

Vívian Cesário Pereira

**ANÁLISE DE SISTEMAS MIMO PARA OTIMIZAÇÃO DA CAPACIDADE DO
CANAL**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Danilo Silva, Ph.D.

Florianópolis - SC

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Pereira, Vivian Cesário

ANÁLISE DE SISTEMAS MIMO PARA OTIMIZAÇÃO DA CAPACIDADE
DO CANAL / Vivian Cesário Pereira ; orientador, Danilo
Silva, 2019.

70 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. MIMO. 3. Capacidade do Canal.
I. Silva, Danilo. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

Vívian Cesário Pereira

**ANÁLISE DE SISTEMAS MIMO PARA OTIMIZAÇÃO
DA CAPACIDADE DO CANAL**

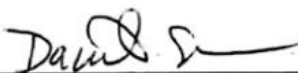
Este Trabalho foi julgado adequado como parte dos requisitos para
obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado, em
sua forma final, pela Banca Examinadora

Florianópolis, 12 de julho de 2019.



Prof. Renato Lucas Pacheco, Dr.
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, em exercício

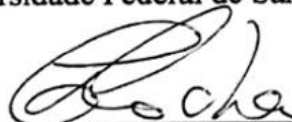
Banca Examinadora:



Prof. Danilo Silva, Ph.D.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Walter Pereira Carpes Junior, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Carlos Aurélio Faria da Rocha, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina

*Este trabalho é dedicado a
minha mãe Soila que sempre
acreditando na minha capacidade, me
deu a força que precisava para seguir
em frente.*

RESUMO

O sistema de comunicação sem fio requer uma largura de banda suficiente para atender a demanda de usuários que exigem cada vez mais velocidade de transferência de dados.

O sistema múltiplas entradas e múltiplas saídas, ou do inglês, Multiple Input Multiple Output (MIMO) se tornou uma solução atrativa no sistema de comunicação móvel para atender maiores taxas de transferência de dados sem a necessidade de recorrer a uma maior largura de banda, visto que os recursos de frequência são limitados.

Este trabalho aborda as principais técnicas utilizadas no MIMO que objetivam o aumento da eficiência espectral do sistema. Através de resultados de simulações será evidenciado os parâmetros que impactam na capacidade do canal. Esses resultados serão utilizados para concluirmos a melhor forma de usarmos o sistema afim de obter a melhor performance possível.

Palavras-chave: 1. MIMO 2. Capacidade 3. Taxa de Transferência de dados 4. Eficiência Espectral.

ABSTRACT

The emerging wireless communication system requires sufficient bandwidth to support the increasing demand for high data rate.

The Multiple Input Multiple Output (MIMO) system has become an attractive solution to improve data rate without the need for more bandwidth, given the fact that frequency resources are limited.

This paper demonstrates the main techniques used by the MIMO system to enhance spectral efficiency. Using the simulation results, it will be shown the parameters that affect the channel capacity. The results will also be used to conclude on the best way to use the MIMO system in order to obtain the best performance possible.

Palavras-chave: 1. MIMO 2. Channel Capacity 3. Dada Rate 4. Spectral Efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Estação Rádio Base [3].	4
Figura 2- Canal Uplink e Downlink [4].	5
Figura 3- Propagação LOS e NLOS [5].	6
Figura 4- Elemento dispersor	7
Figura 5- KPI de desempenho da rede [11].	8
Figura 6- Comunicação entre Tx e Rx.	10
Figura 7- Dipolo de meia onda.	11
Figura 8- Diagrama de radiação [6].	12
Figura 9- Diagrama de radiação 3D [7].	13
Figura 10- Coordenadas esféricas [7].	13
Figura 11- Arranjo de antenas.	15
Figura 12- Sistema MIMO [9].	17
Figura 13- Diversidade de transmissão [8].	18
Figura 14- Ganho de diversidade [8].	19
Figura 15- Multiplexação Espacial [8].	20
Figura 16- Canal sem fio [10].	22
Figura 17- Transmissão CSIT.	26
Figura 18- Espalhamento de Doppler.	28
Figura 19- Classes de desvanecimento.	29
Figura 20- Transmissão Tx e Rx.	37
Figura 21- Geometria com dispersão uniforme [8].	38
Figura 22- Capacidade do canal vs. Número de antenas.	40
Figura 23- Capacidade vs. SNR.	41
Figura 24- Capacidade vs. Número de antenas para diferentes grau de correlação.	43
.....	43
Figura 25- Capacidade vs. Grau de correlação MIMO 2x2.	44
Figura 26- Capacidade vs. Grau de correlação MIMO 4x4.	45
Figura 27- Grau de correlação vs. Número de elementos dispersores.	46
Figura 28- Capacidade vs. Número de elementos dispersores.	47
Figura 29- Capacidade vs. Espaçamento entre elementos.	48
Figura 30- Capacidade vs. SNR para diferentes ângulos de dispersão.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Parâmetros da simulação figura 23.	40
Tabela 2- Parâmetros de simulação figura 24.	41
Tabela 3- Parâmetros de simulação figura 25.	43
Tabela 4- Parâmetros de simulação figura 26 e 27.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MIMO – Multiple Input Multiple Output

SISO – Single Input Single Output

CDMA - Code-division multiple access

RF – Radio Frequency

ERB – Estação Rádio Base

EU – User Equipment

DL - Downlink

UL - Uplink

NLOS – Non line-of-sight

LOS – Line of sight

AoD – Angle of Departure

AoA – Angle of Arrival

HPBW – Half Power Beam Width

i.i.d – Identicamente e igualmente distribuido

CSIT – Channel State Information at the transmister

CSIR – Channel State Information at the receiver

SNR – Signal to noise ratio

KPI – Key Performance Indicator

CGI – Cell Global Identity

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	Objetivos	1
1.1.1.	Objetivo geral	1
1.1.2.	Objetivo específico	1
1.2.	Organização do Documento	2
2.	COMUNICAÇÃO MÓVEL	3
2.1.	Introdução	3
2.2.	Telefonia Celular.....	4
2.3.	Otimização de Rede	8
3.	ANTENAS	9
4.	MIMO	16
4.1.	Introdução	16
4.2.	Princípios de funcionamento MIMO.....	16
4.2.1.	Diversidade Espacial	17
4.2.2.	Multiplexação Espacial	20
4.3.	Canal de Rádio Propagação.....	21
4.3.1.	Introdução	21
4.3.2.	Modelo Básico do Canal	21
4.3.3.	Capacidade do Canal MIMO	23
4.3.4.	Loop Aberto e Loop Fechado	25
4.3.5.	Propriedades Intrínsecas do Canal	26
4.4.	Modelo Analítico do Canal	30
4.4.1.	Modelo de Canal MIMO com Variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas (descorrelacionadas)	31
4.4.2.	Canais correlacionados MIMO	31
4.5.	Modelo de Canal Kronecker	34
4.6.	Efeitos que causam autocorrelação espacial	36
5.	SIMULAÇÃO	39
5.1.	Avaliar a Capacidade do Sistema MIMO em Canais de Desvanecimento Rayleigh Descorrelacionados.....	39
5.2.	Avaliar a Capacidade do Sistema MIMO em Canais Correlacionados.....	42
5.3.	Impacto causado pelo ângulo de dispersão, espaçamento entre elementos do arranjo de antenas e número de elementos dispersores no grau de correlação do Sistema MIMO	45
6.	CONCLUSÃO	50
7.	REFERÊNCIAS	52

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por uma alta taxa de transferência de dados junto com o fato de que o espectro de frequência é limitado, serviu de motivação para que pesquisadores explorassem técnicas que aumentassem a capacidade do canal sem a necessidade de recorrer a mais recurso de frequência [1]. Com o propósito de aumentar a eficiência espectral foram desenvolvidas diversas técnicas, dentre elas, a modulação CDMA, reuso de frequência, e o sistema MIMO [2]. A técnica abordada neste TCC é o sistema MIMO.

1.1.OBJETIVOS

1.1.1. **Objetivo geral**

Este trabalho tem como objetivo geral demonstrar o funcionamento do sistema MIMO e como este pode ser implementado da melhor forma para obter a capacidade ótima do canal.

1.1.2. **Objetivo específico**

- Compreender como o sistema MIMO funciona dentro da comunicação móvel.
- Avaliar a capacidade do sistema MIMO em canais de desvanecimento Rayleigh.
- Investigar o efeito da autocorrelação espacial na capacidade do canal em sistemas MIMO.
- Estudo da otimização do sistema MIMO em canais correlacionados.
- Avaliar o impacto causado pelo ângulo de dispersão θ_r , espaçamento entre elementos do arranjo de antenas e número de elementos dispersores na capacidade do sistema MIMO para canais de desvanecimento correlacionados.

1.2. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

A primeira parte deste TCC explica conceitos teóricos básicos sobre antenas e comunicação móvel. As antenas são os elementos físicos fundamentais que constituem o sistema MIMO e a comunicação móvel tem as antenas como elemento chave para seu funcionamento. Por isso, um estudo preliminar sobre esses temas é fundamental para um melhor entendimento sobre o sistema MIMO.

Recapitulado os temas da primeira parte, iniciaremos nosso estudo sobre o sistema MIMO. O objetivo é explicar como o sistema funciona, será visto conceitos como diversidade espacial, multiplexação espacial e explicaremos como o sistema faz uso destes para aumentar sua capacidade. Um dos temas tratados também será o canal de propagação, será apresentado modelos analíticos que visam simular esses canais, que poderão ser correlacionados ou não correlacionado. Esses modelos serão utilizados nas simulações realizadas neste TCC.

Por fim, a terceira e última parte deste TCC põe em prática as questões teóricas vistas, e tem os seguintes objetivos: entender melhor como o sistema MIMO funciona, analisar quais parâmetros influenciam no seu desempenho, como esses parâmetros irão afetar a capacidade do canal, e qual a melhor maneira de manipulá-los afim de obter a melhor capacidade.

Este trabalho será finalizado com uma conclusão dos temas aqui abordados.

2. COMUNICAÇÃO MÓVEL

2.1. INTRODUÇÃO

A capacidade de podermos nos comunicar através de uma rede sem fio enquanto nos movemos, tem tido uma evolução bastante dinâmica em relação a tecnologia empregada, nos possibilitando a cada vez mais. No início da comunicação móvel, estávamos limitados a mensagens *paging*, logo após, mensagens de texto e voz. Atualmente, temos acesso à internet, com uma velocidade que nos permite assistir filmes de nossos celulares, fazermos vídeo conferencia, monitorar nossas casas a distância através de câmeras conectadas a internet e em um breve futuro, teremos até mesmo veículos autônomos conectados a rede. As aplicações que fazem e podem vir a fazer uso da comunicação móvel são infinitas e nossa rede atual ainda é limitada, não tendo capacidade para atender a todas essas demandas. Com isso, há uma necessidade constante para a evolução das redes móveis, que não se limita ao 4G, nem mesmo ao 5G, atualmente já se fala do 6G e certamente não irá parar por aí [12].

Os impactos socioeconômicos causados pela evolução da comunicação móvel foram tamanhos que, por conta desta evolução, mais especificamente, com a chegada próxima do 5G, estamos prestes a vivenciar a quarta revolução industrial que irá, de maneira menos sutil que as tecnologias anteriores, mudar o mundo em que vivemos [12].

O sistema MIMO que começou a ser empregado dentro da comunicação celular apartir do 4G, foi um grande avanço na comunicação móvel, fazendo com que a taxa de transferência de dados fosse consideravelmente maior em relação as tecnologias celulares anteriores, disponibilizando ao usuário uma nova gama de serviços, como vídeo conferência, jogos online, etc.

2.2. TELEFONIA CELULAR

Para entender o sistema MIMO dentro de seu contexto, será apresentado neste capítulo, de uma forma geral, os principais conceitos relacionados a comunicação móvel.

Dentro da comunicação móvel, existe a telefonia celular, que possibilita dispositivos eletrônicos realizarem chamadas de voz, enviarem mensagens de texto e conectarem-se a internet. Essa transmissão de dados é feita através de uma comunicação sem fio entre o usuário e a estação rádio base.

A comunicação rádio frequência (RF) entre o usuário e a rede possui três elementos principais, são eles:

- (a) **Equipamento do usuário**, ou do inglês, user equipment (UE). O UE é um dispositivo móvel usado para conectar-se a estação rádio base através da interface aérea, como por exemplo telefones celulares.
- (b) **A estação rádio base (ERB)**, é usada para conectar-se ao UE através da interface aérea, que consistem em sua maior parte, de uma torre fixa que abriga equipamentos de telecomunicação.



Figura 1- Estação Rádio Base [3].

- (c) A **interface aérea** é o meio pelo qual as ondas eletromagnéticas se propagam afim de transmitir a informação entre UE e ERB, também chamando de canal. Quando o sentido da transmissão de dados vai da ERB para o UE chamamos esse canal de *downlink* (DL), e quando a comunicação se dá no sentido do UE para a ERB, é chamando de canal *uplink* (UL).

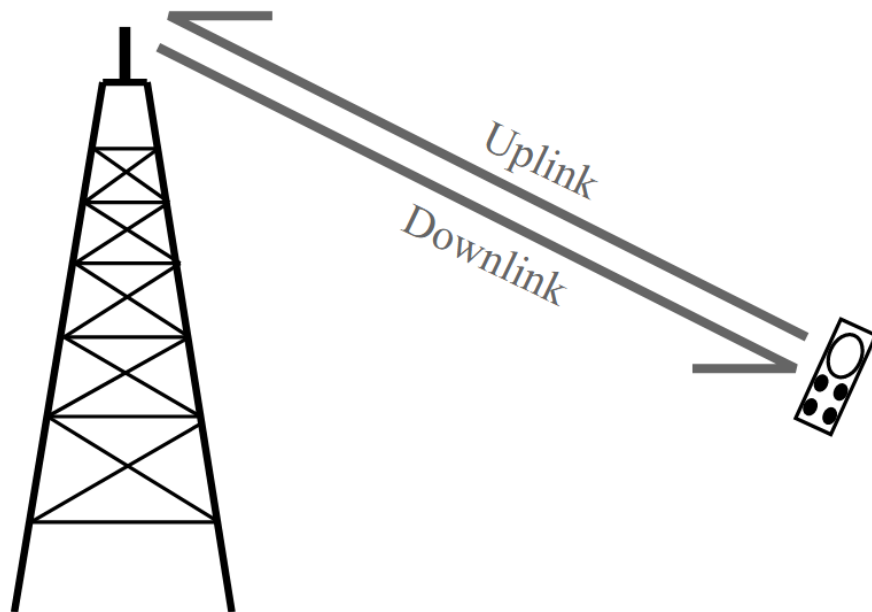


Figura 2- Canal Uplink e Downlink [4].

Chamamos de transmissor (Tx) o equipamento que, através de antenas, irradia ondas eletromagnéticas via interface aérea em direção ao receptor (Rx), que por vez, através de antenas, irá captar as ondas eletromagnéticas transmitidas convertendo-as em um sinal elétrico.

