



Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Centro de Engenharia Elétrica e Informática - CEEI
Departamento de Engenharia Elétrica - DEE
Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica - CGEE

Marilia Caroline de Almeida Cardoso Silva

ESTUDO DO *MASSIVE MIMO* EM SISTEMAS 5G

Campina Grande, PB
Maio de 2021

Marilia Caroline de Almeida Cardoso Silva

ESTUDO DO *MASSIVE MIMO* EM SISTEMAS 5G

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação de Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharela em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Edmar Candeia Gurjão

Campina Grande, PB
Maio de 2021

Marilia Caroline de Almeida Cardoso Silva

ESTUDO DO *MASSIVE MIMO* EM SISTEMAS 5G

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação de Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharela em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado em: 27/ 05/ 2021

Edmar Candeia Gurjão, UFCG

Professor Orientador

Raquel Aline Araújo Rodrigues, UFCG

Professor(a) Avaliador(a)

Campina Grande, PB

Maio de 2021

*Dedico esse trabalho àquelas que me deram tudo, minha
mãe e minha avó.*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado forças pra chegar até aqui. Agradeço a minha mãe, Maria do Rosário (*in memorian*), e a minha avó, Maria das Neves (*in memorian*), por terem sido exemplos de amor, força e determinação. Muito do que sou é por causa de vocês. Sei que olham por mim de onde estão, e eu dedico essa conquista a vocês.

A minha família, especialmente aos meus irmãos, Monica e Artur, e minhas tias, Celi e Zilma que, diante de todas as adversidades, me deram todo suporte, oportunidade e paciência que eu precisava para entrar e enfrentar essa graduação. Devo muito a vocês.

A minha amiga de infância, Ayza, pelo apoio para continuar batalhando, pelos conselhos, não só durante o processo de escrita desse trabalho, mas como também da graduação e da maior parte da minha vida.

Aos amigos que o curso - e a ênfase em Telecomunicações - me deu: Alison, Guerra, Isabel, Larissa, Sílvia e Weverton. Obrigada pelas ajudas nas disciplinas, conversas durante o almoço, risadas dentro e fora da sala de aula, e os ensinamentos que vão além dos muros da universidade. Deixo também meu "obrigada" a todas as outras pessoas que cruzaram meu caminho ao longo do curso e me ajudaram a chegar até aqui. Já diziam os Beatles, "*I get by with a little help from my friends*".

Por fim, mas não menos importante, agradeço ao professor orientador Edmar Gurjão, pela paciência, compreensão e palavras de apoio para comigo nesse tempo tão atípico que estamos vivendo e pela orientação ao longo do trabalho.

*"Happiness can be found even in the darkest of times,
when only one remembers to turn on the light."*

J.K. Rowling

Resumo

Devido ao aumento na demanda das redes de comunicação móveis, com cada vez mais dispositivos conectados e necessidade por serviços mais rápidos e eficientes, há o desenvolvimento da quinta geração desses sistemas de comunicação (5G). Para atender aos parâmetros de funcionamento da nova geração, os sistemas MIMO de múltiplas antenas, mais precisamente o *Massive* MIMO, surgem como uma das técnicas mais promissoras. *Massive* MIMO se refere a sistemas em que a estação rádio base é equipada com um número muito grande de antenas, proporcionando aumentos de eficiências energética e espectral. O presente trabalho tem como objetivo descrever o *Massive* MIMO, destacando suas principais vantagens, seu funcionamento em relação a estimação do canal e pré-codificação e decodificação, além de elencar problemas importantes relativos a contaminação piloto e arranjos de antena. Além disso, faz-se um apanhado com as pesquisas futuras sobre o assunto. Dele, conclui-se que as vantagens trazidas pelo emprego do *Massive* MIMO tornam essa tecnologia um dos pilares para o funcionamento e a implementação do 5G. Também percebeu-se que ainda há muito que ser pesquisado nessa área.

Palavras-chave: Sistemas MIMO, *Massive* MIMO, 5G, estimação do canal, pré-codificação, contaminação piloto.

Abstract

Due to the increased demand for mobile communication networks, with more and more connected devices and the need for faster and more efficient services, there is the development of the fifth generation of these communication systems (5G). In order to meet the operating parameters of the new generation, the MIMO systems of multiple antennas, more precisely the *Massive* MIMO, appears as one of the most promising techniques. *Massive* MIMO refers to systems in which the base station is equipped with a very large number of antennas, providing increases in energy and spectral efficiencies. The present work aims to describe the *Massive* MIMO, highlighting its main advantages, its operation in relation to channel estimation and pre-coding and decoding, in addition to listing important problems related to pilot contamination and antenna arrays. In addition, an overview is made of future research on the subject. From it, it is concluded that the advantages brought by the use of *Massive* MIMO make this technology one of the pillars for the operation and implementation of 5G. It was also realized that there is still a lot to be researched in this area.

Key words: MIMO systems, Massive MIMO, 5G, channel estimation, precoding, pilot contamination .

Lista de Figuras

Figura 1 - Canal sem memória com entrada x e saída $y = hx + n$, onde h é a resposta do canal e n é o ruído Gaussiano independente.	4
Figura 2 - Sistema MIMO ponto a ponto	8
Figura 3 - Sistema MIMO de múltiplos usuários	9
Figura 4 - Gráfico do tráfego de dados móveis (EB por mês) no intervalo de tempo de 2015-2026	11
Figura 5 - Sistema <i>Massive</i> MIMO na operação de <i>downlink</i>	14
Figura 6 - Sistema <i>Massive</i> MIMO na operação de <i>uplink</i>	14
Figura 7 - Protocolo TDD para <i>massive</i> MIMO	15
Figura 8 - Contaminação piloto na operação de <i>uplink</i>	19

Lista de Símbolos

P	Potência do Sinal
σ_n^2	Potência do Ruído
N_o	Densidade espectral do ruído
B	Largura de banda
p_v	Potência da interferência
x	Sinal de entrada de um canal
y	Sinal de saída de um canal
h	Resposta do canal
n	Ruído
C	Capacidade do canal
p	Função densidade de probabilidade Rayleigh
r	Amplitude do envelope do sinal recebido
σ^2	Potência média do sinal multipercurso
T_c	Tempo Coerente
B_c	Largura de banda coerente
M	Número de antenas da estação rádio base
K	Número de antenas de usuários
x_d	Vetor transmitido na operação de downlink
y_d	Vetor recebido no canal de downlink
	Potência de transmissão
\mathbf{n}_d	Vetor de ruído
\mathbf{G}	Matriz do canal
\mathbf{D}	Matriz dos coeficientes do desvanecimento em larga escala
\mathbf{H}	Matriz dos coeficientes do desvanecimento em pequena escala
\mathbf{s}_d	Vetor de fonte de informação para cada usuário
SNR_{MF}	Relação sinal-ruído para o pré-codificador de filtro casado
a	Letras minúsculas e sem destaque representam escalares
\mathbf{a}	Letras minúsculas e em negrito representam vetores
\mathbf{A}	Letras maiúsculas e em negrito representam matrizes
$\{\cdot\}^T$	Operador de matriz transposta
$\{\cdot\}^H$	Operador hermitiano transposto
$\{\cdot\}^{Tr}$	Operador traço da matriz
$min(\cdot)$	Valor mínimo assumido pelo argumento

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	2
1.1.1	Objetivos Específicos	2
1.2	Estrutura do Trabalho	2
2	Fundamentação Teórica	3
2.1	Relação sinal-ruído - SNR e SINR	3
2.2	Capacidade do canal	3
2.3	Desvanecimento	4
2.4	Diversidade	5
2.5	Bloco Coerente	7
3	Sistemas MIMO	8
4	<i>Massive</i> MIMO	11
4.1	5G e o <i>Massive</i> MIMO	11
4.2	Visão geral do <i>Massive</i> MIMO	12
4.3	Funcionamento	13
4.3.1	Estimação do canal	15
4.3.2	Pré-codificação e Decodificação	16
4.4	Desafios	18
4.4.1	Contaminação Piloto	18
4.4.2	Arranjos de antenas	19
4.5	Pesquisas Atuais	20
5	Conclusões	21
	Referências Bibliográficas	22

1 Introdução

Na última década, o número de dispositivos conectados às redes de comunicação sem fio cresceu consideravelmente, gerando uma modificação na demanda exigida por cada usuário. Com o advento da quinta geração de comunicações móveis (5G) - tecnologia em fase de implementação em muitos países, com popularização estimada para 2025, o mercado demanda que os serviços tenham melhor performance, com uma menor taxa de latência e maior taxa de transmissão. Dessa maneira, há uma urgência para a criação de novas tecnologias, de modo que os novos sistemas suportem uma maior capacidade, de 10 a 100 vezes mais que os sistemas atuais da quarta geração de comunicações móveis (4G).

