

Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Engenharia Eletrônica

**Feixes em redes de múltiplas entradas e múltiplas saídas livres de células: análise de técnicas de seleção e formação de feixes para melhoria da capacidade de canal e redução de interferência**

Autor: Wissam Melo Abou Al Izz  
Orientador: Prof. Dr. Daniel Costa Araújo

Brasília, DF  
2023





Wissam Melo Abou Al Izz

**Feixes em redes de múltiplas entradas e múltiplas saídas  
livres de células: análise de técnicas de seleção e  
formação de feixes para melhoria da capacidade de canal  
e redução de interferência**

Monografia submetida ao curso de graduação  
em Engenharia Eletrônica da Universidade de  
Brasília, como requisito para obtenção do Tí-  
tulo de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Dr. Daniel Costa Araújo

Brasília, DF

2023

---

Wissam Melo Abou Al Izz

Feixes em redes de múltiplas entradas e múltiplas saídas livres de células: análise de técnicas de seleção e formação de feixes para melhoria da capacidade de canal e redução de interferência/ Wissam Melo Abou Al Izz. – Brasília, DF, 2023-59 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Costa Araújo

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA , 2023.

1. Maximum Ratio Transmission. 2. Zero-Forcing. I. Prof. Dr. Daniel Costa Araújo. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Feixes em redes de múltiplas entradas e múltiplas saídas livres de células: análise de técnicas de seleção e formação de feixes para melhoria da capacidade de canal e redução de interferência

CDU 02:141:005.6

---

Wissam Melo Abou Al Izz

**Feixes em redes de múltiplas entradas e múltiplas saídas  
livres de células: análise de técnicas de seleção e  
formação de feixes para melhoria da capacidade de canal  
e redução de interferência**

Monografia submetida ao curso de graduação  
em Engenharia Eletrônica da Universidade de  
Brasília, como requisito para obtenção do Tí-  
tulo de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 12 de abril de 2023:

---

**Prof. Dr. Daniel Costa Araújo**  
Orientador

---

**Prof. Dr. Sébastien Roland Marie  
Joseph Rondineau**  
Convidado 1

---

**Prof. Dr. Marcelino Monteiro de  
Andrade**  
Convidado 2

Brasília, DF  
2023



# Agradecimentos

Ao professor Daniel Araújo Costa, por ter sido meu orientador e ter desempenhado tal função com dedicação e amizade, me auxiliando em momentos complexos que surgiram durante a realização deste trabalho.

Aos meus pais Thais Melo dos Santos e Samer Fawzi Abou Al Izz, por todo o apoio e pela ajuda, que muito contribuíram e compreenderam a minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho.

Aos meus irmãos, pelo companheirismo, pela cumplicidade e pelo apoio em todos os momentos delicados da minha vida.

À Universidade de Brasília, essencial no meu processo de formação profissional, pela dedicação, e por tudo o que aprendi ao longo dos anos do curso.

Por fim, gostaria de agradecer ao colega Gabriel Borges Pinheiro e a todos que participaram, direta ou indiretamente do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, enriquecendo o meu processo de aprendizado.





*“Demore o tempo que for para decidir o que você quer da vida,  
e depois que decidir não recue ante nenhum pretexto,  
porque o mundo tentará te dissuadir.  
(Trecho do livro "Assim Falou Zaratustra", de Friedrich Nietzsche)*



# Resumo

O termo de múltiplas entradas e múltiplas saídas em abundância e livre de células é definido por uma rede não dividida espacialmente, que consiste em pontos geograficamente distribuídos, atendendo um conjunto de usuários que residem na área. Com uma rede de antenas muito maior que a de usuários, é possível formar feixes para uma transmissão com maior qualidade. Na formação de feixes, considera-se todo o processamento espacial que ocorre no transmissor com técnicas como a taxa máxima de transmissão e anular a interferência de multiusuário chamado de forçar a zero. No estudo, busca-se melhorar a capacidade diminuindo a interferência por métodos para a seleção dos feixes que serão transmitidos para cada usuário, sendo pela distância do usuário a estação base ou através da análise de dados por meio da inteligência artificial. Para gerar a resposta ao canal, foram utilizados diferentes códigos como o simulador HermesPy para gerar dados mais realistas para a análise.

**Palavras-chaves:** Cell-Free mMIMO, formação de feixe, Forçar a zero, Taxa máxima de transmissão, Eficiência Espectral.



# Abstract

The term "cell-free massive multiple-input multiple-output" is defined as a non-spatially divided network consisting of geographically distributed points serving a group of users in an area. By using an array of antennas that is much larger than the number of users, it is possible to create beams that allow for higher quality transmission. In beamforming, all the spatial processing that occurs at the transmitter is taken into account, using techniques such as maximum ratio transmission and interference nulling, called zero-forcing multi-user interference cancellation. The study aims to improve capacity by reducing interference through methods such as selecting beams to be transmitted to each user based on the distance from the user to the base station or by using artificial intelligence to analyze data. To generate the channel response, different codes, such as the HermesPy simulator, were used to produce more realistic data for analysis.

**Key-words:** Cell-Free mMIMO, Beamforming, Zero-forcing, Maximum Ratio Transmission, Spectral Efficiency.



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Representação visual da taxa de transferência da área, Fonte: (BJÖRN-SON; HOYDIS; SANGUINETTI, 2017) . . . . .	26
Figura 2 – Formação de feixe, Fonte:(PERSON, 2019) . . . . .	29
Figura 3 – Sistema mMIMO Fonte:(BJÖRN-SON; HOYDIS; SANGUINETTI, 2017)	30
Figura 4 – Sistema CF-mMIMO Fonte:(INTERDONATO, 2020) . . . . .	31
Figura 5 – Representação gráfica do tensor $H_{UE \times BS \times antena}$ . . . . .	34
Figura 6 – Vetor direcional Fonte:(RAHIM et al., 2007) . . . . .	35
Figura 7 – Ambiente de simulação 1 . . . . .	39
Figura 8 – Método de seleção pelo limite de distância . . . . .	40
Figura 9 – Ambiente 1 utilizando o critério da distância para a seleção dos feixes .	41
Figura 10 – Análise da BS (triângulo preto) 0 pelo <i>k-means</i> , separando os UEs em grupos (bolas coloridas) . . . . .	41
Figura 11 – Análise da BS (triângulo preto) 7 pelo <i>k-means</i> , separando os UEs em grupos (bolas coloridas) . . . . .	41
Figura 12 – Ambiente agrupado com <i>K-Means</i> . . . . .	43
Figura 13 – Gráfico MRT no canal não estruturado . . . . .	46
Figura 14 – Gráfico ZF no canal não estruturado . . . . .	46
Figura 15 – Comparando os precodificadores em canais não estruturados . . . . .	47
Figura 16 – Gráfico MRT no canal estruturado . . . . .	47
Figura 17 – Gráfico ZF no canal estruturado . . . . .	47
Figura 18 – Comparando os precodificadores em canais estruturados . . . . .	48
Figura 19 – Comparando sem e com limitação de distância com MRT em um canal não estruturado . . . . .	48
Figura 20 – Comparando sem e com limitação de distância com MRT em um canal estruturado . . . . .	48
Figura 21 – Comparando sem e com limitação de distância com ZF em um canal não estruturado . . . . .	49
Figura 22 – Comparando sem e com limitação de distância com ZF em um canal estruturado . . . . .	49
Figura 23 – Canal não estruturado utilizando o MRT e o método <i>K-Means</i> . . . . .	49
Figura 24 – Canal não estruturado utilizando o ZF e o método <i>K-Means</i> . . . . .	50
Figura 25 – Canal gerado no HermesPy utilizando sem critério de seleção . . . . .	54
Figura 26 – Canal gerado no HermesPy limitando a distância de transmissão . . . . .	55
Figura 27 – Canal gerado no HermesPy e utilizando o método <i>KMeans</i> . . . . .	55
Figura 28 – Vista superior dos ambientes com visão da área de cobertura de uma BS	56





# Lista de tabelas

Tabela 1 – Características dos ambientes de simulação . . . . .	39
Tabela 2 – Valores utilizados para a simulação do Ambiente 1 . . . . .	45
Tabela 3 – Valores utilizados para a simulação do Ambiente 2 . . . . .	53



# Lista de abreviaturas e siglas

3GPP	Projeto de parceria de 3 <sup>a</sup> geração
AP	Ponto de Acesso
BS	Estação Base
CDF	Função Distribuição Acumulada
CF-mMIMO	Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas em abundância e Livre de Células
CPU	Unidade de Processamento Central
CRAN	Rede de Acesso de Rádio Centralizado
CSI	Estado de Informação do Canal
DoA	Ângulo de Partida
LTE	Evolução a Longo Termo
MIMO	Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas
mMIMO	Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas massivas
MRT	Taxa Máxima de Transmissão
SDMA	Múltiplos Acessos Divididos Espacialmente
SE	Eficiência Espectral
SEc	Eficiência Espectral por célula
TDD	Duplexação Dividida por Tempo
UE	Equipamento do Usuário
ZF	Forçar a Zero



# Lista de símbolos

$b$	Número de estações bases
$B$	Largura de Banda
$C$	Capacidade de canal
$d$	Distância entre UE e a BS
$f$	Frequência
$gap$	Distância de uma estação base a outra do método de Monte Carlo
$h$	Resposta ao impulso do canal
$H$	Matriz de canais
$l$	Índice da antena
$mc$	Número de execuções para a aplicação
$n$	Número de antenas
$N$	Número máximo de antenas
$N_0$	Ruído branco
$p$	Potência transmitida a um UE
$P$	Potência da BS
$Q$	Matriz diagonal $l \times l$
$tx_A$	Taxa de transferência na área
$u$	Número de usuários
$w$	Precodificação
$W$	Matriz de feixes
$\alpha$	Potência que uma BS fornece a um UE
$\beta$	Perda de ganho devido a $d$
$\lambda$	Comprimento de onda
$\sigma$	Ruído
$\phi$	Ângulo azimutal