O meio no qual o sinal se propaga, pode ou não apresentar elementos de obstrução, esses elementos podem ser prédios, árvores ou qualquer outro elemento físico que, quando localizado entre o Tx e Rx poderá causar reflexão, difração, espalhamento, refração ou até mesmo bloqueio do sinal [13].

O meio de propagação livre de obstrução é chamado de visada direta, ou do inglês, *line-of-sight* (LOS). Na propagação LOS o sinal está sujeito apenas as perdas no espaço livre. Perda no espaço livre pode ser definida como a atenuação da energia da onda eletromagnética

transmitida quando está propaga do Tx até o Rx em um meio livre de obstruções, sendo expressa em dB pela seguinte fórmula [14]:

$$\text{Perda no espaço livre (L)} = 32,5 + 20 \log d + 20 \log f \quad (3.1)$$

Onde,

d: é a distância em km

f: a frequência em MHz.

Os meios que apresentam elementos de obstrução são chamados de visada não direta, ou do inglês, *non-line-of-sight* (NLOS), neste caso o sinal está sujeito a reflexão, difração, espalhamento e refração, os dois tipos de propagação estão ilustrados na figura 3.

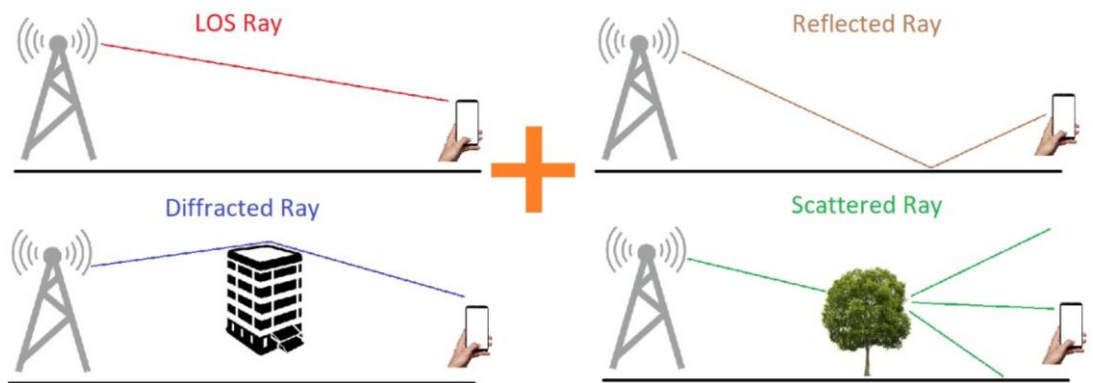


Figura 3- Propagação LOS e NLOS [5].

Os elementos entre o transmissor e receptor que causam reflexão, difração, espalhamento e/ ou refração serão chamados aqui de elementos dispersores. A figura 4 ilustra um sistema que apresenta um elemento de dispersão, neste exemplo temos dois sinais percorrendo caminhos distintos entre o transmissor (Tx) e o receptor (Rx), um desses caminhos se encontra livre de obstrução, que é a propagação LOS, e outro que apresenta um elemento dispersor, neste caso o sinal é irradiado com um ângulo θ_d , irá refletir no elemento dispersor e

chegará no Rx com um ângulo θ_a . Os ângulos θ_d e θ_a são conhecidos como ângulo de partida, ou do inglês, *angle of departure* (AoD) e o θ_a como ângulo de chegada, ou do inglês, *angle of arrival* [14].

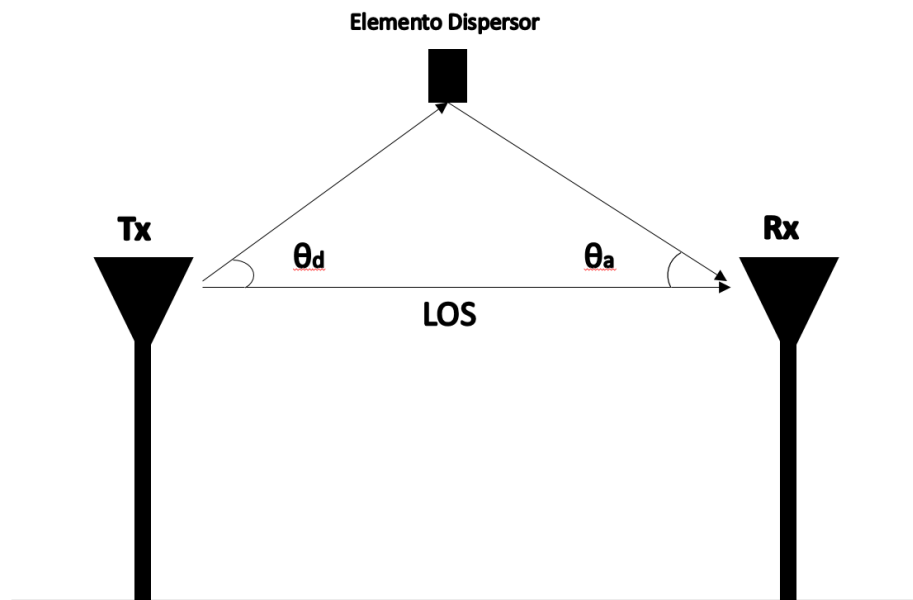


Figura 4- Elemento dispersor

A propagação onde há a presença de objetos que refletem ou espalham o sinal criando um canal que faz variar constantemente o sinal recebido em amplitude, fase e tempo é chamada de **propagação por multipercurso**. Estes efeitos resultam em múltiplas versões do sinal transmitido que chegam na antena receptora deslocados entre si no tempo e no espaço [15].

Por não possuir uma superfície regular e nem uma atmosfera estável, o feixe eletromagnético ao percorrer um canal de propagação, seja ele LOS ou NLOS, irá sofrer variações em suas características. Essas variações possuem natureza estatística, sendo conhecidas como **desvanecimento**, ou *fading* e podem ser do tipo plano ou seletivo. Podem ser causados por absorção, obstáculos, reflexões e dutos atmosféricos alterando a trajetória, amplitude, fase e polarização, podendo atenuar, reforçar ou até distorcer o sinal [16].

O desvanecimento do canal pode ser dividido em dois grupos:

- (a) Desvanecimento em larga escala
- (b) Desvanecimento em pequena escala.

O desvanecimento em larga escala ocorre quando há perda de percurso (do inglês, *Pathloss*) pelo sinal sendo transmitido. Essa redução da densidade de potência da onda eletromagnética que propaga através do espaço pode ser causada por diferentes fatores, dentre eles, absorção, difração, refração e reflexão do sinal assim como também a distância entre as antenas receptoras e transmissoras [17].

O desvanecimento em pequena escala descreve a rápida flutuação em amplitude e fase do sinal em um curto período de tempo ou distância viajada e ocorre devido a múltiplas reflexões que o sinal sofre até chegar ao receptor. O desvanecimento de pequena escala é também conhecido como desvanecimento de multipercursos [17].

2.3. OTIMIZAÇÃO DE REDE

Na telefonia celular, quando operadoras telefônicas instalam uma nova estação rádio base, a mesma tem que garantir que essas estações funcionem com um bom desempenho, gerando a melhor qualidade de serviço possível ao usuário.

Existem alguns indicadores de performance que são usados para avaliar o desempenho da rede, são chamados de *Key Performance Index* (KPI).

Os KPIs que avaliam o desempenho da rede variam de acordo com a tecnologia utilizada, e.g. 2G, 3G ou 4G e são regulados pela ANATEL. A tabela 5 ilustra um exemplo dos KPIs atingido no mês de outubro de 2013 em Florianópolis-SC para diferentes operadoras telefônicas.

Operadora	Taxa de Alocação de Canal de Tráfego (SMP5)	Taxa de Queda de Ligação (SMP7)	Taxa de Conexão de Dados (SMP8)	Taxa de Queda das Conexões de Dados (SMP9)	Taxa de Conexão 2G	Queda de Conexão 2G	Taxa de Conexão 3G	Queda de Conexão 3G
Claro	99.80%	0.34%	99.80%	1.95%	99.82%	2.09%	99.60%	0.92%
Oi	100.00%	0.73%	98.69%	0.32%	98.55%		99.50%	0.32%
Tim	98.86%	1.22%	97.68%	3.40%	97.68%		99.60%	3.40%
Vivo	98.61%	0.92%	97.72%	0.79%	97.72%	0.85%	98.16%	0.70%

Figura 5- KPI de desempenho da rede [11].

Outros fatores que também são analisados na hora de avaliar o desempenho de uma estação rádio base é a cobertura de sinal e o *throughput* de *downlink* e *uplink*.

Quando o *throughput*, ou seja, a taxa de transferência de dados, não está dentro da faixa de valores esperado para determinada tecnologia, faz-se necessário um *troubleshoot* da rede para verificação do problema. O problema muitas vezes pode ser devido a instalação inadequada de equipamentos, ou até mesmo a falha desses.

Porém, se não há falha de hardware e o projeto de instalação é compatível com o cenário, normalmente o problema poderá ser solucionado através do que chamamos de otimização de rede.

Na otimização de rede, diversos parâmetros poderão ser ajustados com a finalidade de obter melhores resultados. Dentre eles, potência de transmissão, *tilt* elétrico e configurações de RF (configuração MIMO, *Cell Global Identity* (CGI), portadora, parâmetros de *handover*, largura de banda, *carrier aggregation*, etc).

Além disso, deve ser feito um projeto de instalação adequado ao cenário sendo aplicado, escolhendo os equipamentos de telecomunicação que melhor atenderão a região. Um dos equipamentos que leva-se em consideração no projeto de instalação são as antenas das estações rádio base. Normalmente a escolha da antena é feita de acordo com seu diagrama de radiação e configuração MIMO.

Os resultados de nossas simulações irão auxiliar o projetista e otimizador de rede a tomarem as melhores decisões afim de obter resultados ótimos para capacidade do canal, levando-se em consideração diversos fatores que o influenciam.

3. ANTENAS

O sistema MIMO consiste de múltiplas antenas, tanto no transmissor quanto no receptor, antes de explorarmos as técnicas envolvidas no sistema MIMO é necessário compreender alguns conceitos básicos de antenas, elemento que o constitui.

Uma antena é um elemento passivo de um circuito de transmissão ou de recepção de sinais usado para irradiar ou receber ondas de rádio [13].

As características físicas de uma antena transmissora e receptora serão as mesmas, porém a antena Tx converte o sinal de tensão do transmissor em um sinal eletromagnético e a antena receptora, através de uma tensão induzida em seus terminais pelo sinal eletromagnético, converte a onda eletromagnética em sinal elétrico.

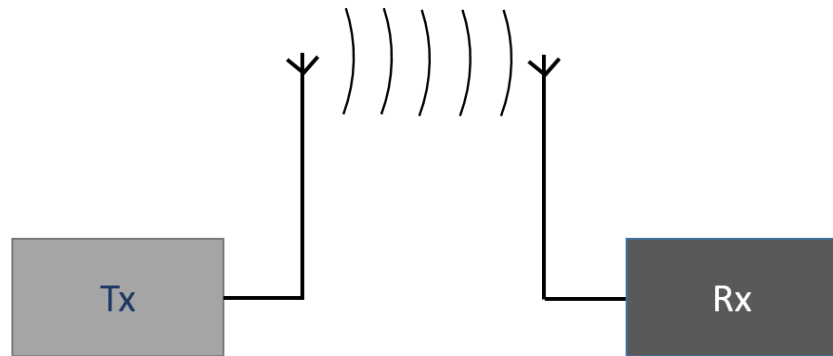


Figura 6- Comunicação entre Tx e Rx

A figura 7 representa um dipolo de meia onda. O dipolo de meia onda consiste de dois elementos condutores que serão excitados por uma tensão aplicada em seus terminais, no caso de uma antena transmissora, ou que serão excitados por uma tensão induzida pelas ondas eletromagnéticas no caso de uma antena receptora [18].

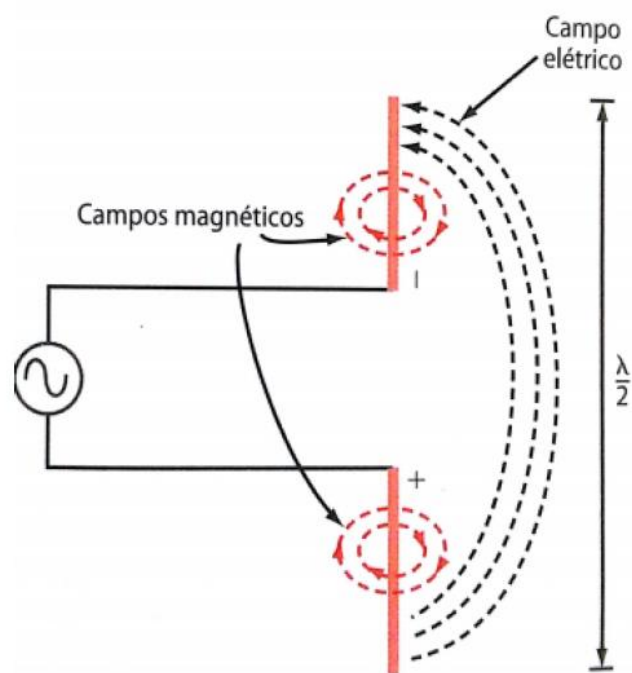


Figura 7- Dipolo de meia onda.

A irradiação ideal de um dipolo de meia onda acontece quando cada segmento dobrado tiver um comprimento de um quarto de onda na frequência de operação, fazendo com que a antena tenha um comprimento de metade do comprimento de onda [18].

As principais características de radiação da antena podem ser representadas através de um diagrama de radiação.

O diagrama de radiação é uma representação da distribuição de potência irradiada pela antena em função da direção de propagação. Sua representação normalmente é feita através de coordenadas polares, conforme exemplo da figura 8:

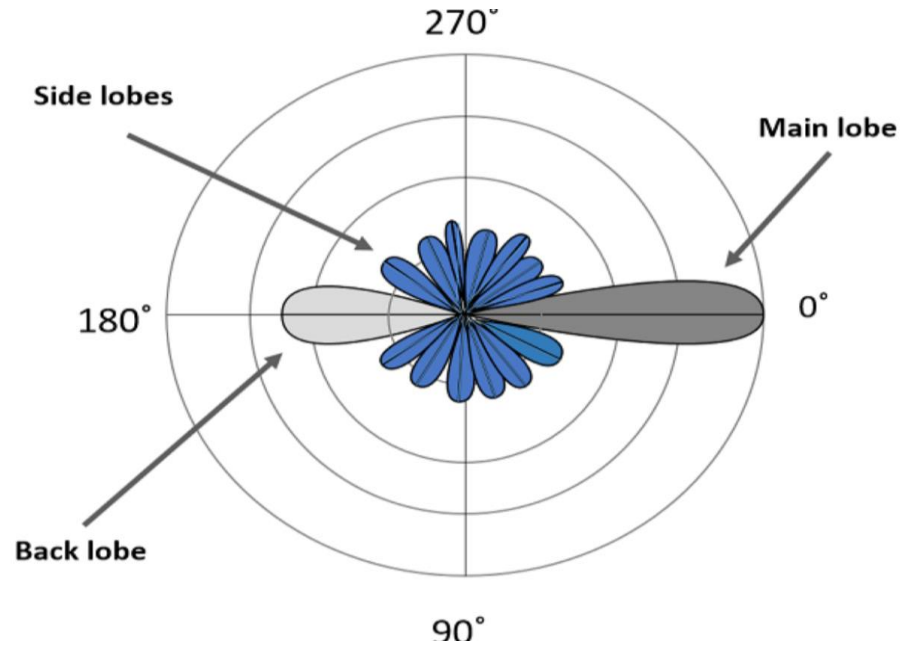


Figura 8- Diagrama de radiação [6].