Para atender as demandas do 5G, existem três soluções principais que aumentam a ordem de magnitude da capacidade do sistema: exploração do espectro eletromagnético que está subutilizado ou inutilizado, implementação mais densa de pontos de acesso - cada um com uma pequena área de cobertura, e uso de terminais e pontos de acesso com múltiplas antenas (MARZETTA, 2016).

Para as duas primeiras atividades faz-se uso de pequenas células e ondas milimétricas (*millimeter wave* - *mmWave*). Já para a terceira, faz-se uso de sistemas chamados de múltiplas-entradas, múltiplas saídas (*multiple-input, multiple-output* - MIMO), mais precisamente de múltiplas antenas, objeto principal desse trabalho. Desenvolvido principalmente nas duas últimas décadas, teve seus trabalhos iniciais voltados para o MIMO ponto a ponto (*Point-to-Point* MIMO) - onde uma estação rádio base (ERB) alimenta um único terminal, cada um equipado com um conjunto de antenas. Logo após, fez-se estudo dos sistemas MIMO de múltiplos usuários (*multi-user MIMO* - MU-MIMO), onde a ERB com múltiplas antenas atende simultaneamente um conjunto de terminais. Dessa última, desenvolveu-se a sua forma mais atual, chamada de *Massive MIMO*, que nada mais é do que o MU-MIMO com uma quantidade muito maior de antenas conectadas à estação rádio base do que o número de terminais atendidos pela mesma.

Pesquisas sobre os sistemas MIMO estão cada vez em maior número, pois o uso de múltiplas antenas no transmissor e receptor traz benefícios capazes de aumentar significativamente a capacidade do sistema, além de amenizar problemas relacionados à transmissão de dados. Com o *Massive MIMO*, mais dados podem ser enviados pelas antenas por meio do emprego de multiplexação espacial, há uma melhora na estimação do canal, além da diminuição dos efeitos do ruído descorrelacionado e do desvanecimento, e o emprego de técnicas simples de pré-codificação e detecção do sinal são consideradas ótimas, dentre outros benefícios. Porém, com o um número muito grande de antenas na ERB, outros problemas surgem, como contaminação piloto e problemas relacionados a estrutura dos arranjos de antenas.

1.1 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo descrever, de maneira mais ampla uma das tecnologias mais importantes para a implementação da quinta geração de comunicações móveis, o *Massive MIMO*.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Contextualizar os Sistemas MIMO;
- Contextualizar sua aplicabilidade no 5G;
- Descrever as principais vantagens que vêm com o aumento de antenas na estação rádio base;
- Expor os principais aspectos de funcionamento;
- Apresentar os problemas principais da tecnologia e o que está sendo pesquisado atualmente.

1.2 Estrutura do Trabalho

O capítulo 2 é reservado para explicação de conceitos necessários para o entendimento e análise dos sistemas *Massive MIMO*, como relação sinal-ruído (SNR - *signal to noise ratio*), relação sinal-ruído-mais-interferência (SINR - *signal to interference plus noise ratio*) e capacidade do canal. Também são abordados um dos principais efeitos que afetam o canal, o desvanecimento e técnicas de diversidade de sinal. Por fim, são apresentados os conceitos relativos a bloco coerente.

No capítulo 3 é feita uma breve explicação sobre os sistemas MIMO no geral, começando pelo MIMO ponto a ponto, passando pelo MIMO para múltiplos usuários e finalizando com o *Massive MIMO*. É explanado o funcionamento de cada um, com principais vantagens e desvantagens.

No capítulo 4 há uma exposição mais aprofundada do *Massive MIMO*. Primeiro, é explicado o porquê do seu uso no 5G. Logo após, é feita uma visão geral sobre o sistema, mostrando suas principais vantagens. Em seguida, aspectos principais do seu funcionamento são elencados. Logo após, os principais desafios relacionados a tecnologia são mostrados e, por fim, algumas pesquisas atuais são expostas.

No capítulo 5 estão as conclusões.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Relação sinal-ruído - SNR e SINR

A relação sinal-ruído (*signal to noise ratio* - SNR) é, como o próprio nome já diz, a razão entre a potência do sinal e o ruído, sendo considerada uma das medidas de desempenho mais importantes dos sistemas de comunicação. De acordo com (PROAKIS, 2001), é definido matematicamente por:

$$SNR = \frac{P}{\sigma_n^2}$$

sendo P é a potência do sinal e σ_n^2 é a potência do ruído, tal que $\sigma_n^2 = N_o B$, sendo N_o a densidade espectral do ruído e B a largura de banda utilizada. Outra medida importante, e mais realista, é aquela que considera, além do ruído, a interferência, chamada de SINR (*signal to interference plus noise ratio*). Ela mede a razão entre a potência do sinal e as potências relativas à interferência e ao ruído, expressa matematicamente de acordo com (BJÖRNSON, 2017) em:

$$SINR = \frac{P}{p_v + \sigma_n^2}$$

sendo p_v é a potência da interferência.

2.2 Capacidade do canal

O objetivo principal quando há transmissão de informação por qualquer canal de comunicação é a confiabilidade, que é medida pela probabilidade de chegar o sinal correto no receptor. Devido a existência do ruído, temos que sempre haverá uma certa probabilidade de erro. Porém, um resultado fundamental da teoria da informação é que uma transmissão confiável pode ocorrer mesmo em canais ruidosos, contanto que a taxa de transmissão atinja um valor mínimo que chamamos de capacidade de canal (PROAKIS, 2001).

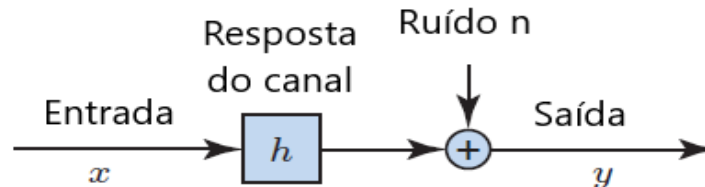
Nas comunicações sem fio, o canal de interesse é aquele onde o sinal recebido é uma sobreposição de uma versão escalada do sinal desejado e um ruído aditivo gaussiano. Esses canais são comumente denominados de canais de ruído gaussiano branco aditivo (*additive white Gaussian noise* - AWGN) (BJÖRNSON, 2017).

Para determinar a capacidade do canal, consideramos um canal sem memória com entrada $x \in \mathbb{C}$ e saída $y \in \mathbb{C}$ dado por:

$$y = hx + n$$

sendo $n \sim \mathcal{N}_{\mathbb{C}}(0, \sigma_n^2)$ é o ruído independente. O sistema é representado pela Figura 1.

Figura 1: Canal sem memória com entrada x e saída $y = hx + n$, onde h é a resposta do canal e n é o ruído Gaussiano independente.



Fonte: (Adaptado de Björnson, 2017).

Considerando diversas manobras matemáticas que não cabem aqui a explicação, temos que a capacidade do canal, dada por C e medida em bits/s, do sistema acima, considerando que a largura de banda do canal de B hertz, é dada por (1).

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{P}{\sigma_n^2} \right) = B \log_2 (1 + SNR) \quad (1)$$

A capacidade também pode ser escrita em função da SINR, se considerarmos um sistema mais real afetado pelo ruído e pela interferência. Assim, obtemos outra expressão para capacidade dada por (2):

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{P}{\sigma_n^2 + p_v} \right) = B \log_2 (1 + SINR) \quad (2)$$

sendo, como já dito anteriormente, P é a potência do sinal, σ_n^2 é a potência do ruído e p_v é a potência da interferência.

2.3 Desvanecimento

O desvanecimento é um dos principais fatores que cooperam para a degradação do canal. Ele surge pois os sinais em um sistema de comunicações móvel sem fio viajam do transmissor para o receptor por diferentes caminhos, fenômeno que chamamos de propagação por multipercurso. Esse efeito pode causar flutuações na amplitude, fase e ângulo de chegada no sinal recebido, originando o desvanecimento por multipercurso.