# Sumário

<b>I</b>	<b>INTRODUÇÃO E CONCEITOS</b>	<b>23</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>24</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>25</b>
1.1.1	Objetivos específicos	25
<b>2</b>	<b>CONTEXTUALIZAÇÃO DO CF-MMIMO</b>	<b>26</b>
<b>2.1</b>	<b>MIMO</b>	<b>27</b>
2.1.1	<i>Beamforming</i>	28
<b>2.2</b>	<b>Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas em abundância (mMIMO)</b>	<b>28</b>
<b>2.3</b>	<b>Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas em abundância e Livre de Células (CF-mMIMO)</b>	<b>30</b>
<b>3</b>	<b>MODELO DE CANAL</b>	<b>33</b>
<b>3.1</b>	<b>Canal não estruturado</b>	<b>33</b>
<b>3.2</b>	<b>Canal estruturado</b>	<b>34</b>
<b>3.3</b>	<b>Canal Estruturado baseado na Norma 3GPP TR38.901</b>	<b>35</b>
<b>3.4</b>	<b>Precodificador</b>	<b>35</b>
3.4.1	Taxa Máxima de Transmissão - MRT	36
3.4.2	Forçar a Zero - ZF	37
<b>4</b>	<b>MÉTODOS DE SELEÇÃO DE FEIXES</b>	<b>39</b>
<b>4.1</b>	<b>Ambiente</b>	<b>39</b>
<b>4.2</b>	<b>Limite de distância</b>	<b>40</b>
<b>4.3</b>	<b>Clusterização baseada Aprendizado de Máquina</b>	<b>40</b>
4.3.1	Conceito	40
<b>II</b>	<b>SIMULAÇÃO</b>	<b>44</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADO E DISCUSSÕES</b>	<b>45</b>
<b>5.1</b>	<b>Ambiente 1</b>	<b>45</b>
5.1.1	Resultados	45
5.1.2	Discussões	50
5.1.2.1	Sem critério de seleção de feixes	50
5.1.3	Distância do UE a BS como critério de seleção	51
5.1.4	<i>K-Means</i>	53
<b>5.2</b>	<b>Ambiente 2</b>	<b>53</b>

5.2.1	Resultados . . . . .	53
<b>5.3</b>	<b>Discussões . . . . .</b>	<b>54</b>
5.3.1	Sem critérios de seleção . . . . .	54
5.3.2	Limite de distância . . . . .	56
5.3.3	<i>K-Means</i> . . . . .	56
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>57</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>58</b>



# Parte I

## Introdução e Conceitos

# 1 Introdução

Com o desenvolvimento dos meios de de comunicação, a conexão sem fio foi importante devido á possibilidade de transmitir e receber dados sem a necessidade de cabos. Ademais, a conexão sem fio, utilizada nos sistemas de gerações de comunicação móveis trouxe um avanço na automação industrial e em setores variados. Apenas nos últimos 10 anos, foi visto uma grande evolução dos serviços sem fio, usados diariamente graças aos avanços nas pesquisas de gerações móveis, onde acabou surgindo o conceito de múltiplas entradas e múltiplas saídas em abundância e livre de células (CF-mMIMO).

O CF-mMIMO veio de uma evolução de fatores. Um fator se dá pela multiple-  
xação espacial, onde é possível atender vários usuários separando-os no domínio espacial (INTERDONATO, 2020), com a estação base (BS) com mais antenas que usuários no espaço tempo sendo possível criar feixes para o atendimento dos equipamento do usuário (UE) com maior qualidade (MARZETTA, 2010).

O CF-mMIMO é definido como uma rede sem células que consiste em pontos de acesso (AP) distribuídos geograficamente e que atendem um conjunto de equipamentos de usuários (UEs) que residem na área. Cada AP é conectado a uma unidade central de processamento (CPU) através de uma arquitetura de redes chamada de *link fronthaul*. A CPU é responsável pela cooperação com o AP para atender aos UEs (GUNNARSSON et al., 2020).

Atualmente, existe projetos que buscam aplicar o CF-mMIMO no mundo real como a empresa de tecnologia Ericsson, a qual está desenvolvendo antenas do tamanho de uma pequena caixa de fósforos, analisando como criar antenas tão pequenas e flexíveis que possam ser integradas a uma fita adesiva. Chamada de *Radio Stripes*, eles podem fornecer conectividade verdadeiramente onipresente em determinadas áreas (ERNFORS, 2019).

Com isso, é notável a importância deste tópico neste trabalho, onde será estudado e analisado o sistema de comunicação considerando transmissão e recepção, com diferentes abordagens no processo de *beamforming*.

A formação destes feixes, chamado de *beamforming*, em termos mais gerais, considera todo o processamento espacial que ocorre no transmissor. Na formação de feixe único, o mesmo sinal é emitido de cada uma das antenas de transmissão com peso de fase e ganho apropriados, de modo que a potência do sinal seja maximizada na entrada do receptor (JR; LOZANO, 2018). O benefício da formação de feixe é aumentar o ganho do sinal recebido, fazendo com que os sinais emitidos de diferentes antenas se somem construtivamente, reduzindo o efeito de desvanecimento do multipercurso.

Para gerar uma resposta ao canal mais realista para a formação dos feixes foi utilizado um simulador através de algumas fórmulas matemáticas e do simulador HermesPy (ADLER; KRONAUER; BARRETO, 2022), pois este consegue gerar dados de canal mais realistas para estudos de comunicações sem fio. HermesPy é capaz de simular diversos cenários de canal, incluindo multipercurso, sombreamento, desvanecimento, ruído e outros efeitos, com base em modelos matemáticos e estatísticos de propagação de sinal (BJÖRNSON; SANGUINETTI, 2021).

Com o significativo aumento no número de BS em sistemas MIMO sem células (*cell-free*), observamos uma mudança na arquitetura que agora se concentra no usuário, em vez da estação base, como era comum nos sistemas até a 5ª geração (5G). Portanto, torna-se essencial determinar qual agrupamento (conhecido tecnicamente como "*cluster*") de estações base o usuário se conectará, dentre todas as estações base disponíveis na rede.

Assim que o agrupamento das estações base (BSs) for estabelecido, torna-se necessário calcular o *beamforming* (formação de feixes), que será responsável por filtrar o sinal espacialmente, contribuindo para a redução da interferência entre múltiplos usuários. Neste trabalho, foi considerado a taxa máxima de transmissão (MRT) e o forçar a zero (ZF) como métodos de formação de feixe.

## 1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é desenvolver e implementar um método eficiente de agrupamento das estações base para os usuários.

### 1.1.1 Objetivos específicos

- Implementar solução de formação de feixe com MRT e ZF;
- Implementar métodos de seleção de feixe limitando a distância da BS e aplicando a classe *Kmeans*;
- Avaliar capacidade do sistema *cell-free* MIMO levando em consideração diferentes cenários.

## 2 Contextualização do CF-mMIMO

As redes móveis foram originalmente projetadas para comunicações de voz sem fio, mas são as transmissões de dados sem fio que dominam hoje em dia. O vídeo é responsável pela maior parte do tráfego em redes sem fio e é também o principal impulsionador do aumento previsto do tráfego (PEPPER, 2013). Para analisarmos a eficiência destes sistemas é necessário um indicador, sendo assim, a taxa de transferência da área ( $tx_A$ ) avalia o rendimento da área sendo uma métrica altamente relevante das redes móveis contemporâneas e futuras (BJÖRNSON; HOYDIS; SANGUINETTI, 2017). É medido em  $[\frac{bit}{s.km^2}]$  e pode ser modelado usando a seguinte fórmula:

$$tx_A = B.D.SEc \quad (2.1)$$

onde  $B$  é a largura de banda,  $D$  é a densidade média de células e  $SEc$  é a eficiência espectral ( $SE$ ) por célula, podemos representar este cálculo por como um volume de uma caixa como na Figura 1.

O  $SE$  é a quantidade de informação que pode ser transferida por segundo em 1 Hz de largura de banda.

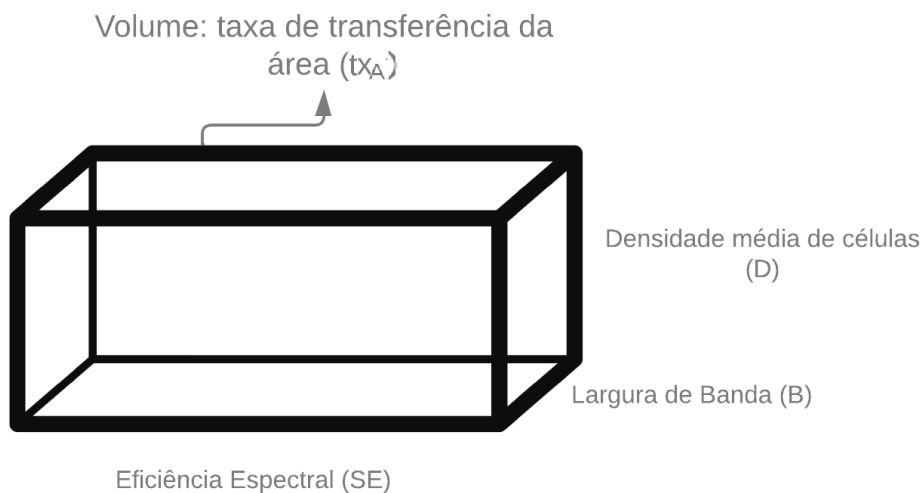


Figura 1 – Representação visual da taxa de transferência da área,  
Fonte: (BJÖRNSON; HOYDIS; SANGUINETTI, 2017)

Com isso, podemos inferir que para aumentar  $tx_A$  temos as seguintes possibilidades:

- Aumentar a largura de banda;
- Aumentar a rede alocando mais BS por  $km^2$ ;

- Melhorar o SEc.

Aumentar largura de banda pode parecer a solução mais plausível para aumentar o rendimento. No entanto, o espectro é um recurso limitado, compartilhado globalmente entre diferentes tecnologias e, portanto, bastante dispendioso. Recursos de pouca frequência estão disponíveis abaixo de 6 GHz.

Aumentando  $D$  implica encolher as células implantando mais estações base (BS) na rede. Esta abordagem tem sido explorada agressivamente em nas últimas décadas. As redes móveis atualmente são implantadas em camadas, onde as células macro cobrem grandes áreas, prestação de serviço a todos os seus utilizadores e às subcamadas, já as menores cobrem uma área menor. Ao adensar o rede, é mais provável que qualquer usuário fique perto de uma BS e, assim, experimente um excelente serviço (INTERDONATO, 2020). As células pequenas podem até ser projetadas para atender apenas a um usuário que não precisa compartilhar nenhum recurso com outros usuários. Por outro lado, a rede a densificação acarreta altos custos de implantação e manutenção. Importante salientar que como foi adensada a rede, a interferência entre as células se torna o maior gargalo, o que leva a uma degradação do rendimento (ANDREWS et al., 2016).

O SE pode ser aumentado usando várias antenas de transmissão e recepção tanto o BS quanto no UE. Isso é conhecido como tecnologia MIMO (Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas) (JR; LOZANO, 2018).