Os parâmetros que as define são os seguintes:

- (a) Lóbulo principal: define os ângulos de $\frac{1}{2}$ potência e o ganho máximo. Consiste na região que vai desde onde a potência irradiada é máxima até onde esta decai em 3dB [18].
- (b) Lóbulos Laterais: são feixes de radiação com menor intensidade de potência que o lóbulo principal, geralmente são indesejados [18].

Além das coordenadas cartesianas, o diagrama de radiação pode ser representado por coordenadas esféricas ou por um modelo 3D, conforme ilustrado na figura 9.

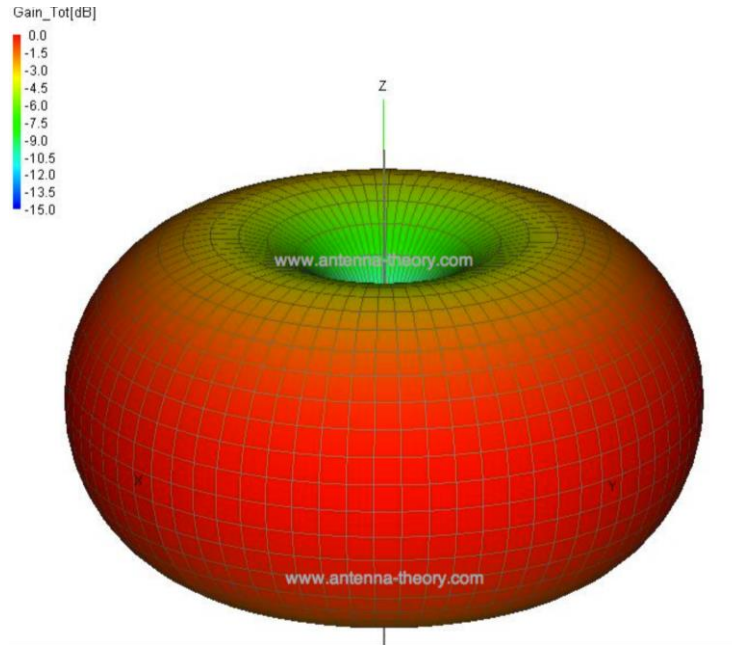


Figura 9- Diagrama de radiação 3D [7].

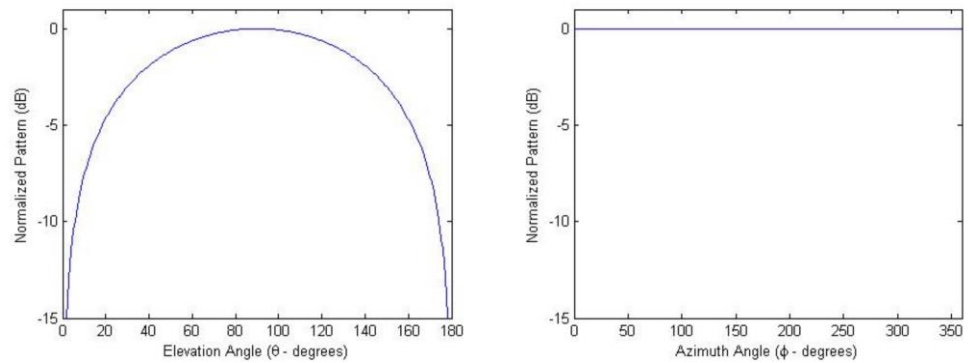


Figura 10- Coordenadas esféricas [7].

Os dois exemplos representam as mesmas características de radiação, onde a potência irradiada é máxima ao longo do plano x-y e mínima ao longo eixo z. O ângulo de elevação θ , é medido apartir do eixo z, e o ângulo de azimute ϕ , medido apartir do eixo x.

Outros conceitos importantes são os seguintes:

- (a) Diretividade: é uma medida da “focalização” do lobo principal. Corresponde a razão entre a intensidade de radiação máxima e a intensidade de radiação média.

- (b) Ângulo de abertura (HPBW, do inglês Half Power Beam Width): abertura angular definida pelos feixes nos quais a potência radiada é metade do valor de potência na direção de máxima radiação.
- (c) Polarização da antena: se refere a orientação dos campos elétricos em relação a Terra [18].

Em muitas aplicações, é necessário projetar sistemas de radiação de alta diretividade, o que nem sempre pode ser obtido usando uma única antena. Nesses casos, pode-se usar um conjunto (rede, matriz, agrupamento ou *array*) de antenas, que consiste num grupo de elementos radiantes dispostos de maneira a produzir características particulares de radiação [18].

Geralmente os elementos que compõem um conjunto são idênticos, o que não é um requisito obrigatório, mas é mais simples e prático. Os elementos individuais podem ser de diferentes formas, incluindo antenas lineares, aberturas, etc [18].

De modo a obter diagramas bastante diretivos, é necessário que os campos produzidos pelos elementos do conjunto interfiram construtivamente (somem-se) nas direções desejadas e interfiram destrutivamente (cancelem-se) nas outras direções. Para conjuntos de elementos idênticos, isso pode ser conseguido controlando-se os seguintes parâmetros [18]:

- 1 - a configuração geométrica do conjunto (linear, circular, retangular, esférico, etc.);
- 2 - a separação entre os elementos;
- 3 - a amplitude e a fase da excitação de cada elemento.

Existem diversos tipos de antenas que irão gerar diferentes diagramas de radiação e suas aplicações variam largamente. A antena MIMO de uma estação rádio base normalmente é composta por um arranjo de dipolos, conforme ilustrado na figura 11 [19].

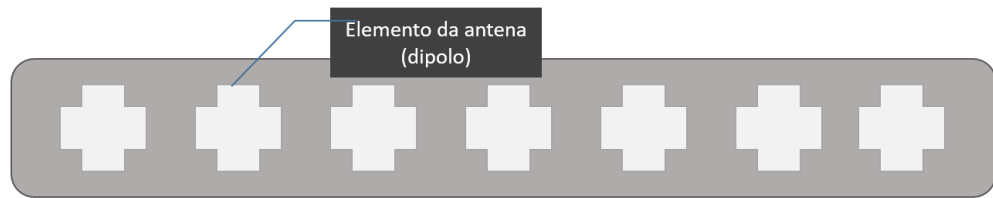


Figura 11- Arranjo de antenas.

Cada elemento do arranjo (dipolo), irá gerar um diagrama de radiação independente, chamado de diagrama de radiação do elemento, suas características são determinadas pela geometria do elemento [19].

Chamamos de arranjo de antena linear quando múltiplos elementos são dispostos um ao lado do outro formando uma linha reta.

Enquanto cada elemento de antena tem seu próprio diagrama de radiação, o arranjo de antena linear irá produzir um diagrama de radiação diferente que irá depender de três fatores [23]:

- Espaçamento entre elementos de antena
- Mudança de fase entre elementos de antena
- Variação de amplitude entre seus elementos

Esses parâmetros deverão ser ajustados afim de gerar o diagrama de radiação mais adequado ao cenário que será aplicado. Mais além será explicado como esses fatores podem ser utilizados para melhorar a performance de um sistema de comunicação sem fio.

Os conceitos de comunicação móvel e antenas vistos até aqui são considerados necessários para o entendimento do funcionamento do sistema MIMO e das análises que foram feitas neste TCC.

4. MIMO

4.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como objetivo explicar o sistema MIMO e as técnicas utilizadas por ele, os temas abordados aqui serão explorados nas simulações de nossa análise.

4.2. PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO MIMO

O sistema MIMO é definido como o uso de múltiplas antenas tanto no transmissor quanto no receptor de um sistema de comunicação sem fio afim de aumentar a capacidade de transmissão explorando a propagação de ondas em multipercurso do canal entre as antenas receptoras e transmissoras [8].

A capacidade do canal pode ser definida como a taxa de transferência de dados alcançável com probabilidade de erro tão pequena quanto se queira, dado em bps/Hz e é dada pela seguinte expressão [8]:

$$C_{MIMO} = \log_2 \det \left(I_{nr} + \frac{SNR}{N_t} H H^H \right) \quad (3.2)$$

Onde,

I_{nr} : Matriz identidade $N_r \times N_t$

SNR: Nível de sinal ruído percebido no receptor

H: Matriz de resposta do canal

H^H : Transposta conjugada da matriz de resposta do canal

O conceito de capacidade do canal é de suma importância na avaliação do desempenho do sistema MIMO, e por isso será explicado mais adiante com maior detalhamento.

O sistema utiliza o multipercurso em seu benefício, para isso faz uso de duas técnicas, são elas: a diversidade espacial e a multiplexação espacial. Em suma, a diversidade espacial é usada para melhorar a confiabilidade de transmissão combatendo o desvanecimento por multipercurso, e a multiplexação espacial explora a propagação de ondas em multipercurso com o propósito de maximizar a capacidade do canal [8].

A figura 12 ilustra o sistema MIMO, com múltiplas antenas no transmissor Tx e no receptor Rx.

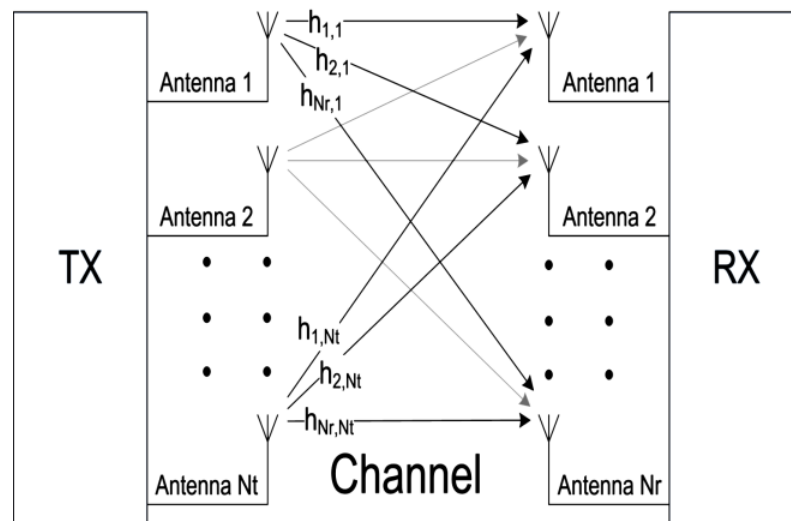


Figura 12- Sistema MIMO [9].

4.2.1. Diversidade Espacial

O conceito de diversidade se refere a transmissão de réplicas do mesmo sinal em um canal que apresenta desvanecimento de forma que cada réplica sofre uma atenuação independente uma da outra [8].

Existem diferentes tipos de diversidade, a diversidade na frequência, no tempo, de polarização e espacial.

Na diversidade espacial, várias cópias do mesmo sinal são transmitidas simultaneamente, sendo que cada uma delas sofre um desvanecimento por multipercurso,

chegando ao receptor com características de magnitude e fase diferentes. São essas diferenças de magnitude e fase do sinal que possibilita o receptor diferenciá-las umas das outras. Uma das técnicas utilizadas para causar este efeito é a de transmitir o mesmo sinal através de diferentes antenas, se as antenas transmissoras estiverem suficientemente espaçadas, a probabilidade de que o sinal percorra caminhos diferentes aumenta, fazendo com que o desvanecimento em cada um desses sinais seja independente, causando o efeito de diversidade espacial.

O emprego de múltiplas antenas e espaçamento entre os elementos do arranjo de antenas é normalmente melhor explorado no lado do transmissor, dado que o receptor normalmente apresenta limitações de tamanho (e.g. aparelhos celulares) [8].

A figura 13 ilustra a arquitetura desse sistema, chamado de diversidade de transmissão.

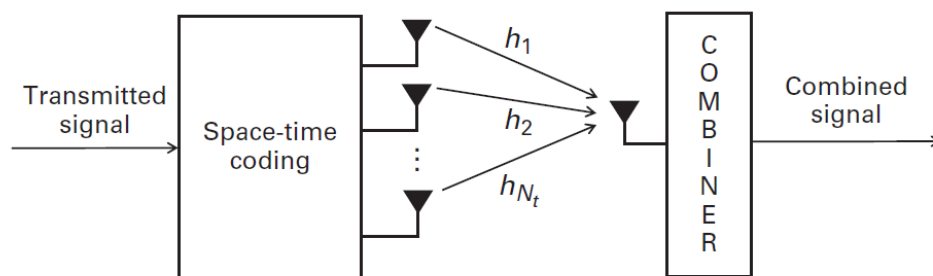


Figura 13- Diversidade de transmissão [8].

Para que o receptor consiga distinguir os sinais sendo transmitidos através das múltiplas antenas é necessário que o transmissor aplique uma codificação espaço-tempo nos sinais sendo transmitidos.

A codificação espaço-tempo é uma técnica usada na comunicação sem fio para transmitir múltiplas cópias de um sinal através de diferentes antenas afim de melhorar a confiabilidade de transmissão. A propagação por multipercurso faz com que algumas cópias desses sinais sejam melhores que as outras. A redundância de sinais que chegam ao receptor aumenta a probabilidade de serem decodificados corretamente. A codificação espaço-tempo irá combinar todas as cópias do sinal recebido de forma a extrair o máximo de informação possível, a primeira codificação desenvolvida para tal propósito é chamada de codificação de Alamouti. [25]

Existem duas medidas que quantificam a diversidade espacial do sistema MIMO, são elas: a ordem de diversidade e o ganho de diversidade.