De acordo com (SKLAR, 1997) existem dois tipos de efeito de desvanecimento característicos das redes sem fio: desvanecimentos em larga escala e desvanecimento em pequena escala. O primeiro representa a atenuação da potência média do sinal devido ao movimento ao longo de grandes áreas. Ele se manifesta quando há grandes terrenos (montanhas, florestas, *outdoors*, prédios, etc.) entre o transmissor e o receptor.

Já o desvanecimento em pequena escala se refere a mudanças significativas na amplitude e fase do sinal que podem ser experimentadas quando há pequenas mudanças (na ordem de meio comprimento de onda) no espaço que separa o transmissor e o receptor. Esse tipo de desvanecimento se manifesta de duas formas: dispersão do sinal e comportamento de canal variante no tempo. Outro nome para essa modalidade é de desvanecimento Rayleigh, pois se os múltiplos caminhos são muitos e não existe a componente de linha de visada direta, o envelope do sinal recebido pode ser descrito por uma função densidade de probabilidade (fdp) Rayleigh, dada por:

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right]; r \geq 0$$

sendo r é a amplitude do envelope do sinal recebido e $2\sigma^2$ é a potência média do sinal multipercurso.

2.4 Diversidade

Os sistemas de comunicação sem fio exigem técnicas de processamento de sinal que melhorem o desempenho do enlace em ambientes hostis de propagação (RAPPAPORT, 2009). Um das melhores técnicas para mitigar os efeitos do desvanecimento e de outros fatores que degradam o sinal é fazer uso de técnicas de diversidade. Elas exploram o fato de que sinais que se propagam por caminhos independentes têm uma baixa probabilidade de serem profundamente afetadas pelo desvanecimento ao mesmo tempo. Assim, a ideia por trás dessa técnicas é enviar os mesmos dados por caminhos com desvanecimentos independentes. Esses caminhos são combinados de tal maneira que o desvanecimento do sinal resultante é reduzido (GOLDSMITH, 2005).

Existem vários tipos de diversidade que podem ser usados nos sistemas de comunicação sem fio. Os mais importantes são elencados a seguir:

- Diversidade temporal: o sinal é transmitido em diferentes intervalos de tempo, onde a diferença entre esses intervalos não deve ser maior do que o tempo coerente T_c . Esse tipo de diversidade não requer um aumento na potência de transmissão, mas diminui a taxa de dados (GOLDSMITH, 2005);
- Diversidade em frequência: o sinal em banda estreita é transmitido simultaneamente por diferentes portadoras. Os intervalos de frequência entre as portadoras não deve ser maior que a largura de banda coerente B_c do canal. Para essa técnica, é preciso aumentar a potência para que o sinal seja enviado pelas portadoras (GOLDSMITH, 2005);

- Diversidade espacial: se refere ao uso de múltiplas antenas receptoras, posicionadas em diferentes locais, para resultar na recepção de diferentes, e possivelmente independentes, sinais (CHANDRASEKARAN, 2005). Esses sinais diferentes são obtidos sem que precise aumentar a potência do sinal e nem a largura de banda que ele ocupa. Além disso, a combinação coerente dos sinais diversificados aumenta a SNR no receptor, que chamamos de ganho pelo arranjo de antenas (GOLDSMITH, 2005);
- Diversidade de polarização: ocorre quando há o uso de duas antenas, receptoras ou transmissoras, com diferentes polarizações. As duas ondas transmissoras seguem o mesmo caminho. Porém, como as reflexões ao longo do percurso distribuem a potência quase que igualmente entre as duas antenas, a potência média recebida relativa a cada uma das antenas é praticamente a mesma. E temos também que o ângulo de espalhamento de cada polarização é aleatório, o que torna altamente improvável que as duas antenas sofram fortes efeitos de desvanecimento ao mesmo tempo. Nessa técnica é limitada pois só permite o emprego de duas antenas e a potência cai pela metade, já que é dividida entre as duas antenas (GOLDSMITH, 2005);
- Diversidade angular: Se refere ao uso de antenas direcionais para criar cópias independentes do sinal transmitido por múltiplos caminhos (CHANDRASEKARAN, 2005). Essa técnica requer um número suficiente de antenas direcionais para abrange todas as direções de chegada possíveis ou uma antena cuja diretividade seja justamente da componente relativa ao melhor percurso. A desvantagem dessa técnica é que a SNR pode decair devido às componentes de multipercursos que se perdem por não estarem dentro do ângulo de diretividade da antena (GOLDSMITH, 2005).

Considerando os casos de diversidade no receptor, principalmente a diversidade espacial, temos que técnicas de combinação são utilizadas entre os caminhos de desvanecimento independente e as múltiplas antenas no receptor para obter um melhor desempenho do sistema. A maioria das técnicas de combinação são lineares: a saída do combinador é uma soma ponderada dos sinais vindos dos caminhos diversos. Algumas dessas técnicas de combinação são listadas a seguir, de acordo com (GOLDSMITH, 2005).

- Combinação por seleção: o combinador seleciona o sinal com a maior SNR. Aqui, a SNR de saída é igual à SNR do sinal selecionado;
- Chaveamento simples: o combinador faz uma varredura de todos os ramos, em sequência, e carrega na saída o primeiro sinal cuja SNR ultrapassa um certo valor de limiar. Dessa forma, a SNR da saída é, no melhor caso, igual à SNR do primeiro melhor ramo de entrada.

- Combinação de razão máxima (MRC - *maximum ratio combining*): a saída do combinador é formada por uma soma ponderada entre todos os ramos de entrada do mesmo. Os sinais cuja SNR é elevada possuem peso maior do que os de SNR menor. A SNR da saída cresce proporcionalmente com o número de ramos. Aqui, é necessário conhecer a fase do sinal em cada ramo. Ainda assim, é considerada a melhor técnica para sistemas com ruído.
- Combinação de ganho idêntico (EGC - *Equal-gain combining*): nesse caso, todos os sinais de entrada são combinados, com o mesmo peso, para formar o sinal de saída. Dessa forma, o sinal de saída pode ser visto como a simples soma de todos os sinais de entrada. Aqui, a SNR de saída é no máximo, igual à SNR obtida com o método MRC.

Em relação à diversidade no transmissor, temos que ela ocorre quando há múltiplas antenas no transmissor e a potência de transmissão é dividida entre essas antenas. É desejável em sistemas que possuem recursos de espaço, potência e capacidade de processamento disponíveis no lado do transmissor. O tipo de diversidade depende se o ganho do canal é conhecido ou não pelo transmissor. Quando esse ganho é conhecido, o processo é similar à diversidade no receptor. Já quando não há o conhecimento sobre o canal, diversidade no transmissor requer uma combinação de diversidade no tempo e no espaço (GOLDSMITH, 2005).

2.5 Bloco Coerente

Segundo (MARZETTA, 2016), o intervalo de tempo no qual o canal pode ser considerado como invariante no tempo é chamado de tempo coerente e é denotado por T_c , medido em segundos. Já a largura de banda coerente, denotada por B_c e medida em Hertz, é descrita como o intervalo de frequência no qual a resposta do canal é aproximadamente constante (BJÖRNSON, 2017).

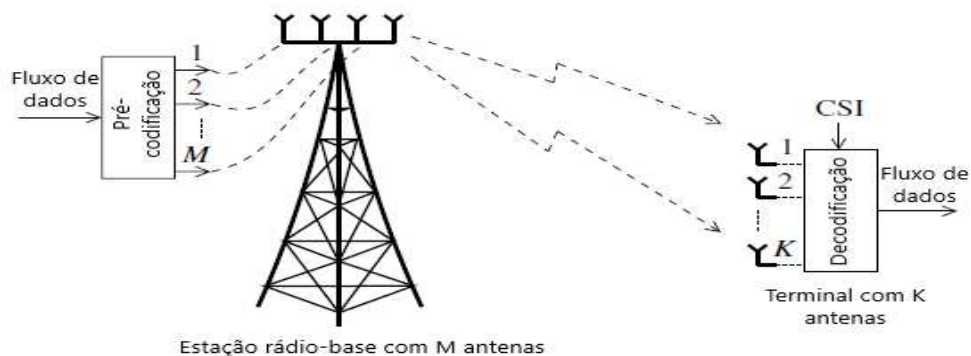
Um espaço de tempo-frequência de duração T_c e largura de banda B_c é chamado de bloco ou intervalo coerente (MARZETTA, 2016). Ele consiste no número de subportadoras e amostras de tempo nos quais a resposta do canal pode ser aproximada como constante e com desvanecimento plano. Para o caso de T_c e B_c , o bloco coerente conterá $\tau_c = T_c B_c$ amostras (BJÖRNSON, 2017).

