT/Java/jar`
4. Abrir o arquivo `$MATLABROOT/toolbox/local/classpath.txt` e adicionar a linha `$matlabroot/java/jar/GRADMAX.jar`. Se estiver no Windows 7 ou posterior e o editor de texto mencionar que o arquivo está sendo utilizado por outro programa, provavelmente você não tem permissão para gravar diretamente na pasta do MATLAB. Para contornar esse problema, salve o arquivo primeiramente em uma pasta qualquer e copie-o em seguida para a pasta indicada.
5. Abrir o MATLAB
6. Inserir as seguintes linhas de comando antes de rodar os programas:

```
import GRADMAX.*  
javaaddpath(fullfile(matlabroot,'java','jar','GRADMAX.jar'))
```

7. Após seguir os passos, todas as funções do GRADMAX podem ser reproduzidas.