A ordem de diversidade (N_d), é definida como o número de réplicas independentes do sinal transmitido que estão disponíveis no combinador do receptor. Em um sistema MIMO $N_r \times N_t$, existem, isto significa que a diversidade espacial é capaz de obter uma ordem de diversidade máxima dada pela seguinte expressão [25].

$$\max\{N_d\} = N_t N_r \quad (3.3)$$

O ganho de diversidade é uma maneira de quantificar os benefícios da diversidade através da inclinação do gráfico probabilidade bit-erro versus energia de bit sobre a densidade de ruído espectral [dB], este gráfico está exemplificado abaixo para diferentes técnicas de modulação [8]:

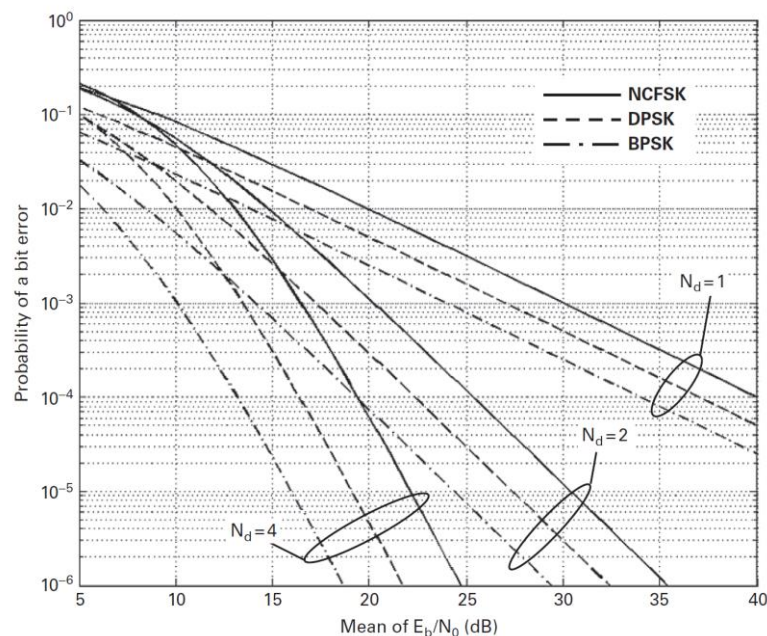


Figura 14- Ganho de diversidade [8].

Conforme mencionado anteriormente, o MIMO explora o multipercurso utilizando duas técnicas, a diversidade espacial e a multiplexação espacial.

4.2.2. Multiplexação Espacial

A multiplexação espacial é utilizada com o propósito de aumentar a capacidade do canal. Nesta técnica, sinais que carregam informações diferentes entre si, são alocados a diferentes antenas que irão propagar o sinal até o Rx através de diferentes percursos. Cada um desses sinais poderá ser transmitido simultaneamente, utilizando a mesma banda de frequência e como consequência, irá multiplicar o número de bits por segundos sendo transmitidos. A capacidade do canal está diretamente relacionada com o número de antenas transmissoras, conforme será analisado nas simulações.

A figura 15 ilustra o princípio de funcionamento da multiplexação espacial MIMO [8].

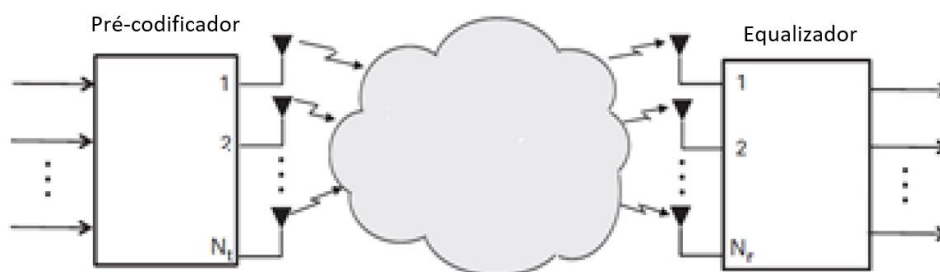


Figura 15- Multiplexação Espacial [8].

O sistema de multiplexação espacial apresenta três componentes principais, são eles [21]:

- **Pré-codificador:** tem como propósito mapear os sinais de entrada que deverão ser transmitidos em cada antena Tx. No caso onde o número de antenas é igual ao número de sinais, o pré-codificador irá mapear cada sinal a uma só antena. O pré-codificador será mais complexo no caso em que o número de fluxo de dados a serem transmitidos seja diferente do número de antenas, a codificação aplicada neste caso irá variar.
- **Equalizador:** processa o sinal recebido e gera estimativas do sinal de entrada do pré-codificador. Os sinais que chegam nas antenas Rx são um somatório

dos sinais transmitidos, o equalizador, em geral, deverá diferenciar cada um dos sinais do somatório recebido afim de recuperar o sinal transmitido.

- O terceiro elemento do sistema é o canal. Para que a multiplexação espacial funcione, é necessário que o canal apresente uma diversidade em multipercurso, por isso é importante que o meio no qual o sinal propaga seja rico em elementos dispersores.

4.3.CANAL DE RÁDIO PROPAGAÇÃO

4.3.1. Introdução

O meio de propagação entre transmissor e receptor pode variar entre uma simples transmissão com visada direta e aquela que é severamente obstruída por prédios, montanhas, e vegetação. Diferentemente dos canais que propagam sinais através de cabos, os canais de rádio propagação são extremamente aleatórios e de difícil análise. Mesmo a velocidade do movimento indicará com que rapidez ocorre desvanecimento do nível do sinal enquanto um terminal móvel se desloca. Historicamente, a modelagem de um canal de rádio propagação tem sido uma das etapas mais difíceis no projeto de um sistema de comunicação móvel, sendo esta realizada por meios estatísticos que tomam como base medidas especificamente elaboradas para um determinado sistema de comunicação ou uma alocação de espectro [21].

O sistema MIMO se baseia em um meio que apresenta elementos de dispersão para que seja possível obter uma boa performance, em um meio sem dispersão com ausência de multipercurso, os canais entre o receptor e transmissor estarão correlacionados, ou seja, o desvanecimento por multipercurso será o mesmo, o que irá fazer com que a capacidade do canal degrade. O conceito de correlação será explicado mais adiante, por agora, é importante saber que dizemos que canais estão correlacionados quando eles apresentam características iguais ou muito parecidas entre si e como consequência, os sinais que propagam através dele irão apresentar um desvanecimento por multipercurso igual ou muito próximo entre si [27].

4.3.2. Modelo Básico do Canal

Observando a figura 16, vemos que múltiplos canais, independentes entre si, são criados entre as antenas transmissoras e receptoras. Cada antena receptora irá receber as informações transmitidas através de canais diretos e indiretos. As conexões diretas são aquelas entre as antenas 1 e 1, 2 e 2, n e n, sendo representados por h_{11} , h_{22} e h_{nn} , enquanto que as conexões indiretas são representadas por h_{12} , h_{21} , h_{21} , etc. Baseado nessas observações, a matriz do canal de transmissão H é dada pela expressão 3.4, e o vetor dos sinais recebidos no Rx, representado pela letra y , é dado pela equação 3.5 [28].

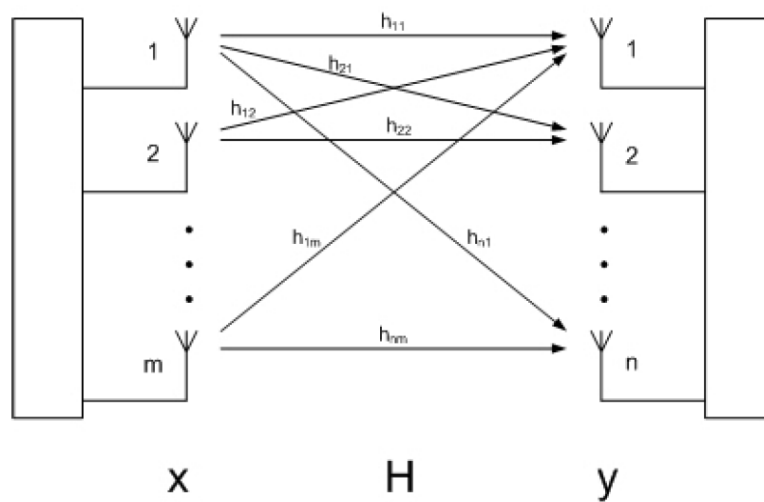


Figura 16- Canal sem fio [10].

$$H = \begin{pmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{n1} & \cdots & h_{nm} \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

$$Y(i) = H(i)x(i) + n(i) \quad (3.5)$$

Onde,

$H(i)$: função de transferência do canal

$X(i)$: vetor dos sinais sendo transmitidos

$N(i)$: vetor do ruído (AWGN)

O ruído N é chamado de ruído gaussiano branco aditivo, ou do inglês, *Additive White Gaussian Noise* (AWGN). O AWGN é um ruído térmico causado pelo movimento de elétrons em todos os componentes dissipativos de um circuito elétrico como resistores, fios de condução, etc. Este ruído é aleatório e apresenta uma distribuição gaussiana. O termo aditivo significa que o ruído é adicionado ao sinal recebido [21].

Cada elemento da matriz H representa o canal de rádio propagação no qual o sinal entre a antena n do Tx e m do Rx propagam, por exemplo, se a transmissão se dá da antena 2 do Tx até a antena 3 do Rx, o elemento da matriz que representa este canal é representado por h_{32} .

4.3.3. Capacidade do Canal MIMO

Em 1948, Claude Shannon publicou um artigo titulado como “*A mathematical theory of communications*”. Nesta publicação, ele derivou a expressão matemática para a máxima taxa de transferência que pode ser transmitida em um sistema de comunicação sem erros. Essa máxima taxa de transferência de dados sem erros é conhecida como capacidade do canal.

De acordo com o teorema de Shannon-Hartley, a SNR e a largura de banda do canal em um sistema SISO estão diretamente relacionadas com a capacidade do canal, o teorema é expresso pela fórmula 3.6 [21].

$$C_{SISO} = B \cdot \log_2(1 + SNR) \quad (3.6)$$

Onde,

B : Largura de Banda [Hz]

SNR: Relação Sinal Ruído

A SNR ou relação sinal ruído, é uma medida que compara o nível de sinal transmitido com o ruído sobreposto ao sinal, geralmente expressa em Decibel, é dado pela seguinte expressão:

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{sinal}}{P_{ruído}} \right) \quad (3.7)$$

Onde,

SNR_{dB} : Relação sinal-ruído

P_{sinal} : Potência do sinal transmitido

$P_{ruído}$: Potência do ruído

O sistema MIMO apresenta uma capacidade maior em relação ao sistema SISO, considerando que o canal é rico em elementos de dispersão de forma a criar canais independentes. Conforme já visto, a capacidade do sistema MIMO em termos de eficiência espectral (e.g. bits por segundo por Hz) é dada pela expressão 3.2.

Para que seja possível simular a fórmula da capacidade MIMO 3.4, é necessário obter informações sobre o canal (H). Porém, na vida real, as propriedades observadas em um canal de transmissão não são constantes, elas variam no tempo, sendo impossível predizê-las.

Como a matriz do canal é aleatória, a capacidade do canal MIMO é também uma variável aleatória e, neste caso usaremos uma definição estatística da capacidade: a capacidade ergódica.

A capacidade ergódica é definida como o valor esperado da capacidade e é dada por [8]:

$$C_{MIMO} = E\{\log_2[\det(I_{nr} + \frac{SNR}{N_t} HH^H)]\} \quad (3.8)$$

4.3.4. Loop Aberto e Loop Fechado

O sistema MIMO pode ser classificado em loop aberto ou loop fechado, dependendo se o transmissor ou receptor tem informação ou não sobre o canal.

Técnicas que necessitem que o transmissor tenha conhecimento sobre o canal através de uma mensagem enviada pelo receptor são conhecidos como loop fechado. E as técnicas que exigem apenas que o receptor tenha conhecimento do canal são conhecidas como loop aberto.

Um conceito importante que deverá ser mencionado é o Channel State Information (CSI), o CSI contém informações sobre o estado do canal, descrevendo como um sinal propaga do transmissor ao receptor.

No Channel State Information at the Receiver (CSIR), o transmissor não possui informações sobre o canal de comunicação. Isso gera duas implicações [30]:

1. A potência de cada sinal sendo transmitido deverá ser a mesma em todas as antenas transmissoras.
2. Não há motivo para introduzir autocorrelação e dependência entre as antenas.

Portanto, na nossa análise em que o CSI está presente somente no receptor, iremos assumir que os sinais sendo transmitidos são equipotentes, não correlacionados e independentes.

No loop fechado, o transmissor irá receber uma mensagem do receptor com as informações do canal fazendo com que o transmissor tenha informações sobre o canal antes de transmitir os dados.

Conforme mostrado na figura 17, o receptor envia informações sobre o estado do canal *downlink* para o transmissor. A matriz do canal pode ser modelada como uma matriz aleatória gaussiana e as informações de covariância e média são reportadas para o transmissor através do canal de feedback. Neste caso, a capacidade MIMO pode ser melhorada através da técnica *waterfilling*, onde o nível de potência de transmissão é ajustado aos elementos do arranjo

de antenas de acordo com as condições do canal, onde normalmente aplicamos uma maior potência aos canais que apresentam boas condições e menor potência, ou nenhuma, para os canais que possuem condições desfavoráveis [30].

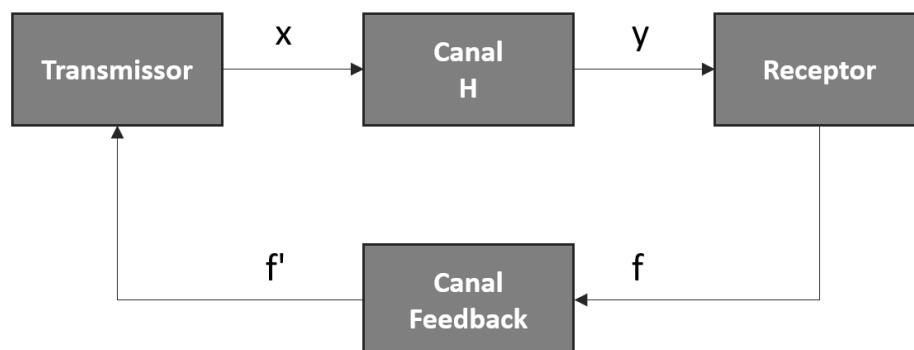


Figura 17- Transmissão CSIT.

4.3.5. Propriedades Intrínsecas do Canal

As propriedades intrínsecas de um canal se referem aos parâmetros inerentes a ele sem levar em consideração a natureza do sinal que está sendo transmitido. Essas propriedades intrínsecas irão influenciar a forma pela qual o sinal propaga através do canal, fazendo com que o sinal varie de ganho e fase em um determinado espaço e tempo, o que definimos como desvanecimento [21].

Primeiramente iremos falar sobre as propriedades intrínsecas do canal e após, como elas influenciam o desvanecimento do sinal.

Existem quatro parâmetros usados para classificar as propriedades intrínsecas de multipercurso do canal, são eles:

(a) Espalhamento de atraso

O espalhamento de atraso pode ser definido como uma medida de quão rico o canal é em relação a propagação em multipercurso. Ele mede a diferença entre o tempo de chegada do primeiro sinal, geralmente o sinal que possui propagação em visada direta, e o tempo de chegada do último sinal [21].