3 Sistemas MIMO

O aumento de dispositivos conectados às redes sem fio, principalmente às móveis, motiva a pesquisa para o desenvolvimento de tecnologias que elevem as taxas de dados. Dessa forma, os sistemas de múltiplas antenas, conhecidos como MIMO, viram uma área de estudo promissora para atender essas novas demandas.

A forma mais simples dos sistemas MIMO é conhecida como MIMO ponto a ponto e surgiu no final dos anos 1990. Nela, a estação rádio base equipada com um conjunto de M antenas transmite dados para um usuário também equipado com um conjunto de K antenas (MARZETTA, 2016). Diferentes usuários são atendidos por meio de multiplexação por divisão de tempo ou de frequência. Em cada uso do canal, um sinal é transmitido e outro é recebido, sendo esse último uma combinação linear dos sinais transmitidos, com os coeficientes de combinação determinados pela propagação entre as duas pontas do enlace (MARZETTA, 2015). Um esquema do MIMO ponto a ponto para o *downlink* (DL), que é quando a estação rádio base transmite dados para os usuários, é visto na Figura 2.

Figura 2: Sistema MIMO ponto a ponto



Fonte: (Adaptado de Marzetta, 2016).

Sob uma série de suposições, para uma relação sinal-ruído suficientemente alta, temos que a eficiência espectral do canal é proporcional a $\min(M, K)$. Dessa forma, tem-se que a performance pode ser aumentada apenas com a adição de mais antenas na estação rádio base e no usuário, sem se fazer necessário aumentar a potência irradiada e o espectro.

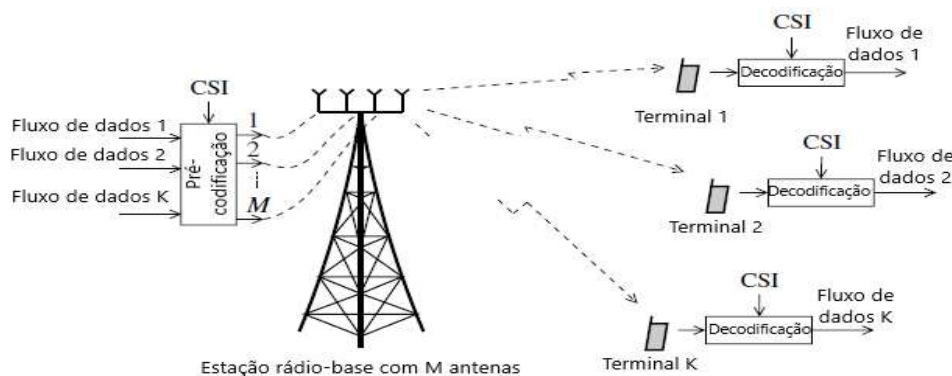
A ideia intuitiva por trás do MIMO ponto a ponto é a estação rádio base enviar um sinal, de valor vetorial, cujos componentes contêm pedaços distintos de informação. Esse sinal é multiplicado pela matriz do canal, que idealmente deve ser conhecida em ambas as pontas do enlace, para produzir o vetor dos sinais recebidos (MARZETTA, 2015). Para obter a matriz do canal, o transmissor envia para o receptor sinais pilotos pelo canal, conhecidos em ambas as pontas do enlace.

Fatores que limitam a implementação dessa versão do MIMO são problemas com

o ambiente de propagação, principalmente no caso de visada direta, o tempo gasto com pilotos para obter as informações do canal (*channel state information* - CSI), e a complexidade do equipamento do usuário. Além disso, de acordo com (MARZETTA, 2010), ganhos de multiplexação podem desaparecer perto dos limites da célula, onde os níveis dos sinais são baixos em relação à interferência ou em um ambiente de propagação que é insuficientemente dominado pelo espalhamento.

A segunda versão dos sistemas MIMO é conhecida como MIMO para múltiplos usuários (MU-MIMO) e, segundo (MARZETTA, 2016), a ideia por trás dele é de uma única estação rádio base atender uma multiplicidade de usuários usando os mesmos recursos de tempo e frequência. De fato, podemos pensar que o MU-MIMO é equivalente à configuração do MIMO ponto a ponto, diferindo apenas que, no lugar de ser um usuário equipado com K antenas, são K terminais de uma única antena, conforme a Figura 3.

Figura 3: Sistema MIMO de múltiplos usuários



Fonte: (Adaptado de Marzetta, 2016).

Aqui, tanto o transmissor quanto o receptor devem possuir CSI. No *uplink* (UL), que é quando os usuários transferem dados para a estação rádio base, a ERB deve conhecer os canais, e cada usuário deve conhecer sua taxa de transmissão permitida separadamente. No *downlink*, tanto a estação rádio base quanto os terminais devem possuir a CSI (MARZETTA, 2016). Essa obtenção é realizada também pelo envio de sinais pilotos pelo canal.

De acordo com (LARSSON *et al.*, 2014), MIMO para múltiplos usuários oferece grandes vantagens em relação ao MIMO ponto a ponto: funciona com terminais de única antena de baixo custo, não requer um ambiente de propagação rico em espalhamento e a alocação de recursos é simplificada pois cada terminal utiliza todos os recursos de tempo e frequência.

Porém, existem dois fatores que limitam seriamente a praticidade do MU-MIMO. Primeiro, podemos citar a necessidade de técnicas mais complexas de processamento de sinal - tanto para a ERB quanto para os usuários - para que valores satisfatórias de eficiência espectral sejam alcançados. Segundo, o tempo para obter CSI aumenta com o

número de antenas de serviços e com o número de usuários atendidos.

Já o *massive* MIMO pode ser considerado como uma versão do MU-MIMO onde a estação rádio base é equipada com um número muito maior de antenas em relação a quantidade de usuários servidos pela mesma. Com esse ganho de ordem de magnitude das antenas da ERB, altas taxas de capacidades de dados podem ser alcançadas. De acordo com (MARZETTA, 2010), mesmo com a estimação de um canal muito ruidoso, a adição de mais antenas na estação rádio base é sempre benéfica, e considerando um limite de antenas indo para o infinito, o ruído correlacionado e o desvanecimento rápido desaparecem.

Alguns benefícios dessa tecnologia, em relação às citadas anteriormente, que podem ser citados são: aumento da eficiência espectral, em 10 vezes ou mais, e simultaneamente proporcionar uma maior eficiência energética em termos de potência irradiada, redução da latência, maior confiabilidade, uso de componentes de baixo custo, dentre outras.

Para a quinta geração de comunicações móveis (5G), essa tecnologia é interessante pois atende os requisitos principais de aumento na capacidade, com maiores eficiências energética e espectral.

Porém, de acordo com (LARSSON *et al.*, 2014), enquanto *Massive* MIMO torna muitos problemas de pesquisa tradicionais irrelevantes, ele revela inteiramente novos problemas que precisam urgentemente de atenção: o desafio de fazer muitos componentes de baixo custo e baixa precisão trabalharem bem juntos, aquisição e sincronismo de terminais, exploração de graus de liberdade extras que surgem com o alto número de antenas e encontrar novos cenários de implementação. Além disso, há problemas relacionados a contaminação piloto e ao arranjo de antenas.