## 2.1 MIMO

Uma técnica de multiplexação inversa baseada em Múltiplos Acessos Divididos Espacialmente (SDMA) proposta em 1993, o SDMA é a capacidade de focalizar uma transmissão em um único ponto no espaço permite atender vários usuários nos mesmos recursos de tempo-frequência e separá-los no domínio espacial. Isso é conhecido como multiplexação espacial (INTERDONATO, 2020). O SDMA é uma técnica usada para compartilhar recursos de um sistema de comunicação sem fio entre múltiplos usuários, enquanto o MIMO é uma técnica usada para melhorar a SE desse sistema, aumentando a taxa de transmissão e melhorando a qualidade do sinal recebido.

Sua patente nos EUA em 1994 descreveu um método de transmissão em altas taxas de dados dividindo um sinal de alta taxa em vários sinais a serem transmitidos, de transmissores separados, espacialmente e recuperados pelo conjunto de antenas de recepção com base nas diferenças nas direções de chegada (DoA) (PAULRAJ; KAILATH, 1994). Paulraj recebeu o prestigioso Prêmio Marconi em 2014 por suas contribuições pioneiras no desenvolvimento da teoria e aplicações das antenas MIMO, velocidade WiFi e sistemas móveis 4G, revolucionando a conexão sem fio de alta velocidade.

No MIMO, existe o precodificador que, em termos mais gerais, considera todo o processamento espacial que ocorre no transmissor. O benefício da formação de sinal é aumentar o ganho do sinal recebido, fazendo com que os sinais emitidos de diferentes antenas se somem construtivamente, reduzindo o efeito de desvanecimento de multipercurso.

O MIMO possui uma grande contribuição na comunicação móvel, utilizado no LTE (evolução de longo termo, o nome comercial para 4G) tem sido o primeiro padrão móvel que implementa totalmente a tecnologia MIMO multiusuário, desde 2010. LTE BSs podem ser equipados com até 8 portas de antena cobrindo 120 graus na horizontal setor, para um total de 24 portas de antena (INTERDONATO, 2020).

### 2.1.1 *Beamforming*

O beamforming, ou formação de feixes, é uma técnica utilizada em sistemas de comunicação sem fio para direcionar e focar os sinais transmitidos ou recebidos em direções específicas. Isso é feito através do ajuste das fases e amplitudes dos sinais em múltiplas antenas, de modo a criar um padrão de radiação direcional. Essa técnica melhora a qualidade do sinal, aumenta a eficiência espectral e reduz a interferência entre múltiplos usuários, resultando em uma melhor experiência de comunicação e maior capacidade da rede (VEEN; BUCKLEY, 1988).

A matriz de recepção das bases coleta amostras espaciais de propagação de onda, que são processados pela CPU. O objetivo é estimar o sinal que chega de uma direção desejada em presença de ruído e sinais de interferência. Um formador de feixe realiza a filtragem espacial para separar os sinais que têm conteúdo de frequência sobreposto, mas se originadas de diferentes locais (VEEN; BUCKLEY, 1988).

Uma *antena phased array* é um arranjo de elementos de antena montados juntos de tal forma que o padrão de radiação de cada elemento individual combina construtivamente com antenas vizinhas para formar um padrão de radiação efetivo chamado de lóbulo principal, como na Figura 2. O lóbulo principal transmite energia irradiada no local desejado enquanto a antena é projetada para interferir destrutivamente em sinais em direções indesejadas, formando nulos e lóbulos laterais. O conjunto de antenas é projetado para maximizar a energia irradiada no lóbulo principal enquanto reduz a energia irradiada nos lóbulos laterais a um nível aceitável. A direção da radiação pode ser manipulada alterando a fase do sinal alimentado em cada elemento da antena (BENSON, 2019).

## 2.2 Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas em abundância (mMIMO)

O mMIMO, na Figura 6, cujo conceito foi introduzido por um artigo (MARZETTA, 2010), consiste em equipar BSs com um número de antenas superior ao número de usuários ativos por recurso de tempo-frequência. Neste regime a BS utiliza a técnica de *beamfor-*

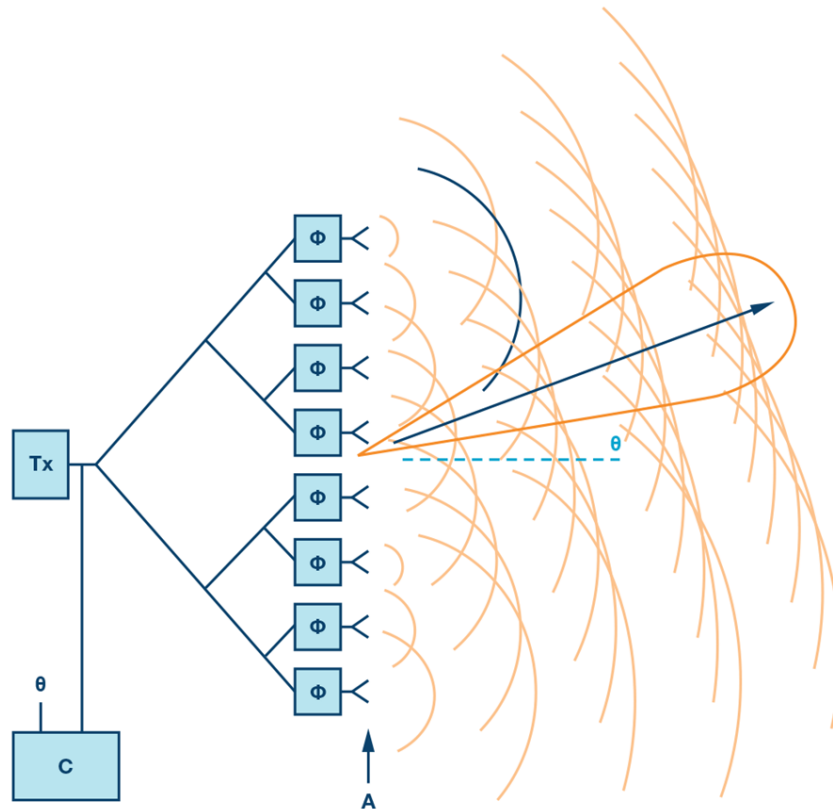


Figura 2 – Formação de feixe,  
Fonte: (PERSON, 2019)

*ming* para explorar a seletividade espacial e os altos ganhos para atingir maiores taxas de capacidade.

É importante ressaltar que o excesso de antenas BS em relação aos usuários desencadeia um fenômeno chamado propagação favorável (NGO; LARSSON; MARZETTA, 2014), ou seja, os canais dos usuários tornam-se mutuamente ortogonais à medida que o número de antenas BS aumenta, o que faz com que a interferência entre usuários desapareça e facilite uma multiplexação espacial agressiva dos usuários. A propagação favorável também torna o processamento de sinal linear esquemas, como MRT e ZF, eficaz e quase ótimo, simplificando consideravelmente a complexidade do circuito (BJÖRNSON; HOYDIS; SANGUINETTI, 2017).

O mMIMO pode oferecer, na maioria dos ambientes de propagação, outro benefício conhecido como a diminuição da variação do canal chamado de *channel hardening* (GUNNARSSON et al., 2020). O canal escalar efetivo visto por qualquer usuário é quase determinístico como o efeito do enfraquecimento do sinal em pequena escala e é calculado em média sobre as muitas observações de canal, em virtude da lei de grandes números. A operação TDD é defendida em MIMO para economizar recursos de rádio significativamente, conforme estimativas do canal no *uplink* também são válidas para o *downlink*.

O mMIMO também possui uma grande contribuição na comunicação móvel, as

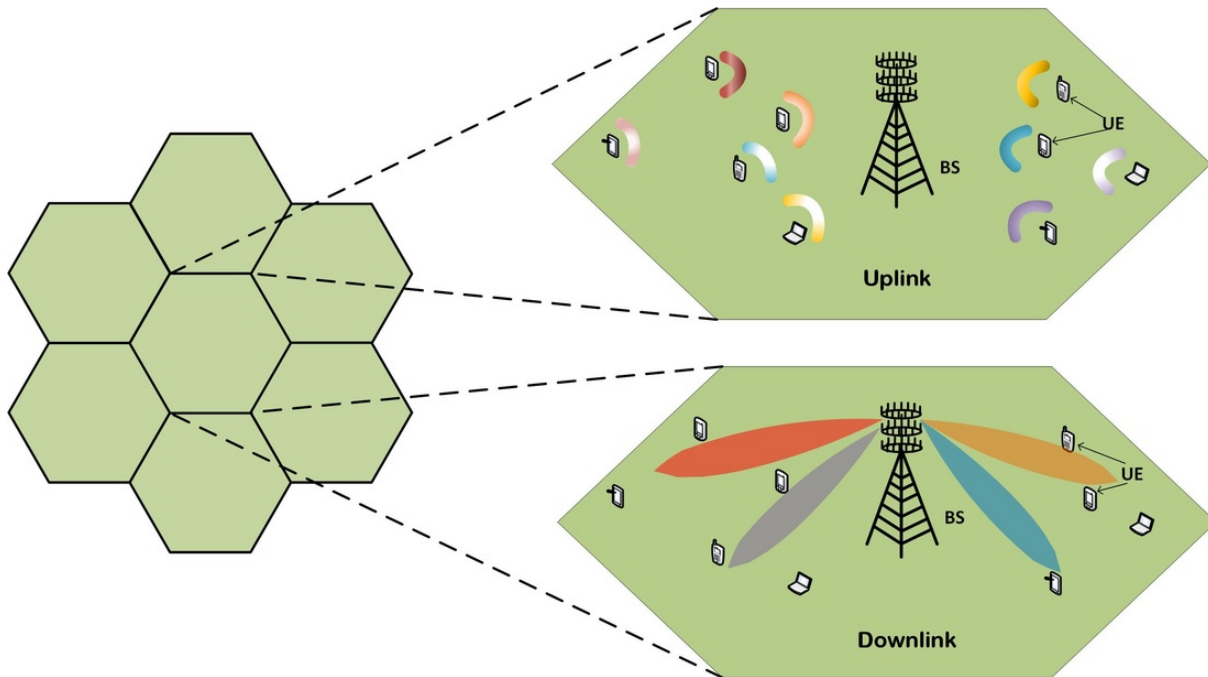


Figura 3 – Sistema mMIMO

Fonte: (BJÖRNSSON; HOYDIS; SANGUINETTI, 2017)

atuais implementações massivas de MIMO têm corroborado a teoria estudos, e hoje o mMIMO é um facilitador chave do 5G NR, conforme previsto corretamente. As BSs estão sendo implantadas em todo o mundo, e empresas de telecomunicações estão competindo para estabelecer novos recordes SE (INTERDONATO, 2020).