(b) Banda de coerência

Banda de coerência se refere a uma medida estatística da faixa de frequência na qual o canal pode ser considerado plano. Em outras palavras, é a máxima largura de banda pelo qual duas portadoras irão sofrer desvanecimento de amplitude igual ou muito próximo. A banda de coerência se relaciona com o espalhamento de atraso da seguinte forma:

$$B_c = \frac{1}{D} \quad (3.9)$$

Onde B_c é a banda de coerência dada em Hertz e D é o espalhamento de atraso em segundos [21].

(c) Espalhamento de doppler

O espalhamento de Doppler se refere ao aumento de largura de banda do sinal transmitido quando este propaga em um canal em multipercurso. Este aumento de largura de banda se dá devido ao movimento relativo entre o transmissor, elemento dispersor, e o receptor. Para entender como isto ocorre iremos ilustrar um exemplo. Observando a figura 18, temos um transmissor representado por Tx, um receptor Rx e dois elementos dispersores, um na direita do Tx e outra a esquerda de Tx. O transmissor se move em direção ao elemento dispersor da direita com velocidade v e emite uma portadora com frequência f_c . Por causa do efeito Doppler, o elemento da esquerda recebe uma frequência igual a $f_c - f_d$ e a frequência recebida pelo elemento da direita será $f_c + f_d$. f_d é chamado de deslocamento de Doppler e é dado pela seguinte relação, $f_d = vf_c/c$ onde v é a velocidade de Tx e c a velocidade da luz. Parte da energia proveniente dos elementos dispersores será irradiada na direção do receptor, portanto o sinal recebido no receptor consiste do sinal irradiado pelos dois elementos mais o sinal irradiado pelo transmissor. A composição desses sinais que chegam ao receptor consiste de três

componentes de espectro em $f_c - f_d$, f_c e $f_c + f_d$ o que resultará em uma largura de banda total de $2f_d$ [8].

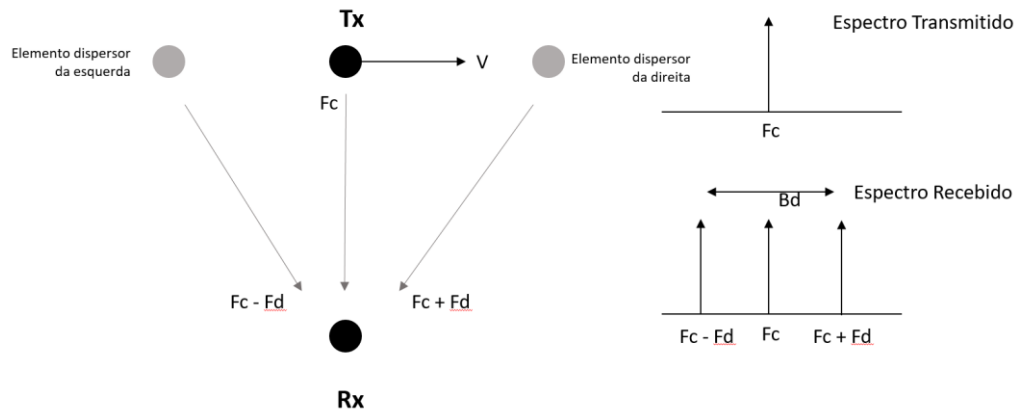


Figura 18- Espalhamento de Doppler.

(d) Tempo de coerência

Quando emitimos dois sinais idênticos, há uma probabilidade de que os sinais recebidos estarão correlacionados. Chamamos de tempo de coerência o tempo máximo entre a transmissão desses dois sinais para que haja uma probabilidade alta desses sinais recebidos estarem correlacionados [8].

Baseado nas propriedades intrínsecas do canal vistas acima e as características dos sinais que propagam através dele, o canal de rádio propagação pode ser classificado em quatro classes, são elas:

3. Desvanecimento Plano
4. Desvanecimento Seletivo em Frequência
5. Desvanecimento Rápido
6. Desvanecimento Lento

Os termos desvanecimento rápido e desvanecimento lento se referem a taxa com que a magnitude e fase do sinal mudam em relação ao canal em que ele propaga. O desvanecimento rápido ocorre quando o canal muda rapidamente quando comparado a taxa na qual o sinal varia. Neste caso, ao contrário do desvanecimento lento, a mudança de fase e amplitude do sinal imposta pelo canal varia com o tempo [8].

No caso de desvanecimento plano, a banda de coerência do canal é maior que a banda do sinal. Portanto, as componentes de frequência do sinal irão sofrer a mesma magnitude de desvanecimento [8].

Ao contrário do desvanecimento plano, o desvanecimento seletivo em frequência ocorre quando a banda de coerência do canal é menor que a largura de banda do sinal. Portanto, diferentes componentes do sinal irão sofrer desvanecimento descorrelacionados [9].

As classes de desvanecimento ainda podem ser divididas baseado na propriedade intrínseca ao qual ela está relacionada. A figura 19 divide as classes baseado se o desvanecimento do canal está relacionado ao espalhamento de atraso ou espalhamento de Doppler e também faz um resumo dos conceitos vistos para cada classe.

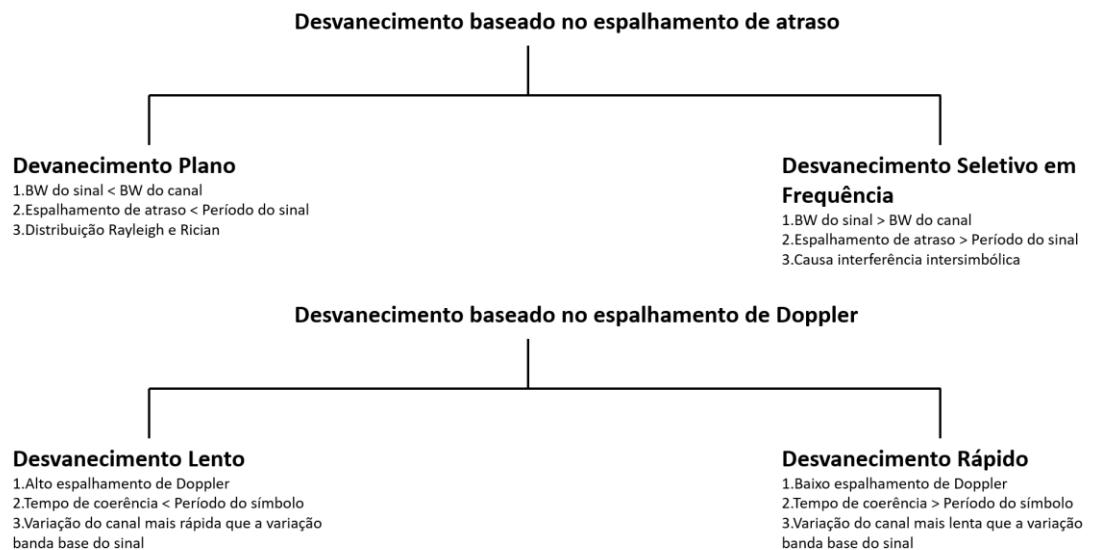


Figura 19- Classes de desvanecimento.

4.4. MODELO ANALÍTICO DO CANAL

Na vida real, as propriedades observadas em um canal de transmissão não são constantes, elas variam no tempo, sendo impossível predizê-las, isso ocorre devido as propriedades dinâmicas do canal e o movimento através de um campo que varia no espaço [8]. Iremos ver mais adiante que, quando não existe visada direta entre o receptor e transmissor, a magnitude dos elementos de H podem ser aproximados pela distribuição de Rayleigh [10], essas aproximações foram usadas para modelar o canal de propagação usado em nossas simulações.

Para um canal de desvanecimento desvanecimento plano, os coeficientes entre cada antena transmissora e receptora é aproximado por uma variável aleatória complexa e portanto, os elementos da matriz do canal H podem ser expressos da seguinte forma:

$$h_{ij} = \alpha_{ij} \exp(j\phi_{ij}) \quad (3.10)$$

Onde, h_{ij} . Representa o ganho do canal para o caminho percorrido pelo sinal entre a antena j^{th} do transmissor e a antena i^{th} do receptor.

α_{ij} e ϕ_{ij} representam o ganho do canal e o deslocamento de fase para o caminho percorrido pelo sinal entre a antenas j^{th} do transmissor e a antena i^{th} do receptor, respectivamente [21].

A fase é normalmente modelada como uma variável aleatória uniforme e a distribuição do ganho α_{ij} depende do meio de propagação. Existem diferentes distribuições para representar o desvanecimento de α_{ij} , em nossa análise iremos considerar apenas a distribuição de desvanecimento Rayleigh.

Baseado nas informações vistas até aqui, iremos descrever três modelos analíticos do canal MIMO, são eles [21]:

- (a) Canal MIMO independente e identicamente distribuído (descorrelacionado)
- (b) Canal MIMO correlacionado
- (c) Modelo de canal Kronecker

4.4.1. Modelo de Canal MIMO com Variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas (descorrelacionadas)

No sistema MIMO a ideia é que os canais de propagação entre o transmissor e receptor sejam **estatisticamente independente e igualmente distribuídos**, isso irá permitir que múltiplos sinais com características idênticas possam ser criados através de uma precodificação e serem usados para transmitir múltiplas vias de dados, que irá resultar em um aumento na capacidade, ou na confiabilidade. Na prática, os canais entre transmissor e receptor poderão estar correlacionados e por isso não é possível obter a performance ótima do sistema. Esse fenômeno é chamado de autocorrelação espacial [28].

O primeiro modelo de canal analítico que iremos estudar é o i.i.d. Este tipo de canal é bem popular em análises do sistema MIMO pois assume que os canais estão descorrelacionados, tornando a análise mais fácil. Porém, na vida real os canais não estão completamente descorrelacionados, para que possamos ter uma análise com resultados mais fiéis a um cenário real, precisamos de modelos de canais que levam em consideração a correlação entre eles, esse tipo de modelo será visto na próxima sessão.

4.4.2. Canais correlacionados MIMO

Em meios que são pobres em múltiplos percursos de propagação, o canal estará auto correlacionado, o que resulta em baixa performance do sistema.

Modelos de canais correlacionados são úteis pois eles nos fornecem uma forma conveniente de estimar analiticamente o impacto que a correlação tem na performance do MIMO.

Em geral, as propriedades de correlação entre os pares das antenas MIMO são definidas pela matriz de covariância, R , que pode ser expressa matematicamente da seguinte forma [8]:

$$R \triangleq E\{vec(H)vec(H)^H\} \quad (3.11)$$

Onde,

vec(H): vetor coluna de H sobrepostos

H: Matriz do canal

E: Operador Esperança

()^H: Operador Hermitiano

Para entendermos melhor a matriz de covariância de um canal iremos calculá-la usando a expressão acima para um sistema MIMO 3x2.

Temos que a matriz do canal H de um sistema MIMO 3x2 é dada da seguinte forma:

$$H = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \\ h_{31} & h_{32} \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

Por vez, sua matriz de covariância é calculada da seguinte forma:

$$R \triangleq E\{vec(H)vec(H)^H\} \quad (3.13)$$

$$R = E \left\{ \begin{pmatrix} h_{11} \\ h_{21} \\ h_{31} \\ h_{12} \\ h_{22} \\ h_{32} \end{pmatrix} (h_{11}^* \ h_{21}^* \ h_{31}^* \ h_{12}^* \ h_{22}^* \ h_{32}^*) \right. \quad (3.14)$$

$$R = E \left\{ \begin{pmatrix} |h_{11}|^2 & h_{11}h_{21}^* & h_{11}h_{31}^* & h_{11}h_{12}^* & h_{11}h_{22}^* & h_{11}h_{32}^* \\ h_{21}h_{11}^* & |h_{21}|^2 & h_{21}h_{31}^* & h_{21}h_{12}^* & h_{21}h_{22}^* & h_{21}h_{32}^* \\ h_{31}h_{11}^* & h_{31}h_{21}^* & |h_{31}|^2 & h_{31}h_{12}^* & h_{31}h_{22}^* & h_{31}h_{32}^* \\ h_{12}h_{11}^* & h_{12}h_{21}^* & h_{12}h_{31}^* & |h_{12}|^2 & h_{12}h_{22}^* & h_{12}h_{32}^* \\ h_{22}h_{11}^* & h_{22}h_{21}^* & h_{22}h_{31}^* & h_{11}h_{12}^* & |h_{22}|^2 & h_{22}h_{32}^* \\ h_{32}h_{11}^* & h_{32}h_{21}^* & h_{32}h_{31}^* & h_{32}h_{12}^* & h_{32}h_{22}^* & |h_{32}|^2 \end{pmatrix} \right. \quad (3.15)$$

A matriz acima nos mostra duas propriedades:

- A dimensão de R é $(N_t N_r) \times (N_t N_r)$
- Seus elementos consistem da correlação entre todos os pares das antenas

A matriz de covariância R possui $(N_r N_t)^2$ componentes e cada um desses elementos tem quatro índices, conforme demonstrado abaixo [8]:

$$R_H^{ij,kl} = E[h_{ij}h_{kl}^*]; i, k \in \{1, 2, \dots, N_r\}; j, l \in \{1, 2, \dots, N_t\} \quad (3.16)$$

Isso faz com que o modelo exposto tenha um alto grau de complexidade para análise. Para tornar a análise menos complexa foi criado um modelo que analisa a correlação das antenas no transmissor e receptor separadamente, esse modelo é conhecido como modelo de Kronecker.

4.5. MODELO DE CANAL KRONECKER

O modelo de Kronecker se baseia na hipótese de que a matriz de correlação no receptor é independente da matriz de correlação no transmissor, em outras palavras, os componentes de multipercurso que chegam no receptor são independentes das antenas que foram utilizadas para transmissão no lado do transmissor [31].

Neste caso, assumimos que podemos representar a matriz de covariância R vista anteriormente como o produto de Kronecker da matriz de correlação do receptor (R_r) e a matriz de correlação do transmissor (R_t), sendo expressa da seguinte forma [8]:

$$R = R_t^T \otimes R_r \quad (3.17)$$

Onde \otimes é o produto de Kronecker e R_t^T é a matriz transposta de R_t .

As matrizes de correlação R_r e R_t podem ser representadas da seguinte forma [8]:

$$R_r = \begin{pmatrix} \rho_{r1,1} & \cdots & \rho_{rNr,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{rNr,1} & \cdots & \rho_{rNr,Nr} \end{pmatrix} \quad (3.18)$$

$$R_t = \begin{pmatrix} \rho_{t1,1} & \cdots & \rho_{tNt,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{tNt,1} & \cdots & \rho_{tNt,Nt} \end{pmatrix} \quad (3.19)$$

E os elementos das matrizes R_r e R_t podem ser definidos da seguintes forma [8]:

$$\rho_{tm,j} \triangleq E\{h_{k,j}h_{k,m}^*\} \quad k = 1, \dots, Nt \quad (3.20)$$

$$\rho_{ri,n} \triangleq E\{h_{i,k}h_{n,k}^*\} \quad k = 1, \dots, Nr \quad (3.21)$$

Portanto, temos que os elementos de R_t representam a correlação entre todos os pares das antenas transmissoras no receptor k e os elementos de R_r são a correlação entre todos os pares da antena receptora quando o sinal é irradiado pelo transmissor k [8].