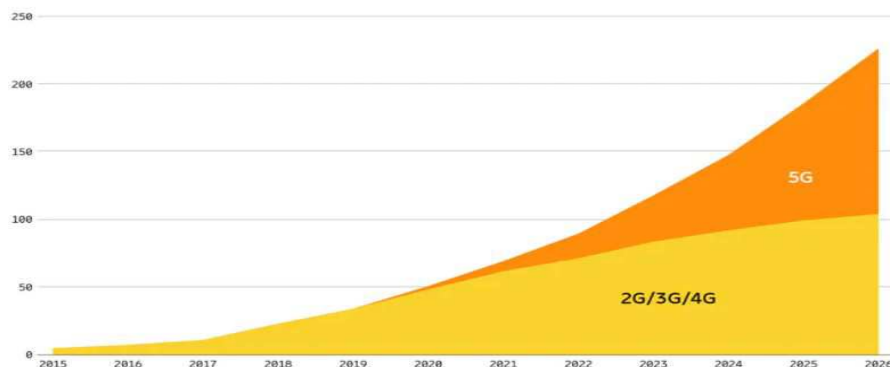
4 *Massive* MIMO

4.1 5G e o *Massive* MIMO

As redes de comunicação móvel sem fio exercem um papel cada vez mais importante no nosso dia a dia. Surgidas no início dos anos 1970, tiveram sua evolução dividida em gerações, indo da primeira geração de comunicações móveis (1G) até a quinta (5G). Ao longo dessas etapas, os aspectos de funcionamento, os serviços e a quantidade de usuários atendidos também foi se modificando, causando um aumento no tráfego de dados.

De acordo com dados divulgados pela Ericsson, estima-se que o tráfego de dados móveis chegará a até 226 exabytes (EB) por mês em 2026, com o 5G sendo responsável por mais da metade dos dados móveis, conforme a Figura 4. Isso se deve ao aumento das aplicabilidades desse tipo de rede, como transferência de voz e vídeo, jogos *online*, serviços de *streaming* e melhora na capacidade dos dispositivos.

Figura 4: Gráfico do tráfego de dados móveis (EB por mês) no intervalo de tempo de 2015-2026



Fonte: (Ericsson, 2021).

A quinta geração de comunicações móveis foi criada justamente com o intuito de suportar essa crescente demanda por dados móveis, e promover um aumento na área de cobertura com alta transmissão de dados, melhora na experiência do usuário, de modo a continuar a satisfazer as expectativas de qualidade de serviço (QoS - *Quality of Service*) (ADNAN, 2016).

Para atender os requisitos citados para a nova geração, a arquitetura deve ser heterogênea, com uma combinação de redes densificadas, uso de faixas antes inutilizadas de espectro em bandas de altas ou baixas frequências e técnicas que proporcionem aumento na eficiência espectral (PAPADOPOULOS *et al.*, 2016).

Ainda de acordo com (PAPADOPOULOS *et al.*, 2016), a densificação das células é solucionada com o uso de pequenas células. Em relação ao uso de novas faixas de

frequência, em (PRASAD *et al.*, 2017) tem-se que operações na faixa de ondas milimétricas (*mmWave*) trazem aumento na performance, sendo então a solução para esta alternativa. Já no caso de aumento de eficiência espectral, a solução está no uso de sistemas MIMO, com múltiplas antenas no receptor e no transmissor, mais precisamente, no *massive* MIMO (PAPADOPOULOS *et al.*, 2017).

Pequenas células, ondas milimétricas e *massive* MIMO são as três técnicas chaves que, ao atuar juntas, de acordo com (PAPADOPOULOS *et al.*, 2017), podem fornecer um alto ganho de performance por unidade de área exigido para atender esse aumento no tráfego de dados. A próxima seção levantará as características principais que justificam mais profundamente o uso da última tecnologia, o *massive* MIMO.

4.2 Visão geral do *Massive* MIMO

Como dito anteriormente, a alternativa encontrada para aumentar a eficiência espectral é fazer uso de sistemas de múltiplas antenas no transmissor e no receptor, mais especificamente, do *massive* MIMO. Introduzido por Marzetta (2010) e (2006), o *massive* MIMO se refere a sistemas em que a estação rádio base é equipada com um número muito grande de antenas, se comparado com o número de terminais ativos.

Ao implementar mais antenas na ERB, uma maior capacidade da rede é alcançada, ao mesmo tempo que também há uma elevação nas eficiências energética e espectral. Além disso, de acordo com (LU *et al.*, 2014), os efeitos do ruído descorrelacionado e do desvanecimento em pequena escala são eliminados e o número de usuários por célula é independente do tamanho da mesma. E, também, técnicas lineares simples de processamento de sinais, como pré-codificação e decodificação com filtro casado, são consideradas ótimas no *massive* MIMO.

Com um número excessivo de antenas de serviço, mais fluxos de dados são liberados para atender a mais usuários. Isso aumenta a confiabilidade do sistema por meio do uso da técnica de diversidade espacial, que fornece à tecnologia uma grande quantidade de graus de liberdade, que ajudam focalizar a energia em regiões de espaço cada vez menores, melhorando a performance e reduzindo a interferência e a potência de transmissão (LARSSON *et al.*, 2014). Essa melhora na confiabilidade chamados de ganho de diversidade.

De acordo com (MARZETTA, 2015), a tarefa central do *massive* MIMO é fazer com que cada usuário só receba a porção de dados destinada a ele, com mínima interferência dos outros fluxos de dados. Para isso, essa tecnologia faz uso de multiplexação espacial. O uso agressivo desse tipo de multiplexação leva a uma melhoria impressionante na capacidade da rede, minimizando a interferência devido aos múltiplos usuários, ao

direcionar o sinal com precisão na direção certa. A energia liberada é concentrada em pequenas zonas centradas no usuário (HASSAN; FERNANDO, 2017). Essa melhoria é, por vezes, denominada de ganho de multiplexação.

Como todos os usuários podem participar do ganho de multiplexação, as despendiosas implantações dos conjuntos de antenas são necessárias apenas no lado da ERB, o que economiza o custo de compartilhamento e permite que o usuário seja composto por equipamentos de baixa complexidade, geralmente com uma única antena. O meio de propagação minimamente afeta a performance dos sistemas *massive* MIMO devido ao uso de técnicas de diversidade (HASSAN; FERNANDO, 2017).

Outros benefícios incluem a simplificação da análise do esquema de agendamento dos terminais, devido ao fenômeno de endurecimento do canal e robustez do canal de desvanecimento em pequena escala. Além disso, é considerada uma tecnologia de menor impacto ambiental, pois como há toda uma técnica para que os feixes sejam mais direcionados, o nível de potência por *bit* entregue pode cair significativamente. Também há uma melhor performance para usuários localizados nos limites da célula (PAPADOPOULOS *et al.*, 2016).

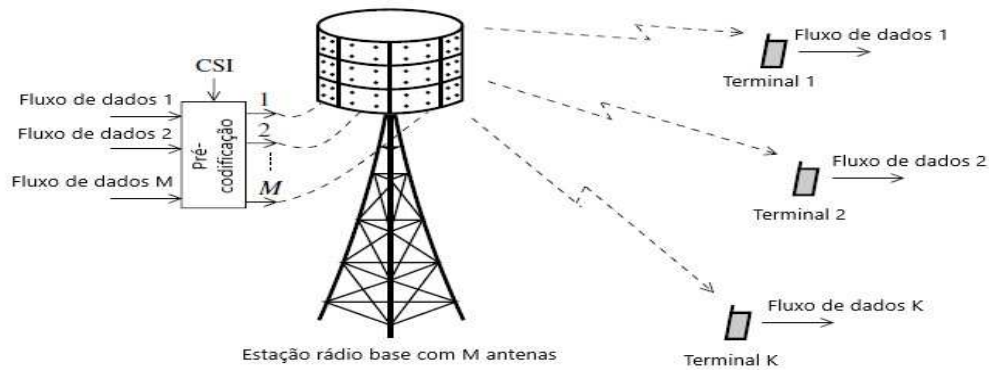
Os sistemas MIMO podem ser de uma ou múltiplas células. Além disso, os arranjos de antenas que compõem o sistema MIMO podem ser implementados de maneira co-localizada ou distribuída. Na arquitetura co-localizada, todas as antenas de serviço estão localizadas em uma área compacta, tendo como vantagem uma estrutura reduzida de rede de retorno de sinalização (*backhaul network*). Já nos casos de arquitetura distribuída, as antenas são localizadas ao longo de uma grande área. Essa configuração tem a habilidade de explorar, mais eficientemente, as técnicas de diversidade para combater o desvanecimento em larga escala (causado pelo sombreamento), oferecendo uma maior cobertura do que os sistemas co-localizados, porém com a robustez da rede de *backhaul* (NGO, *et al.*, 2017).