### 2.3 Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas em abundância e Livre de Células (CF-mMIMO)

CF-mMIMO é uma nova tecnologia que basicamente combina os melhores aspectos de redes celulares com a tecnologia celular mMIMO para superar suas respectivas fraquezas (CHEN et al., 2021).

O CF-mMIMO, é uma infraestrutura para comunicação sem fio onde se utiliza de várias BSs com um certo número de antenas, todas essas bases são interligadas a CPU. A CPU, utiliza-se dos dados gerados a partir das BSs para transmitir para os UEs através de feixes gerados pela defasagem dos sinais nas antenas (*beamforming*) (VEEN; BUCKLEY, 1988).

Uma rede sem células pode ser dividida em uma borda e em núcleo, assim como as redes móveis. As BSs e CPUs estão na borda e as conexões entre eles são chamadas de *links fronthaul*, enquanto as conexões entre a borda e o núcleo ainda são chamadas de *links* de *backhaul*. Assim, as CPUs são conectadas à rede central por meio de *links* de *backhaul*, que são usados para enviar e receber dados da Internet e outras fontes, para



facilitar vários serviços de dados. Em contraste, os *links fronthaul* podem ser usados para (INTERDONATO, 2020):

- Compartilhar sinais da camada física que serão transmitidos via *downlink*;
- Encaminhar sinais recebidos via *uplink*;
- Compartilhar o estado de informação do canal(CSI) dos canais físicos, onde CSI refere-se a propriedades de canal conhecidas de um link de comunicação.

O termo veio em 2015 (NGO et al., 2015), onde considerando um sistema MIMO massivo distribuído onde um grande número de antenas de serviço, chamadas de pontos de acesso (APs), e um número muito menor de usuários autônomos são distribuídos aleatoriamente em uma ampla área. Na Figura 4, temos ilustrado um sistema CF-mMIMO, onde alguns APs são conectados diretamente a uma CPU enquanto outros APs são conectados por meio de um AP vizinho.

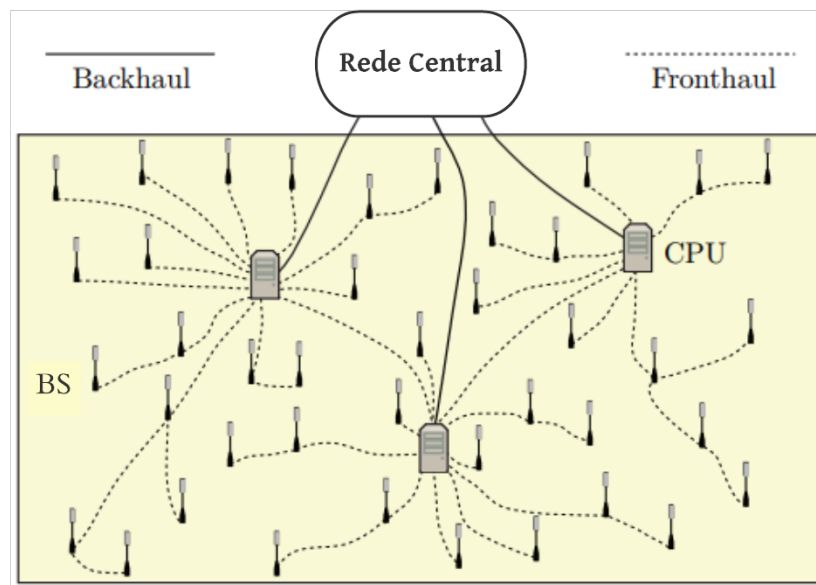


Figura 4 – Sistema CF-mMIMO  
Fonte:(INTERDONATO, 2020)

Vale ressaltar que a CPU pode ser vista como entidade e não como uma unidade física separada. Com isso, as CPUs podem representar um conjunto de processadores locais que podem estar localizado em um subconjunto dos APs ou em outros locais físicos, e que estão conectados através de *links fronthaul*. Alinhado com o andamento centralizado de redes sem fio (CRAN) (INTERDONATO, 2020), um exemplo deste método seria o *Radio Stripes* com um sistema distribuído de processamento de dados (ERNFORS, 2019).

Todos as BSs cooperam através de uma rede *backhaul* e atender a todos os usuários no mesmo recurso de tempo-frequência por meio de operação *duplex* (TDD) de divisão de tempo. Não há células ou limites celulares.

Espera-se que o CF-mMIMO ofereça muitas vantagens:

- Grande taxa de transferência, probabilidade de cobertura e eficiência energética;
- Média do enfraquecimento do sinal em pequena escala e ruído não correlacionado, de modo que o desempenho depende apenas de seu enfraquecimento em grande escala.

## 3 Modelo de canal

No projeto, foram realizados 3 modelos de canal sendo um não estruturado, um estruturado se baseando no protocolo do projeto de parceria de 3ª geração (3GPP) e um baseado na especificação técnica TR38901 da 3GPP (3GPP, 2022), um termo para organizações que padronização de conceitos em telecomunicações.

### 3.1 Canal não estruturado

Considerando um número  $B$  de BSs com  $L$  antenas em cada um, um número  $K$  de UEs com uma antena. Com isso, o canal gerado entre a antena em BS  $l$  e o UE  $k$  é  $\mathbf{h}_{lk} \in \mathbb{C}^N$ , o ganho do canal é afetado pela distância  $d$  do UE até a BS, dado pelo perda de ganho devido a  $d$ :

$$\beta = \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2, \quad (3.1)$$

em que o comprimento de onda representado por  $\lambda$  é calculado pela frequência do sinal com a velocidade da luz no vácuo por convenção. Ademais, o canal é representado por uma variável aleatória complexa, seguindo uma distribuição normal centrada e variância  $\beta_l$ :

$$\mathbf{h}_{lk} \sim \mathcal{N}(0, \beta_l). \quad (3.2)$$

Consideramos um desvanecimento plano de canal, assumimos ainda que o estado da informação do canal (CSI) é perfeitamente conhecida no transmissor, e sincronização entre a BS e o UE é assumido. A partir desta equação, é criado um tensor  $H_{UE \times BS \times antena}$  a qual armazena todos os canais gerados no ambiente, como é visto na Figura 5.

Na formação de feixe que suporta múltiplos canais com múltiplas antenas de transmissão também chamado de precodificador ( $w$ ).

Com isso, é realizado o cálculo da razão sinal por interferência e ruído (SINR), é uma métrica usada para fornecer limites teóricos na capacidade do canal em sistemas de comunicação sem fio (BJÖRNSON; HOYDIS; SANGUINETTI, 2017) e neste trabalho foi utilizado a equação 3.3 para o cálculo da SINR:

$$\text{SINR}_K = \frac{|\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k|^2}{\sigma_k^2 + \sum_{i \neq k} |\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_i|^2}. \quad (3.3)$$

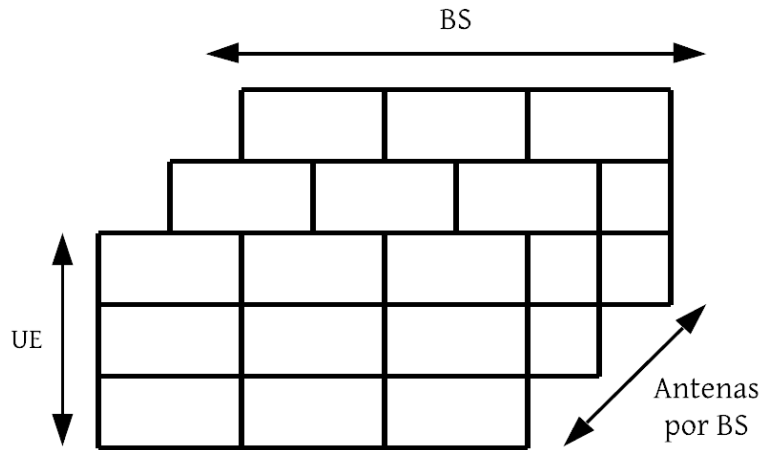


Figura 5 – Representação gráfica do tensor  $H_{UE \times BS \times antena}$

Sendo  $\mathbf{w}_i$  o vetor de precodificação linear  $1 \times N$ . Com isso, podemos calcular a capacidade de canal do sistema dado por  $\lceil \frac{bits}{Hz} \rceil$ :

$$C = \log_2(1 + SINR). \quad (3.4)$$

## 3.2 Canal estruturado

A estrutura do canal é modelada considerando a parametrização que depende da geometria do ambiente. Para essa finalidade, empregamos o conceito de vetor direcional.

O vetor direcional, mostrado na Figura 6, é um vetor complexo que descreve a direção de chegada ou partida de sinais em um sistema de antenas. Ele é usado para ajustar a fase e a amplitude dos sinais recebidos ou transmitidos por cada elemento da antena, possibilitando a formação de feixes e melhorando a qualidade da comunicação sem fio. O vetor direcional é fundamental para a modelagem precisa da propagação do sinal em ambientes complexos e para a implementação de técnicas avançadas de processamento de sinal em sistemas de comunicação.

No vetor direcional, temos uma série de fases representadas com um vetor de onda  $k(\phi, \theta)$  de uma onda plana com comprimento de onda  $\lambda$  que colide com o conjunto de antenas sob o ângulo azimutal  $\phi \in [-\pi, \pi)$  e o ângulo de elevação  $\theta \in [-\pi/2, \pi/2)$  (BJÖRNSON; HOYDIS; SANGUINETTI, 2017). O vetor descreve a variação na fase sendo observada no plano cartesiano com a localização  $u$ .