A matriz do canal H para o modelo de Kronecker pode ser escrita da seguinte forma [8]:

$$H = R_t^{\frac{1}{2}} H_w R_r^{\frac{1}{2}} \quad (3.22)$$

Onde H_w representa a matriz para canais descorrelacionados ou i.i.d e $()^{1/2}$ é a raiz quadrada hermitiano da matriz.

A equação 3.2 é uma equação geral da capacidade MIMO, podendo ser usada tanto para canais correlacionados quanto não correlacionados. Acabamos de ver que, de acordo com o modelo de Kronecker, a matriz do canal pode ser representada pela equação 3.22.

Substituindo a equação 3.22 na fórmula geral da capacidade MIMO, 3.2, chegamos a seguinte fórmula da capacidade para canais correlacionados que foram modelados de acordo com o modelo de Kronecker [8].

$$C_{MIMO_Kronecker} = \log_2 \det \left(I_{nr} + \frac{SNR}{N_t} R_r^{1/2} R_w R_t H_w^H R_r^{H/2} \right) \quad (3.23)$$

Partindo da equação acima temos que a medida que a SNR cresce, a capacidade do canal será [8]:

$$\lim_{SNR \rightarrow \infty} C = \log_2 \det \left(\frac{SNR}{N_t} H_w H_w^H \right) + \log_2 \det R_t + \log_2 \det R_r \quad (3.24)$$

A equação 3.23 nos mostra que a correlação irá reduzir a capacidade MIMO. A redução da capacidade para valores de SNR acima de 30dB pode ser dado pela seguinte equação [8]:

$$\Delta C = -\log_2 \det R_t - \log_2 \det R_r \quad (3.25)$$

4.6.EFEITOS QUE CAUSAM AUTOCORRELAÇÃO ESPACIAL

O modelo apresentado é importante pois com ele conseguimos estimar o impacto que a correlação tem no sistema MIMO. Nas simulações, iremos usar o modelo de Kronecker para examinar o impacto que a correlação de antenas tem na capacidade MIMO.

As propriedades das matrizes R_t e R_r dependem de certos parâmetros do sistema MIMO. Nesta sessão iremos explicar como o espaçamento entre elementos de um arranjo de antenas e os ângulos de dispersão tanto no transmissor quanto no receptor irão influenciar nas matrizes R_t e R_r .

Conforme iremos ver, as matrizes R_t e R_r irão se tornar mais descorrelacionadas a medida que o espaçamento entre os elementos do arranjo de antenas e o ângulo de dispersão aumentam.

Quando os elementos do arranjo de antenas estão muito próximos uns aos outros, ou seja, da figura 20, quando D_e é pequeno, parte da energia irradiada por uma antena é captada pela antena adjacente e vice versa, como consequência elas estarão sendo afetadas por um mesmo campo eletromagnético, resultando no que chamamos de acoplamento eletromagnético, isto fará com que a diferença dos canais entre antenas muito próximas diminua, e por isso os canais poderão se tornar correlacionados [29].

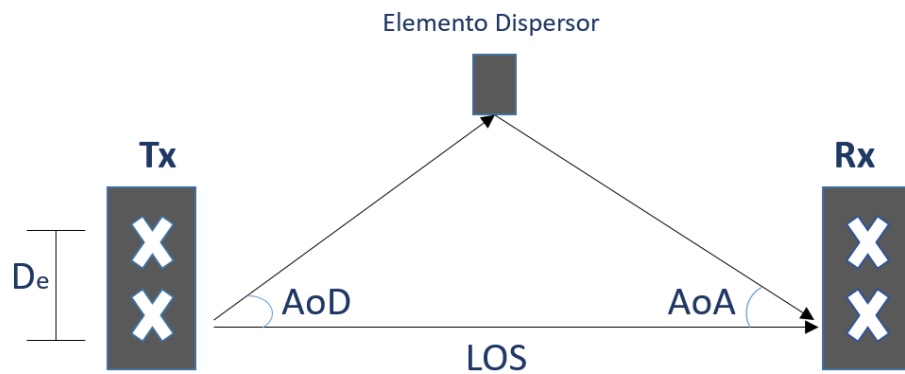


Figura 20- Transmissão Tx e Rx.

O ângulo de chegada e partida, ou do inglês, *angle of departure* (AoD) e *angle of arrival* (AoA), também influenciam no grau de correlação do sistema. A medida que o AoA aumenta, o multipercurso faz com que o sinal que chega em Rx aparente ser diferente em cada elemento da antena, e por outro lado, quando o AoA é zero, o sinal chega em Rx como uma onda plana que se move perpendicularmente ao arranjo de antenas, isso faz com que os elementos percebam o sinal como sendo o mesmo e neste caso as antenas estarão perfeitamente correlacionadas [8].

Um dos modelos usados para calcular R_r é o mostrado na figura 21. De um lado temos os elementos do arranjo de antenas do receptor onde o espaçamento entre eles é dado por d_r . Os elementos dispersores próximos ao receptor estão sendo representados pelas bolas pretas e θ_r representa o ângulo de dispersão que é o ângulo pelo qual a energia de dispersão chegará ao receptor Rx [8].

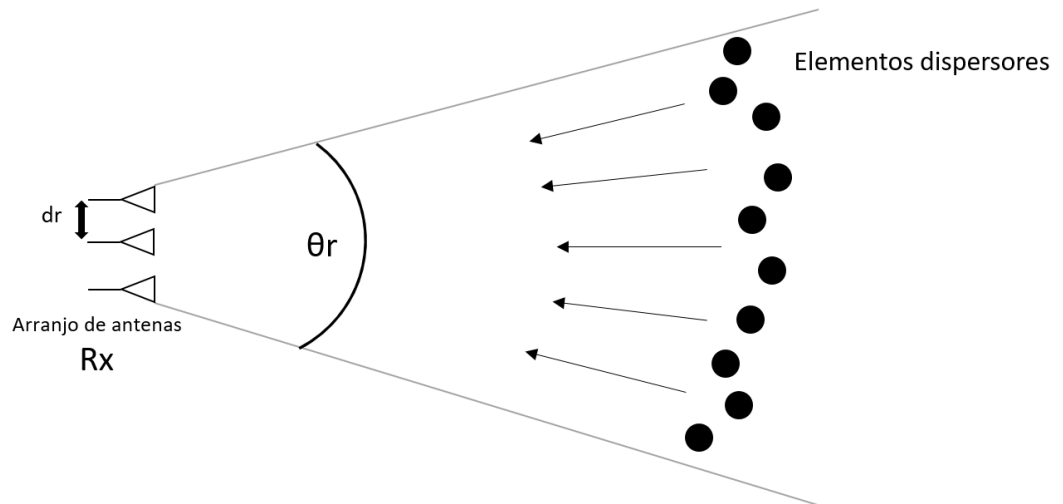


Figura 21- Geometria com dispersão uniforme [8].

Quando temos ondas eletromagnéticas irradiadas em direção ao receptor e as mesmas encontram elementos de obstrução em seu caminho, parte da energia dessa onda será dispersa e parte irá chegar ao receptor. No modelo demonstrado na figura, assumimos que a energia chega no receptor de forma igualmente distribuída através de um espaço definido por θ_r . Os elementos dispersores estão alocados aleatoriamente próximos ao receptor na região que abrange o ângulo θ_r .

Partindo das suposições feitas acima, temos que R_r pode ser calculado a partir da seguinte expressão [8]:

$$[R_r(\theta_r, dr)]_{m, k} = \frac{1}{S} \sum_{i=(S-1)/2}^{(S-1)/2} e^{-j2\Pi(k-m)dr \cos(\frac{\Pi}{2} + \theta_r, i)} \quad (3.26)$$

Onde,

S: número de elementos dispersores

θ_r : ângulo de dispersão

d_r : espaçamento entre elementos de antenas

Tendo a equação acima como base, iremos demonstrar através de simulações que, quando aumentamos o ângulo de dispersão θ_r , o espaçamento entre as antenas d_r e o número de elementos dispersores, a correlação entre os elementos do arranjo de antenas decresce, o que irá resultar em um aumento da capacidade.

5. SIMULAÇÃO

Este capítulo tem como objetivo fazer um estudo do sistema MIMO através de simulações computacionais utilizando o software MATLAB para tal propósito, os resultados obtidos aqui serão usados para concluir a nossa análise em relação a capacidade ótima do canal.

A primeira parte tem como propósito mostrar o funcionamento do sistema MIMO de uma forma geral, através de simulações verificamos como a capacidade do canal é afetada pelos parâmetros discutidos no capítulo anterior fazendo observações das melhores escolhas de parâmetros afim de obter uma capacidade ótima.

5.1.AVALIAR A CAPACIDADE DO SISTEMA MIMO EM CANAIS DE DESVANECIMENTO RAYLEIGH DESCORRELACIONADOS

Canais descorrelacionados no sistema MIMO foram considerados nesta análise para diferentes números de antenas e SNR em um canal de desvanecimento Rayleigh. Foi considerada a técnica CSIR com alocação de potência igualmente distribuída no transmissor.

O método Monte Carlo foi usado para calcular a capacidade ergódica, sendo gerado 10000 matrizes aleatórias para canais não correlacionados.

O gráfico da figura 22 mostra os resultados encontrados para capacidade do canal em função do número de antenas considerando um canal descorrelacionado, com diferentes SNR detectadas no receptor. Observamos que, para um sistema MIMO $N_t \times N_r$ onde $N_t = N_r$ a capacidade do canal cresce linearmente com o número de antenas.

Parâmetros de Simulação	Valores Utilizados
Número de Antenas	1 à 20, onde $N_t = N_r$
Modelo do Canal	<i>Rayleigh Fading</i>
Grau de Correlação	0
SNR [dB]	0, 5, 10, 20

Tabela 1- Parâmetros da simulação figura 23.

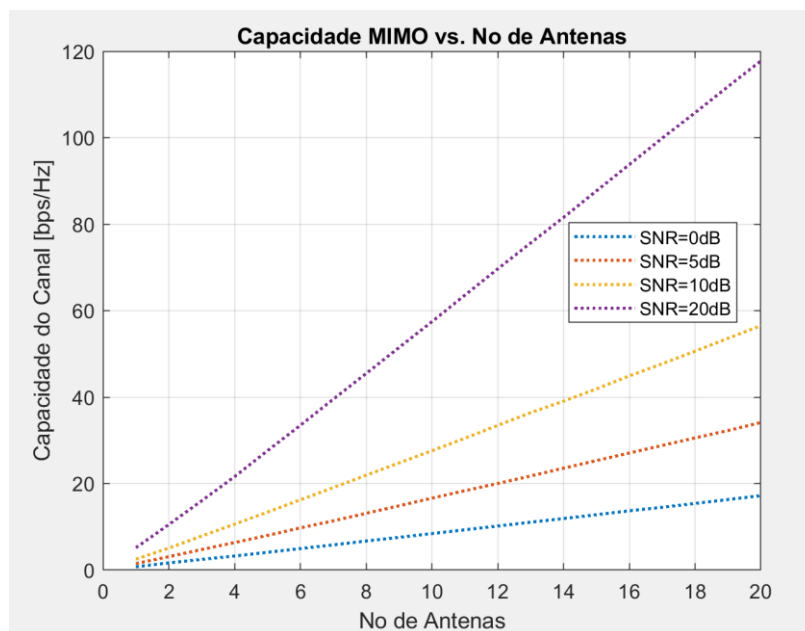


Figura 22- Capacidade do canal vs. Número de antenas.

O gráfico da figura 24 avalia como a capacidade do canal varia em função da SNR para diferentes configurações MIMO, podemos verificar que a capacidade aumenta com um aumento na SNR para diferente número de antenas.

Parâmetros de Simulação	Valores Utilizados
Configuração MIMO	1x1, 2x2, 4x4, 8x8
Modelo do Canal	<i>Rayleigh Fading</i>
Grau de Correlação	0
SNR [dB]	0 à 20

Tabela 2- Parâmetros de simulação figura 24.

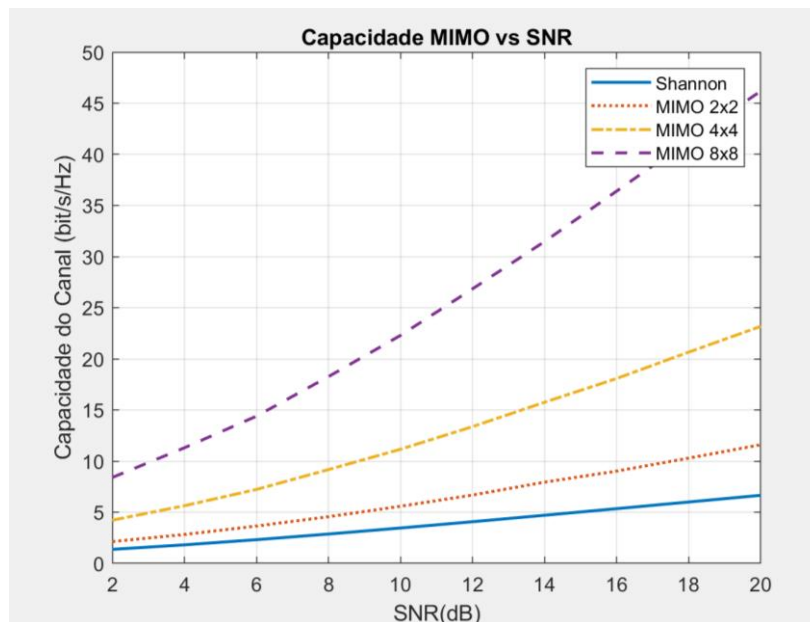


Figura 23- Capacidade vs. SNR.

A capacidade do sistema MIMO foi investigada aqui para diferentes parâmetros. Os resultados obtidos mostram os benefícios alcançados no sistema MIMO em relação a capacidade do canal quando comparado ao sistema SISO e verifica que é possível aumentar a capacidade do sistema apenas aumentando o número de antenas tanto no transmissor quanto no receptor sem que seja necessário recorrer a recursos de frequência.

Os resultados também mostram que quanto maior o número de antenas no sistema MIMO ($N \times M$), maior a sensibilidade à taxa de variação da capacidade em relação a SNR. E que por isso, para obter-se melhores resultados, deverá levar-se em conta a potência do sinal sendo transmitida para diferentes configurações (número de antenas), observando que os

sistemas com maior número de antenas irão requerer uma maior potência (que resultará em uma maior SNR) para atingir sua capacidade ótima.