4.3 Funcionamento

Em relação ao funcionamento, a transferência de dados pode ocorrer por meio de duas operações, *downlink* e *uplink*. Na operação de *downlink*, a estação rádio base fica encarregada de transmitir diferentes fluxos de dados para cada usuário, conforme a Figura 5. Isso é feito, como dito anteriormente, por meio de multiplexação espacial. Para que ela seja realizada, o conjunto de antenas precisa conhecer a resposta em frequência do canal de propagação entre cada um dos seus elementos e cada um dos usuários. Essa informação sobre o canal (CSI) é usada no bloco de pré-codificação e é onde os fluxos de dados são mapeados em sinais que conduzem cada uma das antenas. Ao aumentar o número das mesmas, os feixes conseguem focalizar mais seletivamente os usuários (MARZETTA,

2015).

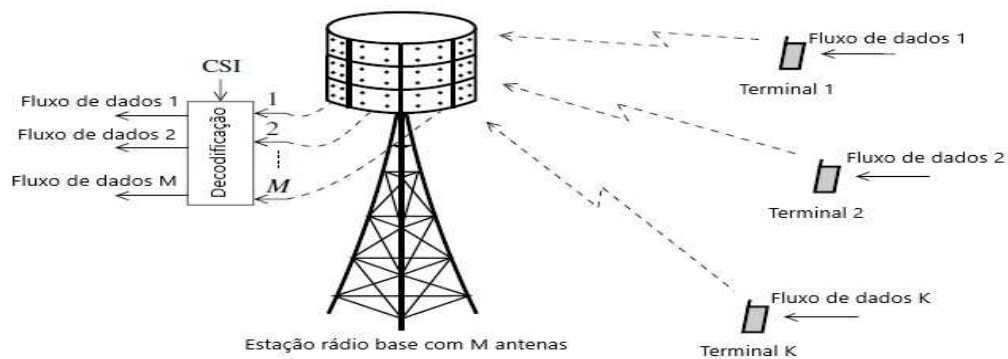
Figura 5: Sistema *Massive* MIMO na operação de *downlink*



Fonte: (Adaptado de Marzetta, 2016).

A operação de *uplink* no *massive* MIMO pode ser considerada o reverso da de *downlink*, conforme Figura 6. Aqui, os usuários transmitem fluxos de dados no mesmo instante de tempo e na mesma frequência. O conjunto de antenas recebe a soma de fluxos de dados, modificados pelos seus respectivos canais de propagação, e por meio da operação de decodificação, novamente fazendo uso de CSI, separa os sinais recebidos para produzir os fluxos de dados individuais (MARZETTA, 2015).

Figura 6: Sistema *Massive* MIMO na operação de *uplink*



Fonte: (Adaptado de Marzetta, 2016).

Das descrições acima, tem-se que o método de estimação do canal e as técnicas utilizadas para realizar os processos de pré-codificação e decodificação para a detecção do sinal são pontos de atenção na hora de estudar esses sistemas. Os tópicos a seguir tratarão desses temas.

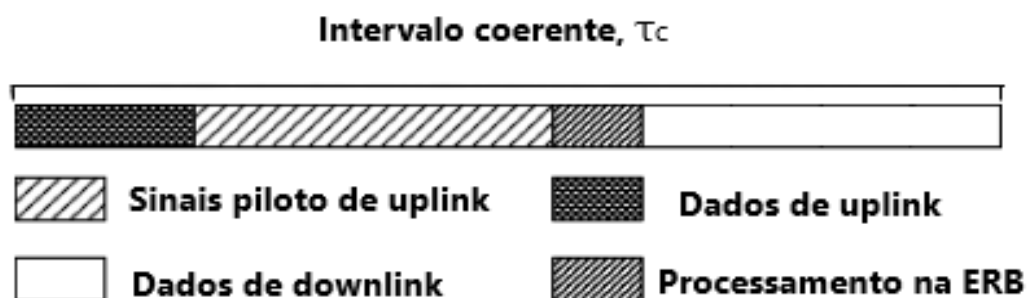
4.3.1 Estimação do canal

Conforme (SANGUINETTI *et al.*, 2019) e (LU *et al.*, 2014), a estação rádio base só consegue fazer uso do seu grande arranjo de antenas se ela tiver informações sobre o canal proveniente dos usuários. O recurso, seja tempo ou frequência, requisitado para estimação do canal nos sistemas MIMO é proporcional ao número de antenas transmissoras e é independente do número de antenas receptoras.

Se duplexação por divisão de frequência (FDD - *frequency division duplex*) é usada, ou seja, se *uplink* e *downlink* usam diferentes bandas de frequência, a CSI correspondente a cada uma delas é diferente. Na operação de *uplink*, a informação sobre o canal é obtida na ERB por meio do envio de sinais pilotos pelos usuários. O intervalo de tempo necessário para a transmissão de sinais pilotos no *uplink* é independente do número de antenas na ERB (LU *et al.*, 2014). Até o momento, nenhum impasse. Porém, para adquirir a CSI para a operação de *downlink* em sistemas FDD, um procedimento de duas etapas é realizado. Conforme (MARZETTA, 2016) os terminais descobrem o canal de *downlink* por meio de pilotos enviados pela estação rádio base, e comunicam a CSI estimada por meio de um canal de controle. Essa realimentação é bastante custosa. Além disso, como o tempo para a transmissão de pilotos é proporcional ao número de antenas transmissoras, para um número muito grande de antenas, como é no caso do *massive* MIMO, esse método se torna impraticável (LU *et al.*, 2014).

Já a estimação de canal usando duplexação por divisão de tempo (TDD - *time division duplex*) é mais fácil. Baseado no princípio da reciprocidade do canal (a resposta ao impulso entre quaisquer duas antenas é a mesma em ambas as direções), apenas a informação do canal no *uplink* precisa ser estimada (MARZETTA, 2016). Essa estimação do canal ocorre na duração de um intervalo coerente. Protocolos usando TDD são desenvolvidos, com as etapas e tempo de duração para a estimação, conforme a Figura 7.

Figura 7: Protocolo TDD para *massive* MIMO



Fonte: (Adaptado de Lu *et al.*, 2014).

Para este protocolo, considerando um ambiente de múltiplas células, todos os usuários enviam, ao mesmo tempo, sinais com dados no *uplink*. Logo após, os usuários enviam as sequências pilotos e as ERBs fazem uso das mesmas para estimar o canal para os usuários localizados nas células. A ERB, então, usa a CSI estimada para detectar esses dados de *uplink* para gerar vetores de *beamforming* para realizar a transmissão de dados no *downlink*. Devido à duração limitada do intervalo coerente, as sequências de sinais pilotos enviadas por usuários de outras células podem não ser ortogonais, causando o que chamamos de interferência piloto, que será abordado mais detalhadamente posteriormente.

4.3.2 Pré-codificação e Decodificação

O uso de processamento de sinais aplicados a esquemas de pré-codificação é de suma importância nos sistemas *Massive MIMO*, pois eles podem aumentar drasticamente a capacidade do sistema ao moldar corretamente o sinal e guiar todas as frentes de onda em direção a um lugar específico. Além disso, a aplicação de um esquema correto de pré-codificação na ERB permite que os usuários recebam suas respectivas informações, enquanto minimizam a interferência entre usuários (ARAÚJO *et al.*, 2016). Será mostrada a expressão da SNR para um dos tipos mais simples de pré-codificadores, o de filtro casado (MF - *matched filter*).

Para a explicação, vamos considerar um sistema de uma única célula, com a ERB equipada com M antenas atendendo a K terminais. No canal de *downlink*, a ERB transmite dados por cada antena, criando um vetor \mathbf{x}_d de dimensão $M \times 1$, no qual $E\{\|\mathbf{x}_d\|^2\} = 1$. Esse vetor é uma versão pré-codificada dos símbolos de dados. O sinal recebido no canal de DL é dado pela equação (3).

$$\mathbf{y}_d = \sqrt{\rho_d} \mathbf{G}^T \mathbf{x}_d + \mathbf{n}_d, \quad (3)$$

sendo \mathbf{n}_d é vetor do ruído, com distribuição Gaussiana de média zero e variância unitária, ρ_d é a potência transmitida e \mathbf{G} é a matriz $M \times N$ do canal. O operador transposto T é aplicado à mesma pois consideramos o princípio de reciprocidade do canal para protocolos TDD, onde a matriz do canal de DL é simplesmente a transposta da matriz de canal UL. A matriz do canal é dada pela equação (4).

$$\mathbf{G} = \mathbf{D}^{1/2} \mathbf{H}, \quad (4)$$

onde \mathbf{D} é uma matriz $K \times K$ cuja diagonal contém os coeficientes de desvanecimento em larga escala, e \mathbf{H} é uma matriz $K \times M$, com entradas sendo i.i.d. e contendo os coeficientes relacionados ao desvanecimento em pequena escala. Os coeficientes de desvanecimento em larga escala são normalizados de forma que os de pequena escala se tornem unitários.