O canal estruturado considera com o vetor transposto do vetor direcional e o  $\beta$  da equação 3.1 :

$$\mathbf{h} = \sqrt{\beta} [\exp jk(\phi, \theta)u_1, \dots, \exp jk(\phi, \theta)u_M]^T. \quad (3.5)$$

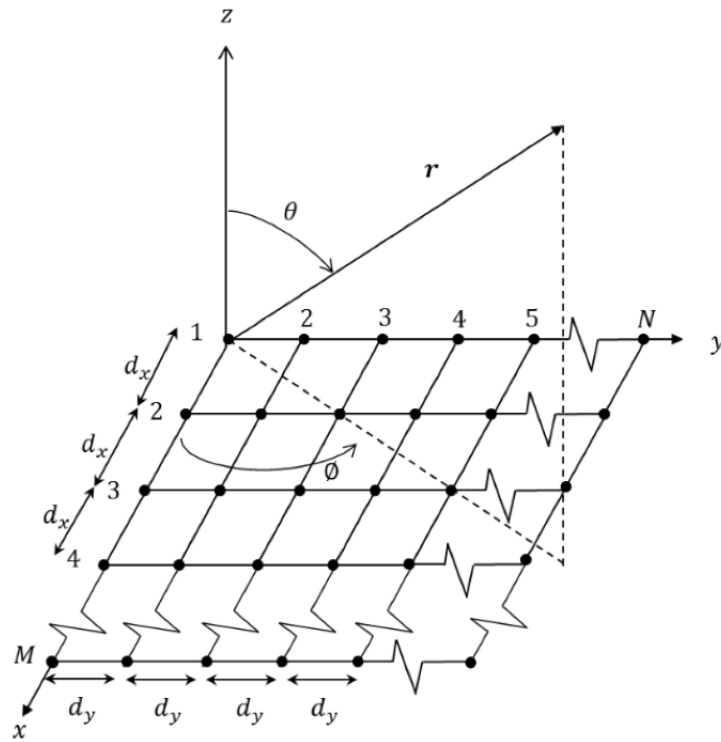


Figura 6 – Vetor direcional  
Fonte:(RAHIM et al., 2007)

### 3.3 Canal Estruturado baseado na Norma 3GPP TR38.901

3GPP TR 38.901 é um relatório técnico que fornece especificações para os cenários de implantação e metodologia de avaliação da tecnologia 5G New Radio (NR). Este relatório técnico foi lançado pela primeira vez em dezembro de 2017 e, desde então, foi atualizado várias vezes (3GPP, 2022). O canal será gerado com o HermesPy, o qual é um simulador semi-estático de nível de enlace, baseado em mecanismos orientados ao tempo. Ele oferece uma estrutura para simular conexões sem fio multi-RAT (tecnologia de acesso múltiplo por rádio), compreendendo diversos modems transmissores e receptores que podem operar em diferentes frequências de portadora. A utilização deste simulador permite uma análise aprofundada das características e desempenho de sistemas de comunicação sem fio. (ADLER; KRONAUER; BARRETO, 2022).

### 3.4 Precodificador

Precodificador é uma generalização do *beamforming* para suportar transmissão de múltiplos canais em comunicações sem fio multi-antenas. No *beamforming* de um único

*stream* convencional, o mesmo sinal é emitido de cada uma das antenas de transmissão com ponderação (pesos) apropriada (fase e ganho) de modo que a potência do sinal seja maximizada na saída do receptor. Quando o receptor tem múltiplas antenas, a formação de feixe de fluxo único não pode maximizar simultaneamente o nível de sinal em todas as antenas de recepção, sendo assim, para maximizar a taxa de transferência em vários sistemas de antenas de recepção, a transmissão *multi-stream* geralmente é necessária (FOSCHINI; GANS, 1998).

De uma perspectiva de implementação, algoritmos de *precoding* para sistemas SDMA podem ser subdivididos em tipos de pré-codificação lineares e não lineares. As abordagens de *precoding* linear geralmente atingem um desempenho razoável com complexidade muito menor, algumas das estratégias de *precoding* linear que estão presentes neste trabalho incluem MRT (LO, 1999) e o ZF (JOHAM; UTSCHICK; NOSSEK, 2005).

### 3.4.1 Taxa Máxima de Transmissão - MRT

O termo veio de um método para combater o enfraquecimento do sinal em múltiplos caminhos chamada de taxa máxima de combinação (MRC), onde os sinais dos elementos de antena recebidos são ponderados de tal forma que a relação sinal-ruído (SNR) de sua soma é maximizada. Entretanto, esta técnica só foi utilizada para recepção, e com a evolução da tecnologia é necessário existir um sistema parecido para a transmissão ou em ambos para combater os efeitos drásticos do enfraquecimento do sinal (LO, 1999)

Se trata de um arranjo em que um transmissor tem uma pluralidade de antenas de transmissão que transmitem simultaneamente o mesmo símbolo, e onde o sinal entregue a cada antena transmissora é ponderado por um fator relacionado aos coeficientes de transmissão do canal encontrados entre as antenas transmissoras e as antenas receptoras (LO, 1999). No caso de uma pluralidade de antenas de transmissão e uma antena de recepção, onde o coeficiente do canal entre a antena de recepção e uma antena de transmissão  $k$  é  $h_k$ , dividido por um fator de normalização, o vetor  $p$ , que é a alocação de cada potência das BSs aos UEs,  $i$ , é definido pela distância do UE  $l_{pos}$  as antenas de transmissão  $k_{pos}$  do sistema.

$$i = \sum_{n=1}^N |k_{pos_n} - l_{pos}|. \quad (3.6)$$

No sistema, a divisão de potência transmitida é dada pela potência da BS  $P$  pelo número de UEs  $L$  conectados a ela:

$$\alpha = \frac{P}{L}, \quad (3.7)$$

onde  $p_i$ , seria a soma da potência transmitida para o UE por cada BS que se conecta sendo representado por  $j$  a ele

$$p_i = \sum_{j=1}^J \alpha_j. \quad (3.8)$$

O MRT é uma técnica de precodificação que maximiza o ganho do sinal para o usuário desejado. Sendo assim, empregando o precodificador  $w$  no sistema temos:

$$w^{MRT} = \sqrt{p_k} \frac{h_k}{\|h_k\|}. \quad (3.9)$$

### 3.4.2 Forçar a Zero - ZF

O ZF é um método de processamento de sinal espacial pelo qual um transmissor com múltiplas antenas pode anular a interferência multiusuário. Quando o CSI é perfeitamente conhecida no transmissor, o ZF é dado pela pseudo-inversa da matriz do canal. A cada tempo de símbolo, a camada mais forte do sinal transmitido é detectada pela primeira vez e seu efeito é cancelado para cada sinal recebido. Em seguida, procedemos para detectar a mais forte das camadas restantes, e assim por diante. O algoritmo ZF consiste em quatro passos recursivos (GARG, 2010):

1. Ordenar: Determine a ordem de detecção ideal.
2. Anular: Escolha o vetor de anulação para anular todos os sinais de transmissão mais fracos e obter o sinal de transmissão mais forte;
3. Fatiar: Detecte o valor estimado do sinal mais forte cortando para o valor mais próximo na constelação de sinal;
4. Cancelar: Cancela o efeito do sinal mais forte do sinal recebido; vetor de sinal para reduzir a complexidade de detecção para a transmissão restante sinal. Vá para a etapa 2 — processo de anulação.

Um pré-codificador de força zero é definido como um pré-codificador onde  $w_i$  destinado ao usuário  $i$  é ortogonal a cada vetor de canal  $h_j$  associado a usuários  $j$  onde  $j \neq i$ :

$$w_i \perp h_j \quad \text{se} \quad i \neq j. \quad (3.10)$$

Assim, a interferência causada pelo sinal destinado a um usuário é efetivamente anulada para o restante dos usuários por meio do pré-codificador de força zero. A condição de ortogonalidade pode ser expressa em forma de matriz como:  $H^T W = Q$ , onde  $Q$  é uma matriz diagonal  $L \times L$ , sendo  $L$  o número de antenas. Normalmente,  $Q$  é selecionado para

ser uma matriz de identidade. Isso torna  $W$  o pseudo-inverso correto de Moore-Penrose de  $H^T$  dado por

$$W = (H^T)^+ = H(H^T H)^{-1}. \quad (3.11)$$



## 4 Métodos de seleção de feixes

Ao abordar os métodos de seleção é necessário entender o ambiente em que os UES estão alocados, neste projeto dois ambientes foram analisados a métrica da distância, agrupamento não supervisionado por inteligência artificial e sem método de seleção.

### 4.1 Ambiente

No projeto, foi criado dois ambientes baseados no CF-mMIMO para simularmos o projeto onde os triângulos representam as bases e os círculos representam os usuários do sistema, com suas características descritas na Tabela 1. Para gerar as diferentes estimações de canal, com métodos de agrupamento utilizados para a seleção de feixes e diferentes estilos de formação de feixes, utiliza-se do processo de Monte Carlo. Ademais, o sistema possui  $b$  bases com  $n$  antenas cada, representados pelo símbolo do triângulo e o círculo respectivamente na Figura 7. Nos ambientes temos a seguinte definição:

Tabela 1 – Características dos ambientes de simulação

Características	Ambiente 1	Ambiente 2
Medidas [m]	$200 \times 100$	$30 \times 30$
Altura da BS [m]	15	3
Altura do UE [m]	1,5	1,5

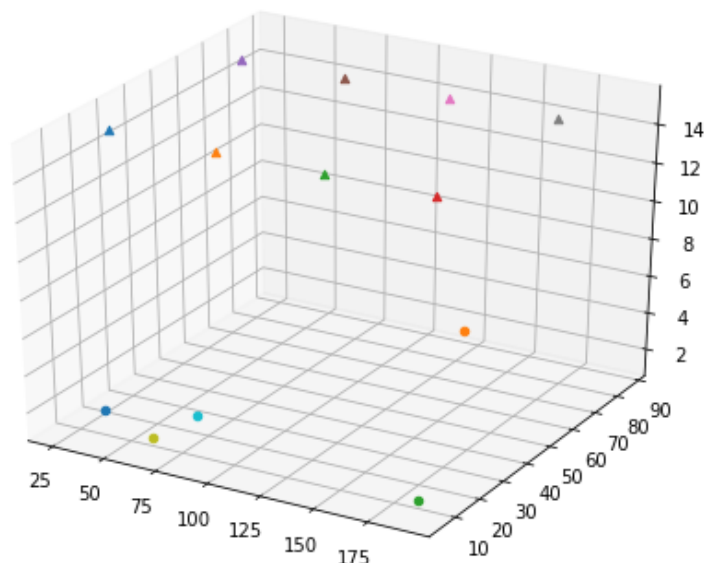


Figura 7 – Ambiente de simulação 1

## 4.2 Limite de distância

Neste sistema, foi utilizado a distância das bases como parâmetro de decisão de conectividade, olhando a Figura 8, distância do UE para uma certa BS não poderia ser maior que a distância de uma BS a outra, a qual é definida no ambiente de simulação pois todas as BSs são igualmente espaçadas, sendo no Ambiente 1 um limite de 50 metros representada na Figura 9 (com a coloração avermelhada as BSs e os UEs conectados) e no Ambiente 2 de 15 metros.