O gráfico acima também pode ser utilizado para auxiliar na tomada de decisão em relação ao número ideal de antenas MIMO a ser instalado para atender a uma certa capacidade. Por exemplo, se a capacidade que desejamos obter para nosso sistema está na faixa de 2bits/s/Hz, para uma SNR de 4 dB vemos que tanto o sistema SISO quanto o MIMO 2x2 são suficientes para atender essa condição. No entanto, pelo fato de a antena MIMO 2x2 ser mais cara e que normalmente possui dimensões maiores, a melhor escolha para este caso seria a antena SISO.

As simulações obtidas aqui avaliam o sistema para condições de canal ótima, ou seja, canais independentes entre si que apresentam grau de correlação igual a zero.

As simulações posteriores irão analisar o sistema para condições não-ideais, onde os canais apresentam correlação, iremos verificar como essa correlação é causada, como podemos evitá-la e como ela impacta na capacidade do sistema.

5.2.AVALIAR A CAPACIDADE DO SISTEMA MIMO EM CANAIS CORRELACIONADOS

Na simulação passada observamos como a capacidade é influenciada pelo número de antenas, para canais não correlacionados. Porém, conforme será verificado posteriormente, diferentes fatores contribuem para que o canal não seja independente entre si, apresentando um grau de correlação que vai de 0 (canal não correlacionado) à 1 (canal totalmente correlacionado).

O gráfico da figura 24 mostra que quanto menor o grau de correlação, maior será a capacidade do canal.

Isso ocorre devido ao fato de que, canais descorrelacionados entre si, podem propagar dados simultaneamente na mesma faixa de frequência, multiplicando a capacidade do sistema.

Para canais com um grau de correlação alto (e.g. 0.9), o sistema irá ter capacidade praticamente constante independente do número de antenas, simulando um sistema SISO. Isso ocorre devido aos canais serem dependentes entre si, fazendo com que o sistema os enxergue como um só canal.

Parâmetros de Simulação	Valores Utilizados
Número de Antenas	1 à 20, onde $N_t = N_r$
Modelo do Canal	<i>Rayleigh Fading</i>
Grau de Correlação	0, 0,1, 0,2, 0,3, 0,9
SNR [dB]	10

Tabela 3- Parâmetros de simulação figura 25.

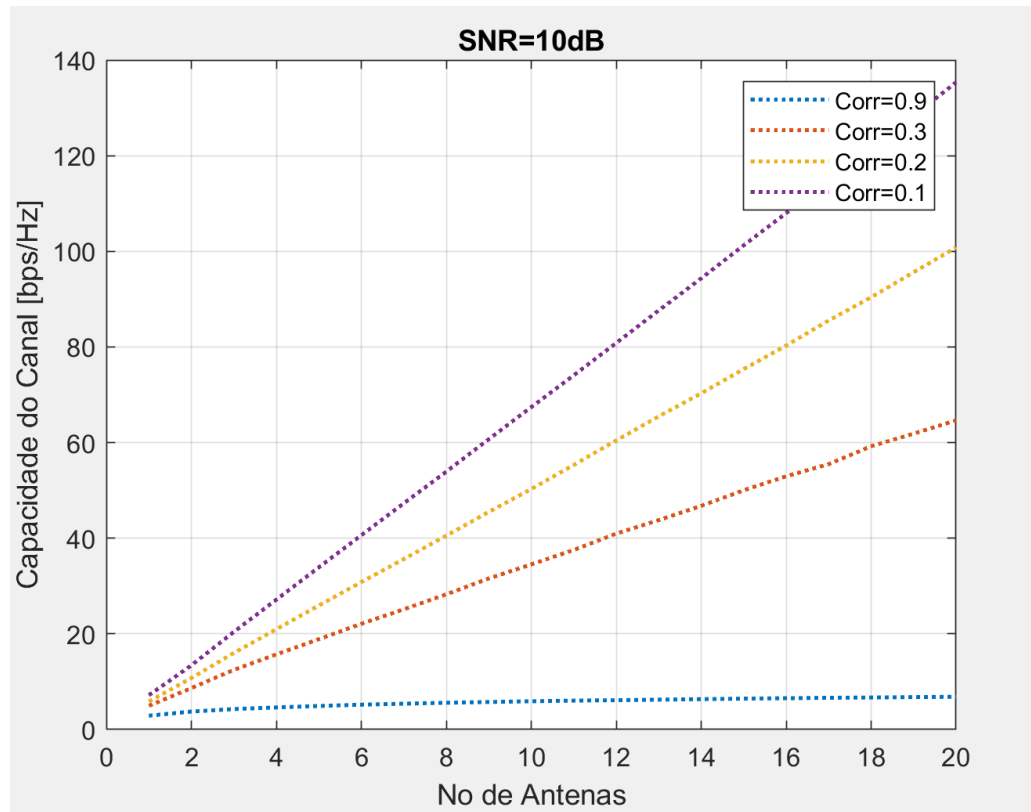


Figura 24- Capacidade vs. Número de antenas para diferentes grau de correlação.

Afim de verificar a sensibilidade da capacidade MIMO em relação ao grau de correlação, plotamos o gráfico da figura 25. A figura mostra a capacidade ergódica MIMO 4x4 e MIMO 2x2 operando em um canal Rayleigh em função do grau de correlação. Para as simulações que consideram canais correlacionados, assumimos que as correlações entre as antenas do transmissor apresentam correlação variando de zero a 0,9, e as antenas do receptor estão descorrelacionadas. As matrizes de correlação foram geradas de acordo com o modelo de Kronecker.

Nota-se que para um grau de correlação acima de aproximadamente 0,5, a degradação da capacidade é mais abrupta, devendo o projetor do sistema se atentar a esse valor para que se possa ter um desempenho razoável do sistema.

Conforme já mencionado, existem diferentes fatores que afetam a correlação do sistema, como o espaçamento entre elementos do arranjo de antenas. Para que seja possível obter que o grau de correlação do canal da figura 25 de 0,5, o projetor poderá, por exemplo, usar antenas que possuam um maior espaçamento entre elementos do arranjo de antenas.

Parâmetros de Simulação	Valores Utilizados
Configuração MIMO	2x2, 4x4
Modelo do Canal	Kronecker
Grau de Correlação	0 - 0,9
SNR [dB]	20, 30

Tabela 4- Parâmetros de simulação figura 26 e 27.

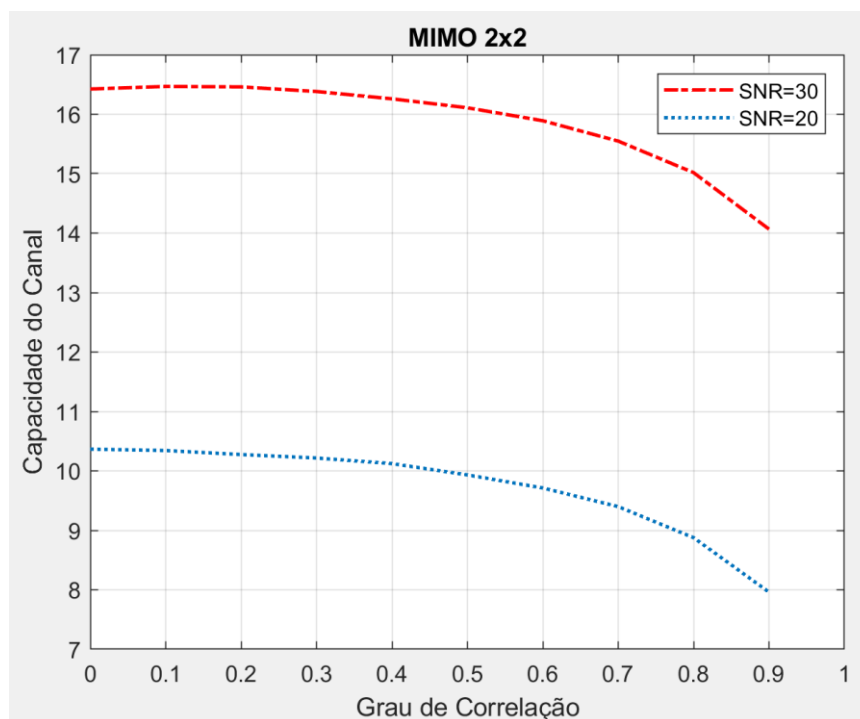


Figura 25- Capacidade vs. Grau de correlação MIMO 2x2.

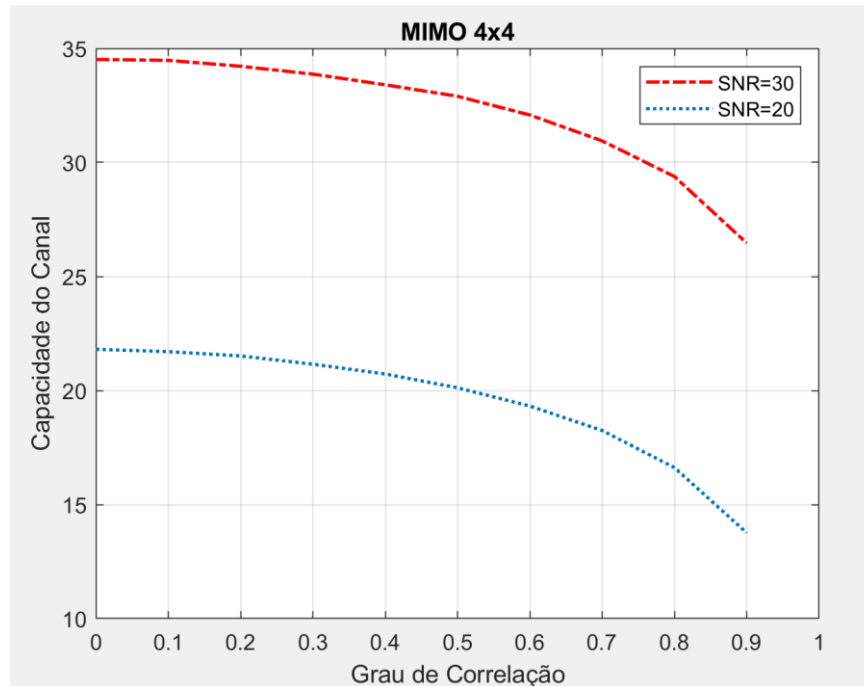


Figura 26- Capacidade vs. Grau de correlação MIMO 4x4.

Vimos aqui, como o grau de correlação afeta a capacidade do canal, a seguir veremos quais os fatores que influenciam na autocorrelação espacial, e como estes podem ser manipulados de forma a obter resultados ótimos.

5.3.IMPACTO CAUSADO PELO ÂNGULO DE DISPERSÃO, ESPAÇAMENTO ENTRE ELEMENTOS DO ARRANJO DE ANTENAS E NÚMERO DE ELEMENTOS DISPERSORES NO GRAU DE CORRELAÇÃO DO SISTEMA MIMO

A simulação da figura 27 verifica o grau de correlação em função do número de elementos dispersores.

Na figura 28, conforme esperado, o grau de correlação decai com o número de elementos dispersores entre Tx e Rx, isso se deve ao multipercurso em meios ricos de elementos dispersores, fazendo com os sinais transmitidos cheguem no Rx com características de amplitude e fase diferentes, podendo então serem diferenciados através da decodificação do sinal.

Meios que apresentam até aproximadamente 15 elementos dispersores têm uma queda mais abrupta no grau de correlação e para valores acima de aproximadamente 15 o grau de correlação será pouco afetado.

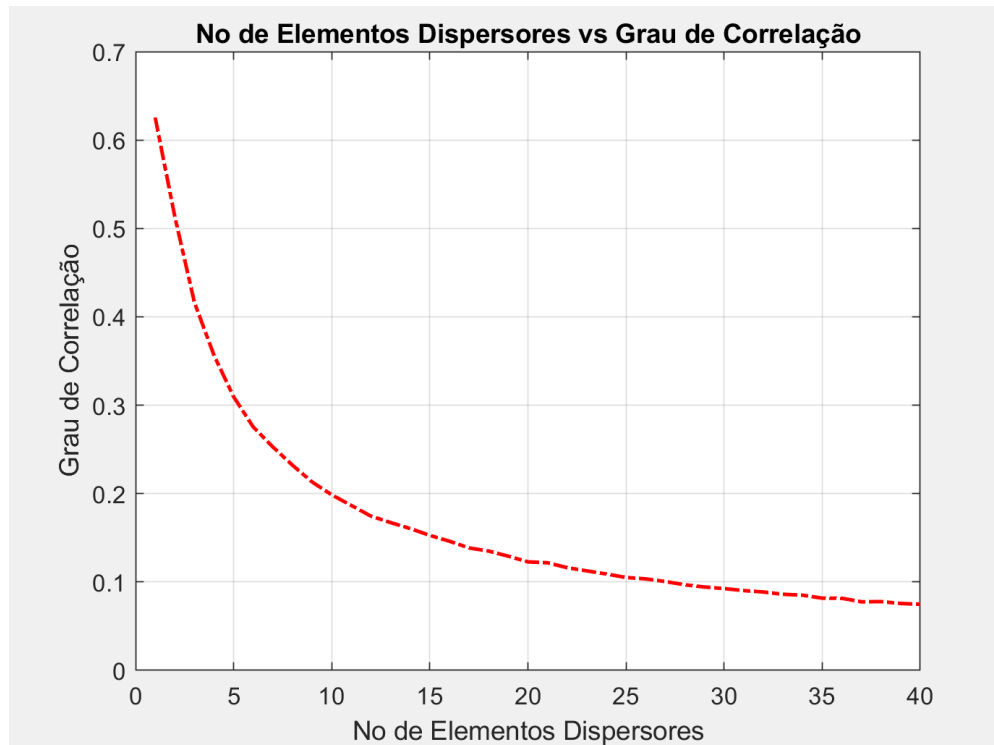


Figura 27- Grau de correlação vs. Número de elementos dispersores.

Verificado o impacto que a presença de elementos dispersores tem no grau de correlação, veremos a seguir o impacto que esses elementos têm na capacidade do canal.

Do gráfico da figur 28 duas conclusões podem ser feitas, a primeira é que quanto maior o número de antenas maior será o impacto causado por elementos dispersores no canal. Para sistemas com poucas antenas (e.g. 2x2) a capacidade irá se estabilizar mais rapidamente para um baixo número de elementos dispersores o que pode ser explicado pelo fato de que quanto maior o número de antenas ($M \times N$), maior será a ordem da matriz do canal H , ou seja, maior será o número de elementos da matriz h , e portanto, maior será a probabilidade dos elementos da matriz H percorrerem o mesmo caminho, causando um “correlacionamento” entre eles.