O uso da pré-codificação por filtro casado implica matematicamente, em aplicar o transposto conjugado da matriz do canal, \mathbf{G}^H , chamado também de operador hermitiano. Para esse codificador, o sinal transmitido é dado pela equação (5).

$$\mathbf{x}_d = \frac{1}{\sqrt{\alpha}}(\mathbf{G}^H)^T \mathbf{s}_d, \quad (5)$$

onde \mathbf{s}_d é um vetor $M \times 1$ que denota a fonte de informação para cada usuário, $\alpha = \frac{T_r(\mathbf{G}\mathbf{G}^H)^{-1}}{K}$, o que normaliza a potência de x_d para 1. Com algumas manipulações, conforme (RUSSEK *et al.*, 2012), é possível obter a expressão para a SNR vista em (6).

$$SNR_{MF} = \frac{\rho_d \beta}{\rho_d + 1}, \quad (6)$$

onde $\beta = M/K$. Da equação (6), temos que, ao aumentar ρ_d , a $SNR_{MF} \rightarrow \beta$, o que reafirma que ao aumentar o número de antenas de serviço, para uma quantidade fixa de usuários, há um aumento na eficiência espectral (ARAUJO *et al.*, 2016).

Ainda de acordo com (ARAUJO *et al.*, 2016), quando assumimos reciprocidade entre os canais DL e UL, o uso de técnicas de combinação do receptor e pré-codificação no transmissor têm uma relação bem forte, o que é chamado de dualidade *uplink-downlink*. Isso quer dizer que ótima pré-codificação na transmissão equivale a ótima combinação no receptor.

Outros pré-codificadores são bastante empregados nos sistemas *massive* MIMO. Alguns exemplos são: pré-codificador de forçagem a zero (ZF - *zero forcing*), mostrado em (RUSSEK *et al.*, 2012) e (ARAUJO *et al.*, 2016), forçagem a zero regularizada (RZF - *regularized zero forcing*), mostrado em (LU *et al.*, 2014) e mínimo erro quadrático médio (MMSE - *minimum mean squared error*), mostrado em (MARZETTA, 2016). Para o caso de múltiplas células, pré-codificadores lineares também podem ser empregados, conforme resultados vistos em (LU *et al.*, 2014).

Já a decodificação é realizada no *uplink* para recuperar o sinal transmitido. De acordo com (LU *et al.*, 2014), detectores de sinal lineares de baixa complexidade, como MF, ZF e MMSE são candidatos práticos para sistemas *massive* MIMO.

O detector de filtro casado funciona de maneira similar ao pré-codificador de mesmo nome. Aqui, na equação que define o sinal recebido é usada a matriz do canal \mathbf{G} , e não sua transposta. Conforme (LU *et al.*, 2014), tem-se que MMSE se equipara ao MF, em cenários com poucas antenas, especialmente quando há pouca interferência entre as células.

4.4 Desafios

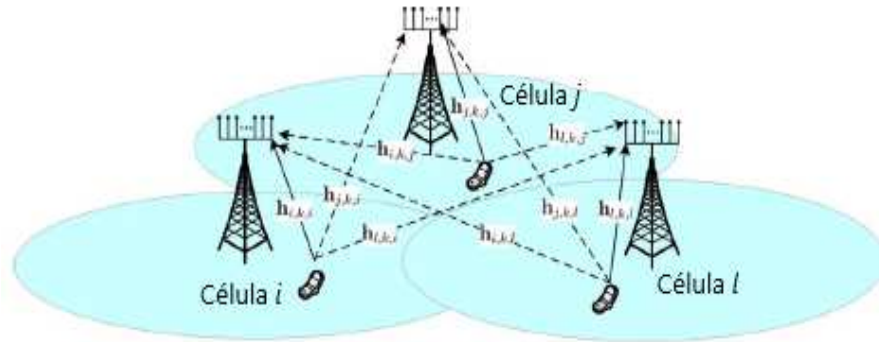
Desde os primeiros estudos até o estado atual dos sistemas *Massive* MIMO, muitos problemas foram apontados, tanto no funcionamento do sistema, quanto no seu processo de popularização. Como citado anteriormente, *Massive* MIMO traz novos problemas, como em relação ao funcionamento dos componentes, a exploração dos novos graus de liberdade e os novos cenários de implementação. Nessa seção serão discutidos dois problemas principais que incluem algumas dessas áreas de impasse. São eles contaminação piloto e arranjos de antena. Também é explanada algumas soluções presentes na literatura para esses problemas.

4.4.1 Contaminação Piloto

Quando um sinal se propaga entre o transmissor e o receptor, ele experimenta os efeitos de vários fatores que o degradam. Por isso, ter informações sobre o canal tanto no *uplink* como no *downlink* é crucial para que a transmissão seja bem sucedida, mesmo nas mais variadas condições de canal. Por isso, sequências de treinamento são desenvolvidas para otimizar a obtenção das informações sobre o canal. No *massive* MIMO, sequências pilotos são usadas para estimar o canal em ambas as direções (HASSAN; FERNANDO, 2017).

Como discutido anteriormente, o uso de TDD no *Massive* MIMO é bem mais comum, devido a complexidade para estimação do canal quando usamos FDD. Como consta na Figura 7, um intervalo de tempo é reservado para a transmissão de sinais pilotos no *uplink* para estimar os canais. Idealmente, essas sequências devem ser ortogonais. Porém, o número de sequências pilotos ortogonais é limitado pelo tempo coerente do canal. Em ambientes de alta mobilidade, o número de sequências disponíveis pode ser facilmente atingido antes de todos os usuários terem uma sequência designada para cada um deles. Portanto, a reutilização de sequências entre as células é necessária (ARAÚJO *et al.*, 2016). Essa atribuição de sequências pilotos idênticas em células vizinhas causa interferência entre elas, resultando no que chamamos de contaminação piloto (LU *et al.*, 2014). A situação de contaminação piloto, para o caso do *uplink* é mostrado na Figura 8.

Figura 8: Contaminação piloto na operação de *uplink*



Fonte: (Adaptado de Lu *et al.*, 2014).

Quando há essa reutilização de sequências piloto, o vetor de estimação do sinal em qualquer célula é igual a soma dos canais de todos os usuários das células vizinhas e da própria célula. À medida que o número de células interferentes cresce, o problema também cresce, de forma exponencial, eventualmente causando mal funcionamento do sistema (HASSAN; FERNANDO, 2017).

Algumas soluções propostas para esse problema, de acordo com (HASSAN; FERNANDO, 2017), são: métodos de estimação de canal que otimizam a quantidade de sequências piloto necessárias, métodos com fator ótimo de reutilização de pilotos, métodos cooperativos, onde uma ERB tenta encontrar pilotos que também servem para a ERB vizinha, dentre outros.

4.4.2 Arranjos de antenas

Existem vários problemas práticos relacionados aos arranjos de antenas que são relevantes para o *Massive MIMO* (LU *et al.*, 2014). Primeiro, temos os problemas em relação às configurações e à implementação dos arranjos. Diferentes tipos de arranjos de antena resultam em diferentes características de canal, causando um grande impacto na performance do sistema. Configurações mais populares como arranjos planares e circulares possuem uma grande deficiência, pois o feixe só se propaga na horizontal, o que impede essas configurações de darem conta da necessidade de uma maior capacidade no sistema. Logo, arranjos de antenas com radiação em 3D são utilizados, como arranjos cilíndricos e esféricos. Com eles, se consegue uma maior diretividade e feixes mais focalizados. O arranjo esférico possui ainda mais vantagens que o cilíndrico, pois esse último é limitado a propagação em visada direta, não podendo ser usadas em altos prédios (BENZAGHTA; RABIE, 2021).