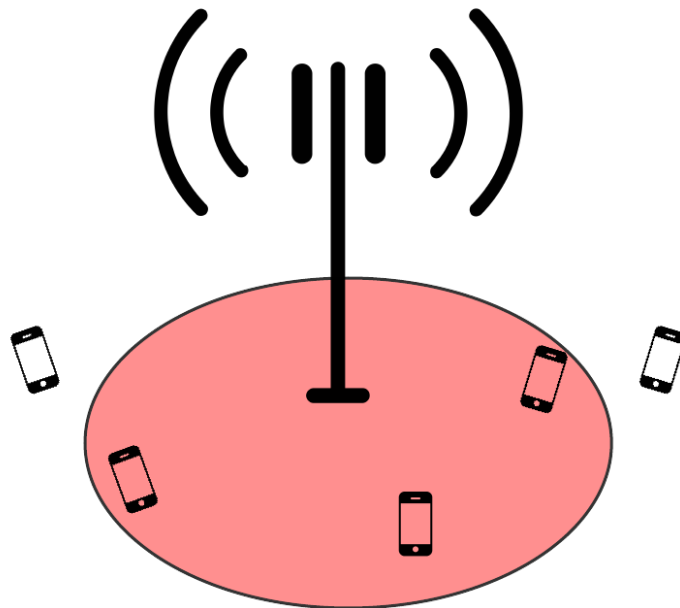


Figura 8 – Método de seleção pelo limite de distância

## 4.3 Clusterização baseada Aprendizado de Máquina

### 4.3.1 Conceito

O *K-means* é um algoritmo de aprendizado não supervisionado utilizado para agrupar dados em *clusters*, com base em suas características e similaridades. O objetivo do *K-means* é dividir os pontos de dados em K grupos, de modo que a soma das distâncias quadráticas entre os pontos de um mesmo grupo e o centroide desse grupo seja minimizada. O centroide é o ponto médio de todos os pontos pertencentes a um *cluster*. Para fazer isso, é denotado a distância euclidiana entre um ponto do UE  $x_i$  ao centroide do *cluster*  $y_j$ , dado pela função *within cluster sum of squared errors* (WCSS) (KRIEGEL; SCHUBERT; ZIMEK, 2017):

$$WCSS = \sum_{j=1}^k \sum_{\mathbf{x}_i \in j} \|\mathbf{x}_i - \mathbf{y}_j\|^2, \quad (4.1)$$

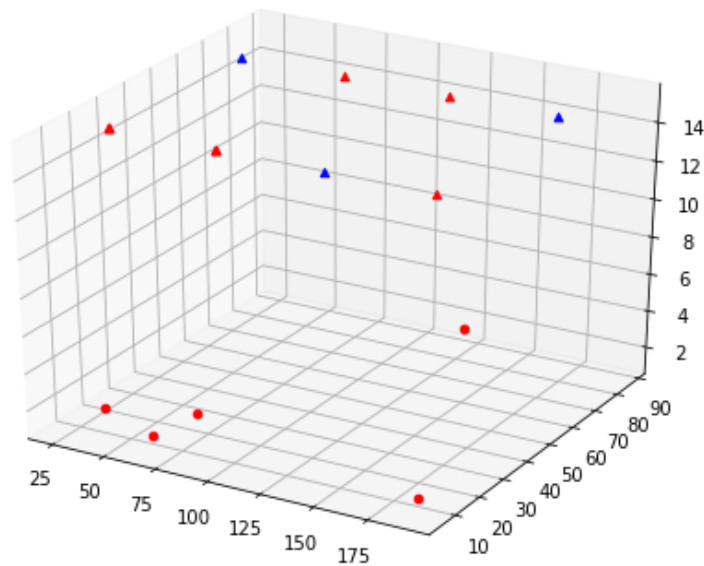


Figura 9 – Ambiente 1 utilizando o critério da distância para a seleção dos feixes

O *K-means* é amplamente utilizado em diversas aplicações, como análise de dados, segmentação de clientes, processamento de imagens e aprendizado de máquina, devido à sua simplicidade e eficiência. No entanto, o algoritmo tem algumas limitações, como a necessidade de especificar o número de grupos que serão feitos ( $K$ ) antecipadamente e a possibilidade de convergir para ótimos locais em vez do ótimo global.

Antes do processo de agrupamento, cada usuário envia uma sequência de treinamento para que as estações base possam estimar os canais de comunicação, nas Figuras 10 e 11. Cada estação base estima o canal e o transmite para a unidade central, que então forma a matriz de concatenação  $H$ . A unidade de processamento utiliza essa matriz como entrada para o algoritmo *K-means*, a fim de identificar e criar os *clusters* apropriados.

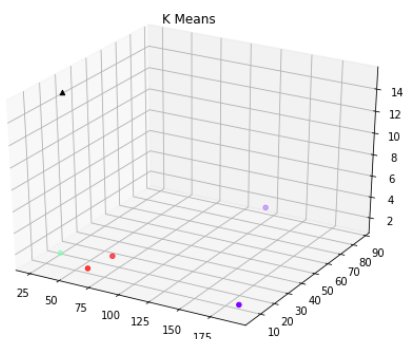


Figura 10 – Análise da BS (triângulo preto) 0 pelo *k-means*, separando os UEs em grupos (bolas coloridas)

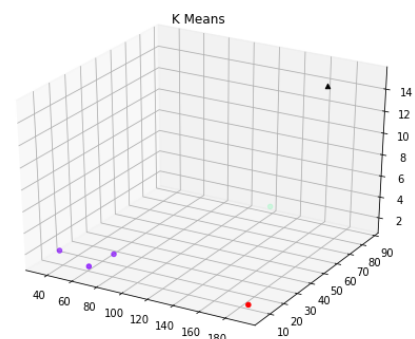


Figura 11 – Análise da BS (triângulo preto) 7 pelo *k-means*, separando os UEs em grupos (bolas coloridas)

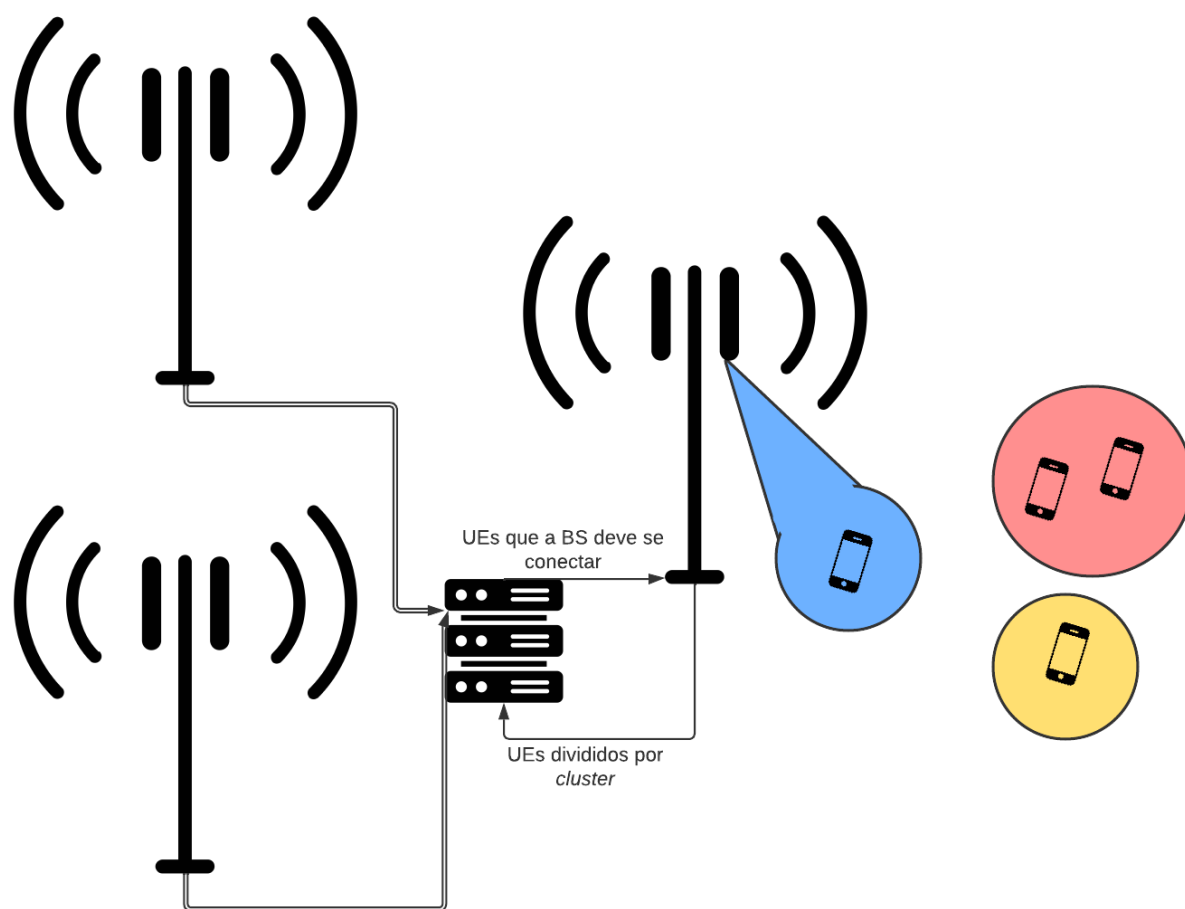
A formação desses grupos revela à CPU a correlação entre os canais dos usuários,

observado na Figura 12. Mais especificamente, canais que pertencem ao mesmo grupo apresentam alta correlação entre si, enquanto canais em grupos diferentes indicam baixa correlação. Essa análise de correlação auxilia na otimização do desempenho da rede e na redução da interferência entre usuários.

Após a CPU obter o resultado do algoritmo *K-means*, as estações base são informadas sobre quais usuários se conectarão a elas. A distribuição dos usuários ocorre da seguinte maneira:

1. O melhor canal de cada grupo é selecionado.
2. Identifica-se a estação base e o usuário aos quais esse canal pertence.
3. Realiza-se essa inspeção para todos os grupos.
4. Verifica-se se ainda há usuários que não foram selecionados.
5. Caso existam usuários não selecionados, repete-se o processo a partir do passo 1.

Dessa forma, os usuários são distribuídos de maneira eficiente entre as estações base, considerando a correlação dos canais e a qualidade da conexão.

Figura 12 – Ambiente agrupado com *K-Means*

Parte II

Simulação

## 5 Resultado e Discussões

Para analisar o desempenho de um sistema de comunicação sem fio usando a tecnologia CF-mMIMO, os ambientes da seção são usados para gerar diferentes estimativas do canal de comunicação, onde:

- Ambiente 1: Utiliza-se de canais estruturados ou não.
- Ambiente 2: Utiliza-se de canal estruturado baseado na norma 3GPP TR38.901

### 5.1 Ambiente 1

#### 5.1.1 Resultados

Tabela 2 – Valores utilizados para a simulação do Ambiente 1

Variável	Descrição	Valor*	Unidade
$f_c$	Frequência central	2,4	GHz
$P$	Potência alocada para cada base	40	dBm
$B$	Largura de Banda	100	MHz
$N_o$	Ruído branco	-127	dBm
$\phi$	Azimutal (usado no canal estruturado)	10	°
$gap$	Distância de uma BS a outra	50	m
$mc$	Número de execuções para a aplicação	1000	-
$b$	Número de BSs	8	-
$n$	Número de antenas	5	-
$u$	Número de usuários	[1:100]	-
$u_{kmeans}$	Número de usuários no $k$ -means	[1:60]	-

\* Os vetores são representados entre colchetes, em caso de grande quantidade é utilizado uma definição em *Python* [começo : fim].