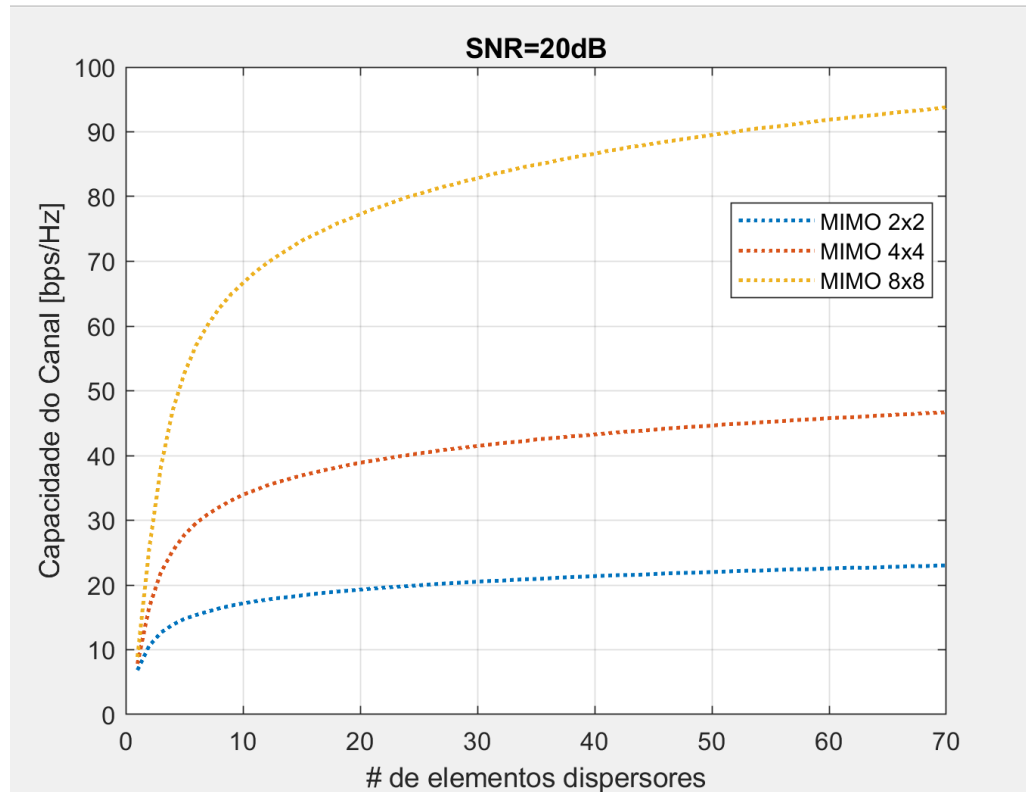


Figura 28- Capacidade vs. Número de elementos dispersores.

Outro parâmetro físico que afeta o grau de correlação do canal e consequentemente a capacidade do canal é o espaçamento entre elementos do arranjo de antenas.

O gráfico da figura 29 mostra como a capacidade do canal é afetada a medida que aumentamos o espaçamento entre os elementos. Conforme esperado, temos que a capacidade aumenta a medida que aumentamos o espaçamento entre as antenas. Para espaçamentos maiores que aproximadamente 0,5 comprimento de onda, a capacidade se tornará praticamente constante. Podemos concluir que para espaçamentos maiores que 0,5 comprimento de onda os canais irão apresentar um grau de correlação igual a zero.

Também podemos observar que quanto maior o número de antenas, maior será a sensibilidade da capacidade em relação ao espaçamento entre os elementos.

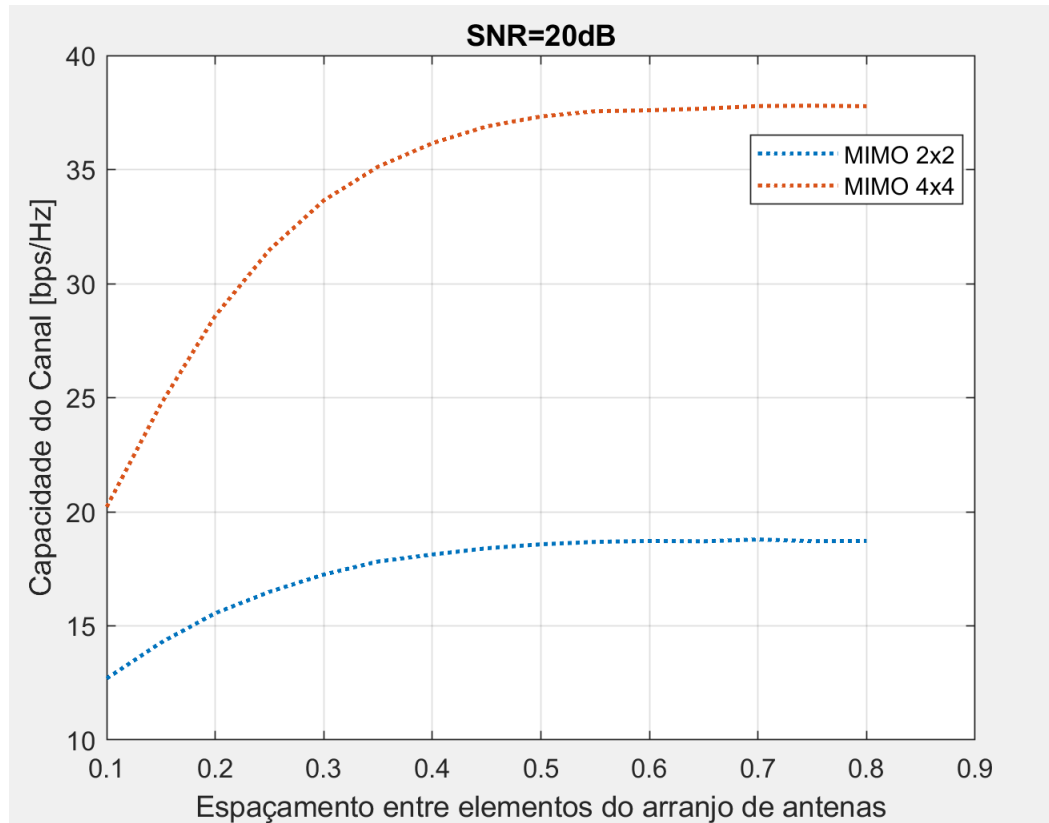


Figura 29- Capacidade vs. Espaçamento entre elementos.

Para avaliar a capacidade em função do ângulo de dispersão consideramos um sistema MIMO 4x4. O número de elementos dispersores e espaçamento entre elementos foi mantido constante.

Podemos ver que conforme aumentamos o ângulo de abertura, maior será a capacidade do canal e maior será o impacto sofrido com o aumento da SNR.

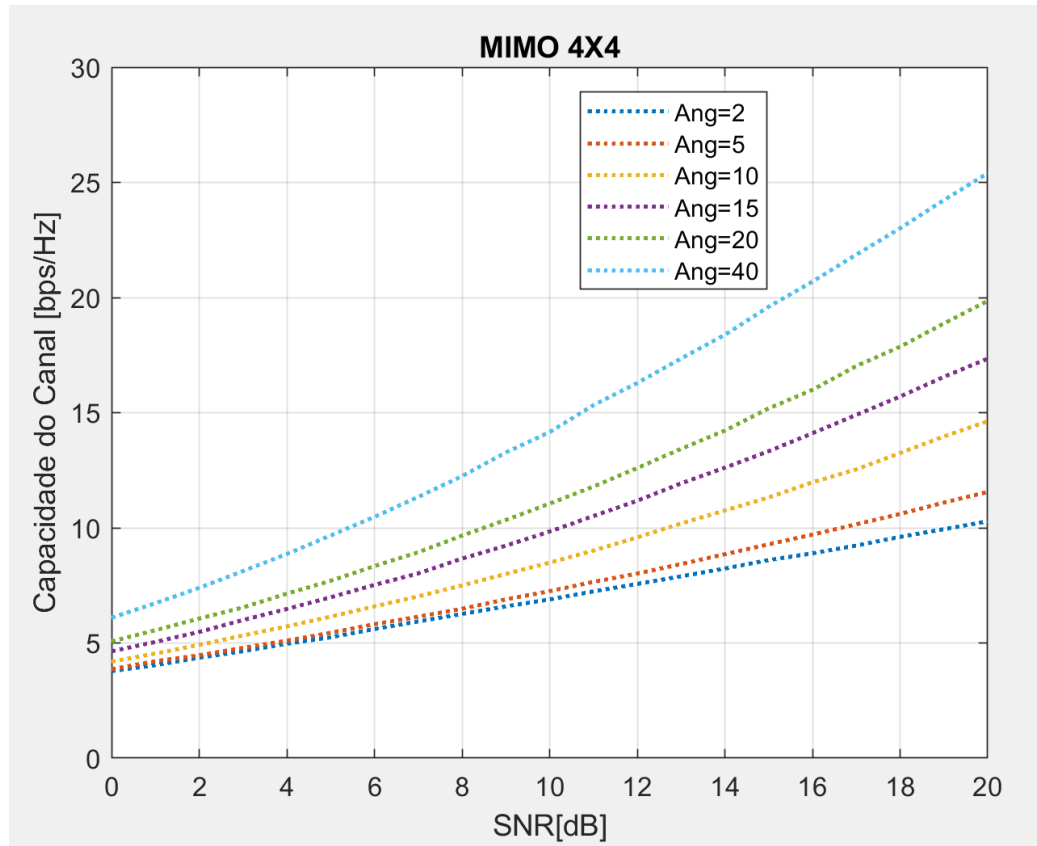


Figura 30- Capacidade vs. SNR para diferentes ângulos de dispersão.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho, vimos os conceitos envolvidos no sistema MIMO aplicado a comunicação móvel. Verificamos como o sistema funciona, sua importância para comunicação móvel e como podemos explorá-lo de forma a obter o melhor desempenho da capacidade do canal.

Exploramos modelos analíticos de modelagem para canais correlacionados e não correlacionados, esses modelos foram usados em nossas simulações a fim de verificar a resposta ao sistema para diferentes canais.

Utilizando o resultado de nossas simulações como base, verificamos como a capacidade do canal é afetada pelos diferentes parâmetros discutidos no capítulo MIMO (como o número de antenas e SNR) fazendo observações das melhores escolhas desses parâmetros a fim de obter uma capacidade ótima.

Por fim, foram apresentados três parâmetros físicos que interferem na correlação do canal, são eles: o espaçamento entre os elementos do arranjo de antenas, ângulo de dispersão e número de elementos dispersores presentes no canal de propagação. Por meio de simulações vimos como esses parâmetros afetam a capacidade do canal e como podemos utilizá-los de forma a otimizar o sistema.

7. REFERÊNCIAS

- [1] D. Gesbert, H. Bolcskei, D. A. Gore, and A. J. Paulraj, “Outdoor MIMO Wireless Channels: Models and Performance Prediction”, IEEE Transactions on Communications, vol. 50, no. 12, pp. 1926-1934, 2002.
- [2] S. K. Jha, M.K. Jain, “Performance Analysis of MIMO Systems using OSTBCs”, International Journal of Engineering Trends and Technology.vol. 4,issue7, pp. 2860-2869, 2013
- [3] CORRÊA, Eduardo Felipe. Mapa de ERBs Brasil (antenas). Disponível em: <<http://www.telebrasil.org.br/panorama-do-setor/mapa-de-erbs-antenas>>. Acesso em: 02 jul. 2019.
- [4] POOLE, Ian. LTE FDD, TDD, TD-LTE Duplex Schemes. Disponível em: <<https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/4g-lte-long-term-evolution/tdd-fdd-td-lte-duplex-schemes.php>>. Acesso em: 02 jul. 2019.
- [5] PEDRINI, Leonardo Zanoni. TelecomHall. Disponível em: <<http://www.telecomhall.com/br/>>. Acesso em: 02 jul. 2019.
- [6] SAHA, Rajeev. Antenna Theory - Radiation Pattern. Disponível em: <https://www.tutorialspoint.com/antenna_theory/antenna_theory_radiation_pattern.htm>. Acesso em: 02 jul. 2019.
- [7] STUTZMAN, Warren L.. Radiation Pattern. Disponível em: <<http://www.antenna-theory.com/basics/radpattern.php>>. Acesso em: 02 jul. 2019.
- [8] J. Hampton, Introduction to MIMO communications. New York: Cambridge University Press, 2014.
- [9] D. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of wireless communication*. Cambridge UP: Cambridge, 2013.
- [10] A.M.ABDULSATTAR, Emad. Mohamed And. EVALUATION OF MIMO SYSTEM CAPACITY OVER RAYLEIGH FADING CHANNEL. International Journal Of Computer Science & Engineering Survey. Mousel, Iraq, p. 5-11. jun. 2015.

- [11] TUDE, Eduardo. Qualidade Celular. Disponível em: <<https://www.teleco.com.br/qualidadecel.asp>>. Acesso em: 02 jul. 2019.
- [12] MCGARRY, Caitlin. The Truth About 5G: What's Coming (and What's Not) in 2019. Disponível em: <<https://www.tomsguide.com/us/5g-release-date,review-5063.html>>. Acesso em: 02 jul. 2019.
- [13] RAJU, G. S. N.. Antennas and Wave Propagation. New Delhi: Dorling Kindersley, 2009.
- [14] RIBEIRO, José Antônio Justino. Propagação das Ondas Eletromagnéticas - Princípios e Aplicações. São Paulo: Editora Érica, 2004.
- [15] ISHIMARU, Akira. Wave propagation and scattering in random media. New York: Ieee, 1997.
- [16] ZANATELI, MARCELO RIBEIRO- Engenharia de Sistemas Radiovisibilidade- São Paulo: Ed. Clube dos Autores, 2013.
- [17] KSHETRIMAYUM, Rakesh Singh. Fundamentals of MIMO Wireless Communications. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
- [18] PROF. WALTER PEREIRA CARPES JUNIOR. Apostila de Engenharia de Antenas. Florianópolis.
- [19] HAMDY, Dr. Mohamed Nadder. An introduction to LTE Smart base station antennas. New York: Mobility Network Engineering, 2017.
- [20] PUPOLIN, Silvano. MIMO systems. Ieee. Rome, p. 1-5. out. 2012.
- [21] SHIN, H.; WIN, M.z.; LEE, J.h.. On the Capacity of Doubly Correlated MIMO Channels. Ieee: IEEE. Seoul, p. 7-13. set. 2006.
- [22] HASHEM, Tahsina; ISLAM, Md. Imdadul. Performance analysis of MIMO link under fading channels. Ieee. Dhaka, p. 1-7. abr. 2015.
- [23] COSTA, Nelson; HAYKIN, Simon. Multiple-Input Multiple-Output Channel Models: Theory and Practice. New Jersey: John Wiley & Sons, 2010.
- [24] BAIT-SUWAILAM, Mohammed M.. Metamaterials for Decoupling Antennas and Electromagnetic Systems. 2011. 159 f. Tese (Doutorado) - Curso de Electrical And Computer Engineering, University Of Waterloo, Ontario, 2011.

[25] SIBILLE, Alain; ZANELLA, Alberto; OESTGES, Claude. MIMO: From Theory to Implementation. Stanford: Academic Press, 2010.