O segundo problema é em relação ao acoplamento mútuo entre as antenas do arranjo. Esse efeito de acoplamento mútuo pode ser ignorado quando as antenas estão

separadas, umas das outras, por uma distância confortável, geralmente essa distância é de meio comprimento de onda. Como os arranjos em sistemas *massive* MIMO são posicionadas de forma compacta, o acoplamento não pode ser ignorado (LU. *et al.*, 2014). Esse fenômeno resulta em uma alta correlação entre as antenas, o que limita significativamente a performance do sistema, em termos de eficiências energética e espectral (BENZAGHTA; RABIE, 2021).

Por fim, o aumento no custo computacional e em *hardware* devido ao uso de grandes conjuntos de antenas deve ser considerado (LU. *et al.*, 2014). A razão para este aumento é que o número de redes de rádio frequência (RFC - *radio frequency chains*), é associado com o número de antenas no sistema. Para solucionar esse problema, métodos de seleção de antenas são propostos, sendo usados para implementar menos RFCs do que o número de antenas disponíveis, selecionando cuidadosamente uma certa quantidade de antenas do arranjo. Esse método ainda não é ótimo pois, apesar da redução no custo, é impraticável fazer a melhor seleção das antenas, devido ao custo computacional (BENZAGHTA; RABIE, 2021).

4.5 Pesquisas Atuais

De acordo com (BJÖRNSON *et al.*, 2019), *Massive* MIMO se tornou realidade em 2018, quando estações rádio base com 64 cadeias de transceptores totalmente digitais foram comercializados em diversos países. Muitos problemas foram minimizados, senão solucionados, abrindo portas para novas descobertas e aplicações.

O desenvolvimento do *massive* MIMO está agora nas mãos dos departamentos de produtos de empresas como Ericsson, Nokia, Huawei, etc. Muitos algoritmos foram criados em comunicação, processamento de sinal e otimização e agora fica a expectativa por saber quais funcionarão bem na prática. Enquanto os algoritmos existentes não forem testados, é complicado prever quais são os próximos passos no desenvolvimento de mais algoritmos. As próximas pesquisas em relação ao MIMO devem ser para dar suporte a implementação dos algoritmos existentes, considerando-os em condições práticas. Também, é importante realizar pesquisas que consideram novas aplicações para arranjos de antenas que possam construir o caminho para além do 5G (BJÖRNSON *et al.*, 2019).

Em (BJÖRNSON *et al.*, 2019), são elencadas cinco dessas novas aplicações para arranjos de antenas. São elas: Arranjos de abertura extremamente larga (ELAA - *Extremely Large Aperture Array*), *Massive* MIMO holográfico, Posicionamento em seis dimensões, Radares MIMO de larga escala e *Massive* MIMO inteligente.

5 Conclusões

Considerando o crescimento na demanda de dados móveis, as novas aplicabilidades para essas redes e o advento da quinta geração de comunicações móveis, o presente trabalho teve como objetivo fazer um apanhado de uma das tecnologias das consideradas como pilares para o desenvolvimento e implementação do 5G, o *Massive* MIMO.

Percebeu-se que quando a estação rádio base é equipada com um número muito grande de antenas em comparação com o número de usuários atendidos, muitas vantagens são alcançadas. Algumas delas são: um sistema mais confiável, com uma maior capacidade, devido ao ganho de diversidade, o que também ajuda a focalizar o sinal, reduzindo a interferência e economizando na potência de transmissão.

Além disso, ainda há o ganho de multiplexação proporcionado pelo uso de multiplexação espacial para focalizar o sinal enviado em direção ao usuário certo. Os efeitos do ruído descorrelacionado e do desvanecimento em pequena escala são eliminados e técnicas lineares simples de pré-codificação e decodificação, como filtro casado, se tornam ótimas para esses sistemas.

Porém, problemas como contaminação piloto e relacionados ao arranjo de antenas estão presentes nesse sistema, sendo objeto de pesquisa até os dias de hoje.

Por fim, conclui-se que o estudo de sistemas de múltiplas antenas ainda tem um grande futuro. No 5G, deve-se focar as pesquisas para fase de implementação dos algoritmos existentes para o *massive* MIMO em condições práticas. O estudo de novas aplicações que podem construir novos caminhos para além do 5G também devem ser consideradas.

Referências Bibliográficas

- ADNAN, Noor Hidayah Muhamad; RAFIQU, Islam Md; ALAM, AHM Zahirul. Massive MIMO for fifth generation (5G): Opportunities and challenges. In: 2016 International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE). IEEE, 2016. p. 47-52.
- ARAUJO, Daniel C. et al. Massive MIMO: survey and future research topics. *Iet Communications*, v. 10, n. 15, p. 1938-1946, 2016.
- BENZAGHTA, Mohamed; RABIE, Khaled M. Massive MIMO systems for 5G: A systematic mapping study on antenna design challenges and channel estimation open issues. *IET Communications*, 2021.
- BJÖRNSSON, Emil et al. Massive MIMO is a reality—What is next?: Five promising research directions for antenna arrays. *Digital Signal Processing*, v. 94, p. 3-20, 2019.
- BJÖRNSSON, Emil; HOYDIS, Jakob; SANGUINETTI, Luca. Massive MIMO networks: Spectral, energy, and hardware efficiency. *Foundations and Trends in Signal Processing*, v. 11, n. 3-4, p. 154-655, 2017.
- CHANDRASEKARAN, Nirmal. Diversity Techniques in Wireless Communication Systems. *Wireless Communication Technologies*, spring, p. 1-8, 2005.
- ERICSSON. *Mobile data traffic outlook*. 2021. Acessado em 30 de abril de 2021. Disponível em: <https://www.ericsson.com/en/mobility-report/dataforecasts/mobile-traffic-forecast>
- HASSAN, Noha; FERNANDO, Xavier. Massive MIMO wireless networks: An overview. *Electronics*, v. 6, n. 3, p. 63, 2017.
- LU, Lu et al. An overview of massive MIMO: Benefits and challenges. *IEEE journal of selected topics in signal processing*, v. 8, n. 5, p. 742-758, 2014.
- MARZETTA, Thomas L. *Fundamentals of massive MIMO*. Cambridge University Press, 2016.
- MARZETTA, Thomas L. How much training is required for multiuser MIMO?. In: 2006 fortieth asilomar conference on signals, systems and computers. IEEE, 2006. p. 359-363.
- MARZETTA, Thomas L. Massive MIMO: an introduction. *Bell Labs Technical Journal*, v. 20, p. 11-22, 2015.
- MARZETTA, Thomas L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas. *IEEE transactions on wireless communications*, v. 9, n. 11, p. 3590-3600, 2010.
- MUMTAZ, Shahid; RODRIGUEZ, Jonathan; DAI, Linglong. *MmWave massive MIMO: a paradigm for 5G*. Academic Press, 2016.
- NGO, Hien Quoc et al. Cell-free massive MIMO versus small cells. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 16, n. 3, p. 1834-1850, 2017.
- PAPADOPOULOS, Haralabos et al. Massive MIMO technologies and challenges towards 5G. *IEICE Transactions on Communications*, v. 99, n. 3, p. 602-621, 2016.
- PRASAD, KNR Surya Vara; HOSSAIN, Ekram; BHARGAVA, Vijay K. Energy efficiency

in massive MIMO-based 5G networks: Opportunities and challenges. *IEEE Wireless Communications*, v. 24, n. 3, p. 86-94, 2017.

PROAKIS, John G. et al. *Communication systems engineering*. New Jersey: Prentice Hall, 1994.

RAPPAPORT, Theodore S. *Comunicações sem fio: princípios e práticas*. Pearson Prentice Hall, 2009.

RUSEK, Fredrik et al. Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays. *IEEE signal processing magazine*, v. 30, n. 1, p. 40-60, 2012.

SANGUINETTI, Luca; BJÖRNSON, Emil; HOYDIS, Jakob. Toward massive MIMO 2.0: Understanding spatial correlation, interference suppression, and pilot contamination. *IEEE Transactions on Communications*, v. 68, n. 1, p. 232-257, 2019.

SKLAR, Bernard. Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems. I. Characterization. *IEEE Communications magazine*, v. 35, n. 7, p. 90-100, 1997.