Analisando a Tabela 2, utilizamos uma frequência muito utilizada por sistema de rede local sem fio (WLAN) que frequentemente são acessadas usando protocolos IEEE 802.11 com  $f = 2,4$  GHz e  $B = 100$  MHz. Cada BS do sistema possui uma potência de  $P = 40$  dBm, a qual contém 5 antenas e as bases são distanciadas a 50 metros uma da outra. Para a simulação estruturada, foi utilizado um grau azimutal ( $\phi$ ) de  $10^\circ$ . Na tabela 2, tem-se sumariado estes e outros valores relevantes para a simulação.

Para a simulação, o código foi escrito na linguagem *Python* onde realizamos os cálculos para estimação do canal  $mc$  vezes para obtermos uma melhor aproximação dos resultados. Na tabela 1, temos as variáveis utilizadas na simulação e seus respectivos valores.

Após os cálculos, obtém-se os gráficos do sistema da capacidade de canal, na qual a unidade é  $[\frac{bit}{Hz}]$ . Com isso, sistema sem método para seleção de feixes e com canais não estruturados, foi realizado a estimação de canais para diversos UEs, distribuídos de forma cumulativa (CDF) distribuindo todas as amostras no intervalo  $[0,1]$ , visto na Figura 13.

A partir dos conceitos acima, é possível criar um ambiente de simulação baseado no Ambiente 1 onde foi testado em cenários diferentes:

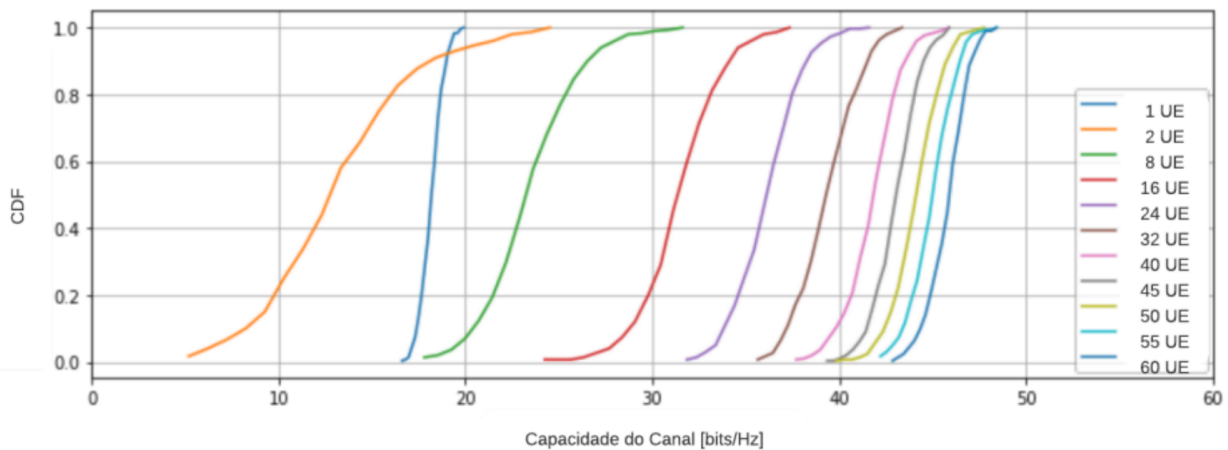


Figura 13 – Gráfico MRT no canal não estruturado

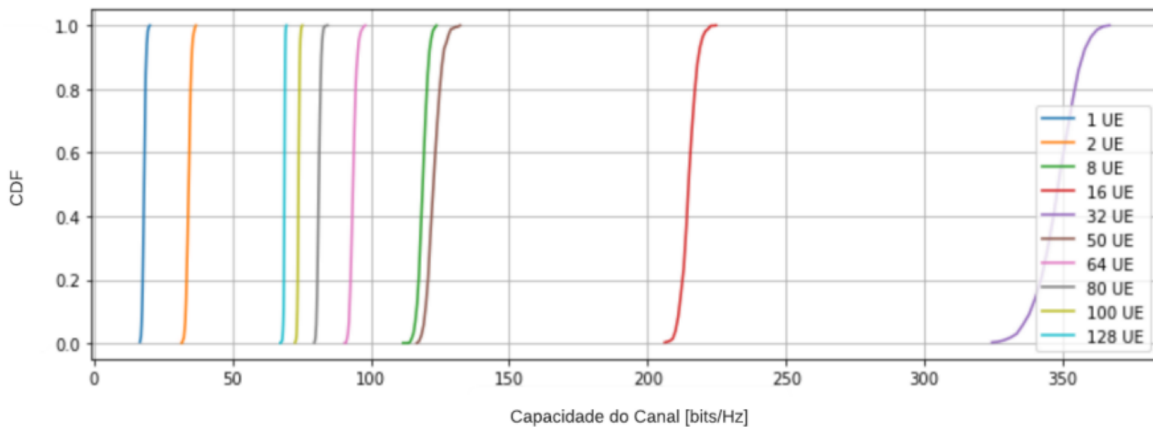


Figura 14 – Gráfico ZF no canal não estruturado



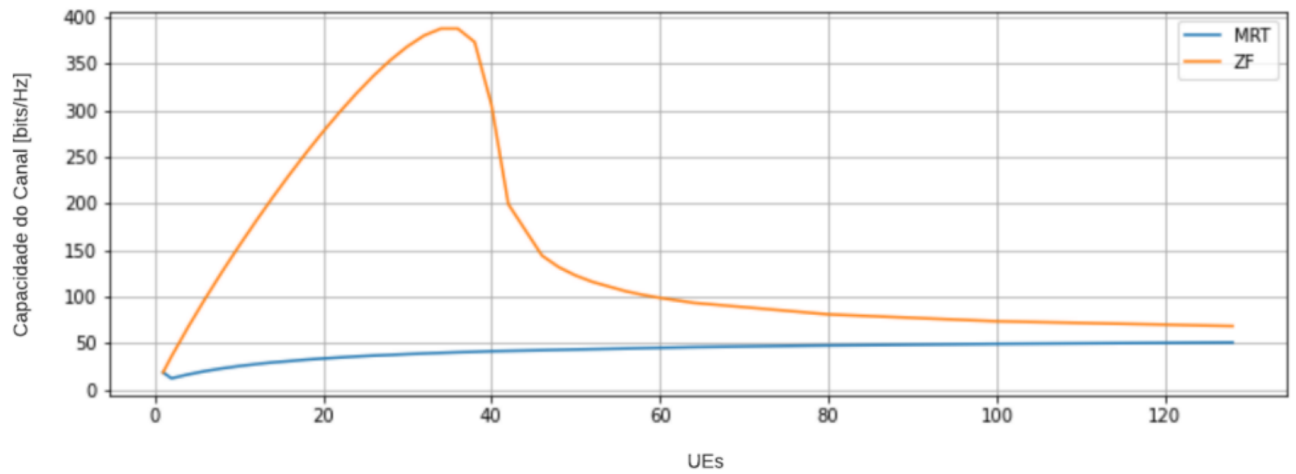


Figura 15 – Comparando os precodificadores em canais não estruturados

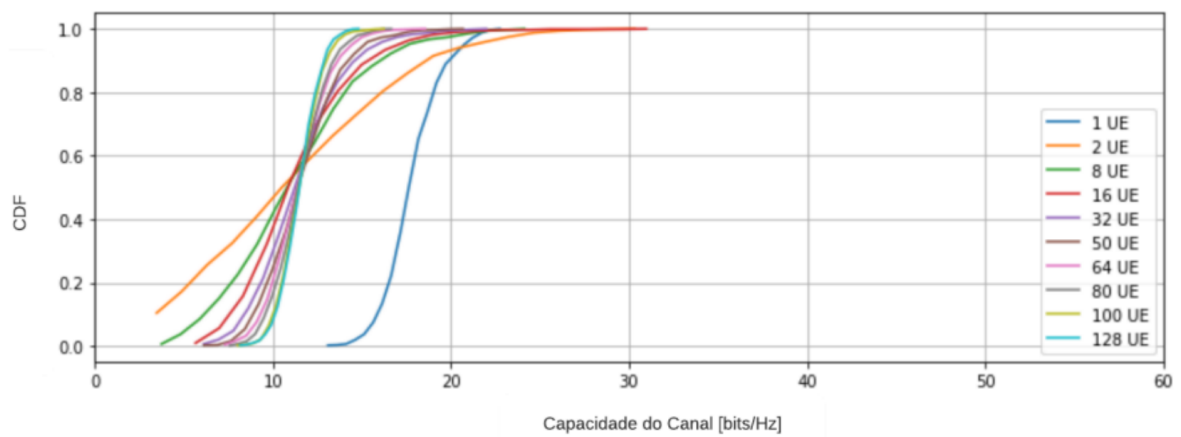


Figura 16 – Gráfico MRT no canal estruturado

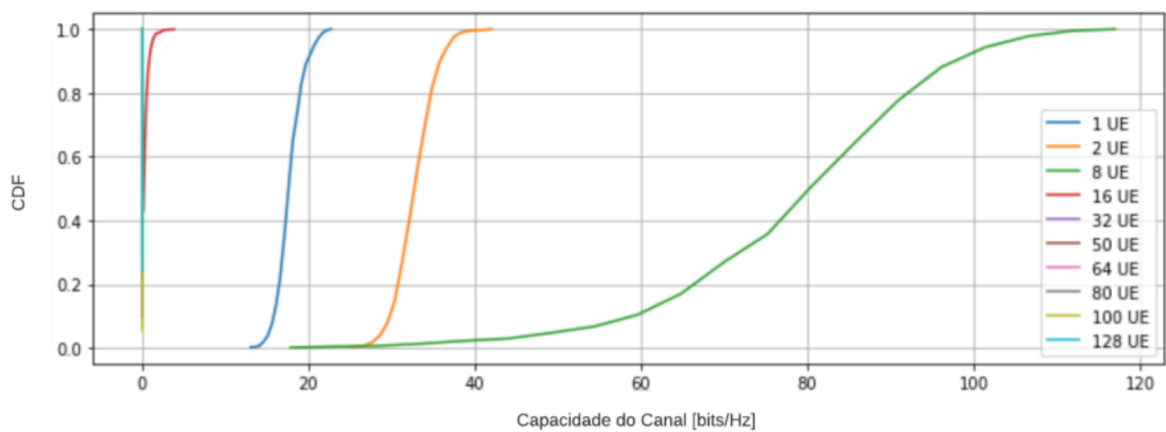


Figura 17 – Gráfico ZF no canal estruturado

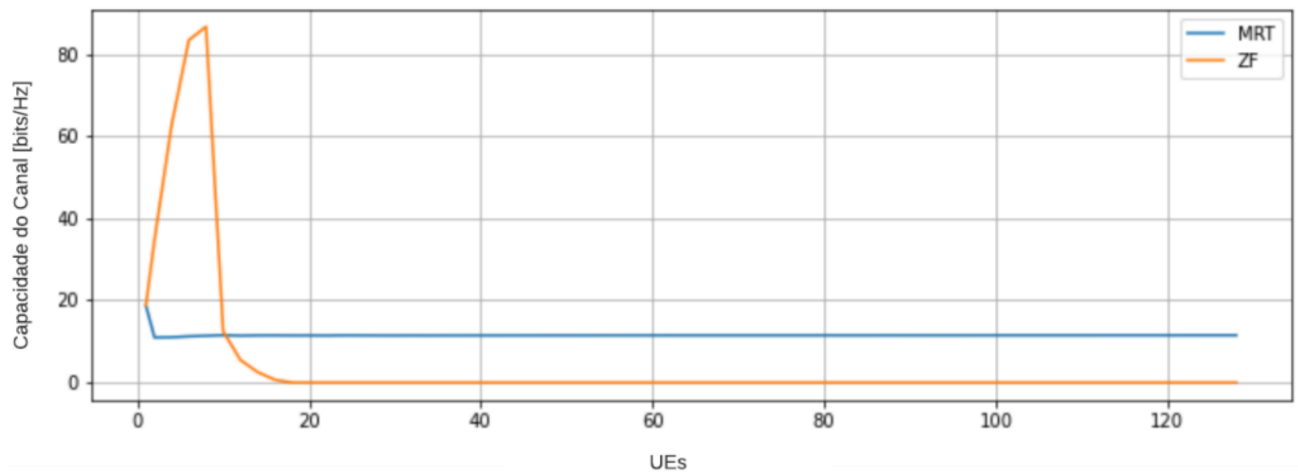


Figura 18 – Comparando os precodificadores em canais estruturados

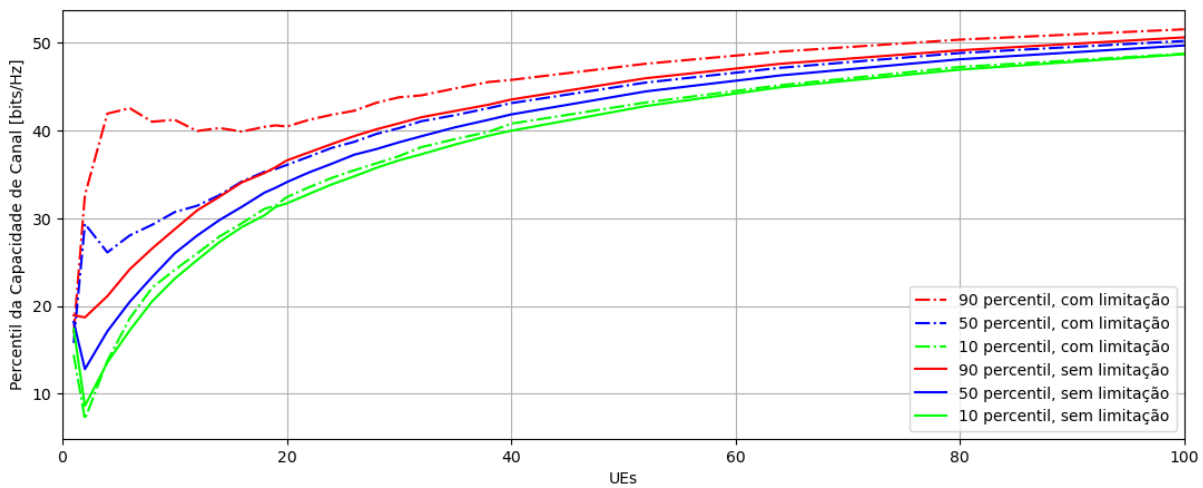


Figura 19 – Comparando sem e com limitação de distância com MRT em um canal não estruturado

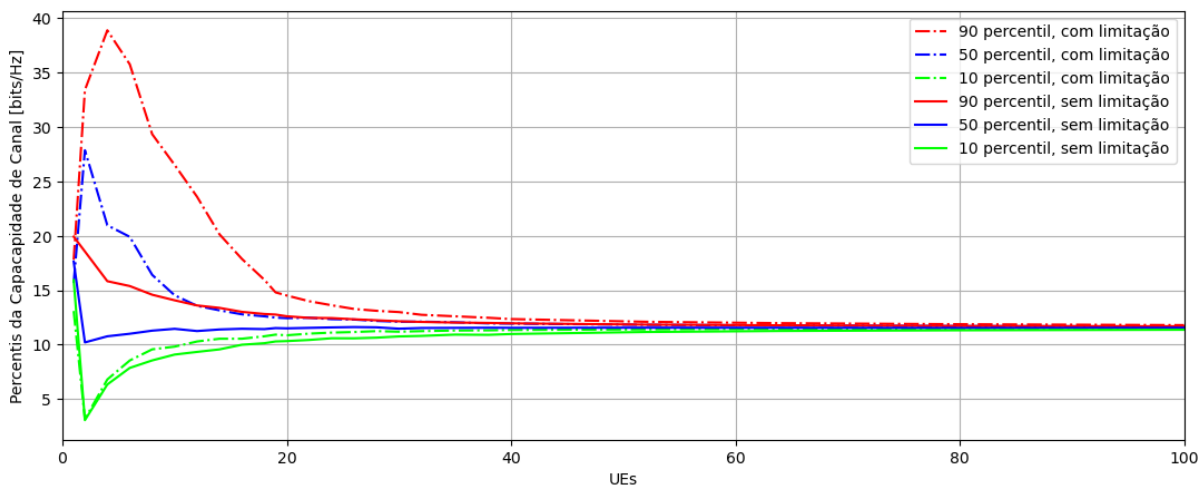


Figura 20 – Comparando sem e com limitação de distância com MRT em um canal estruturado

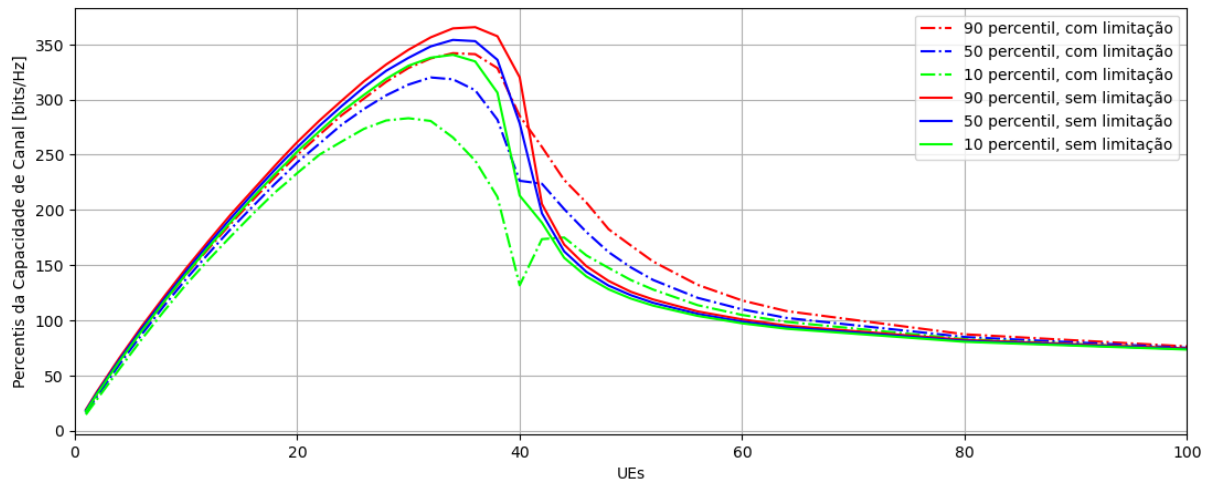


Figura 21 – Comparando sem e com limitação de distância com ZF em um canal não estruturado

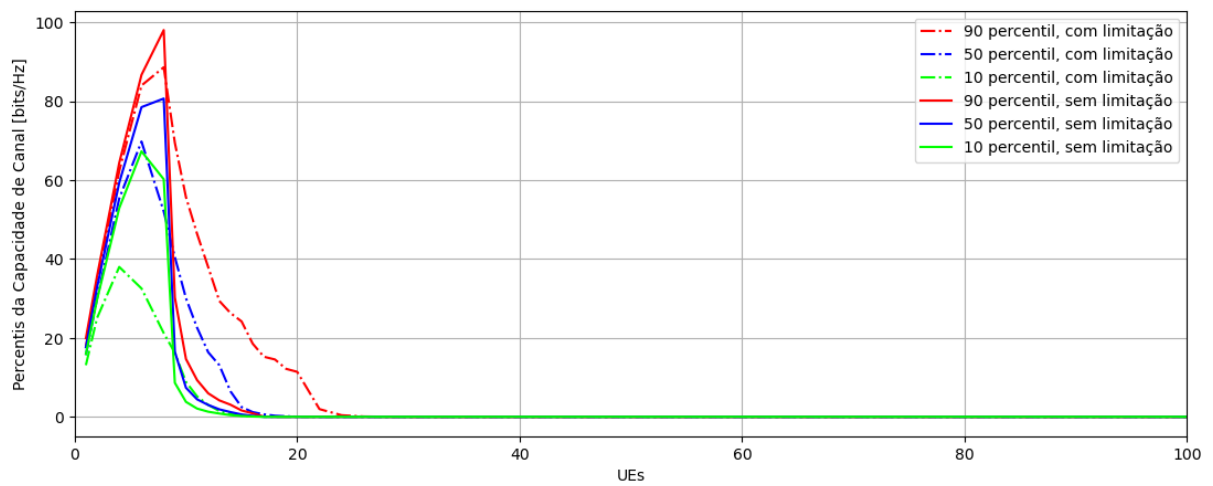


Figura 22 – Comparando sem e com limitação de distância com ZF em um canal estruturado

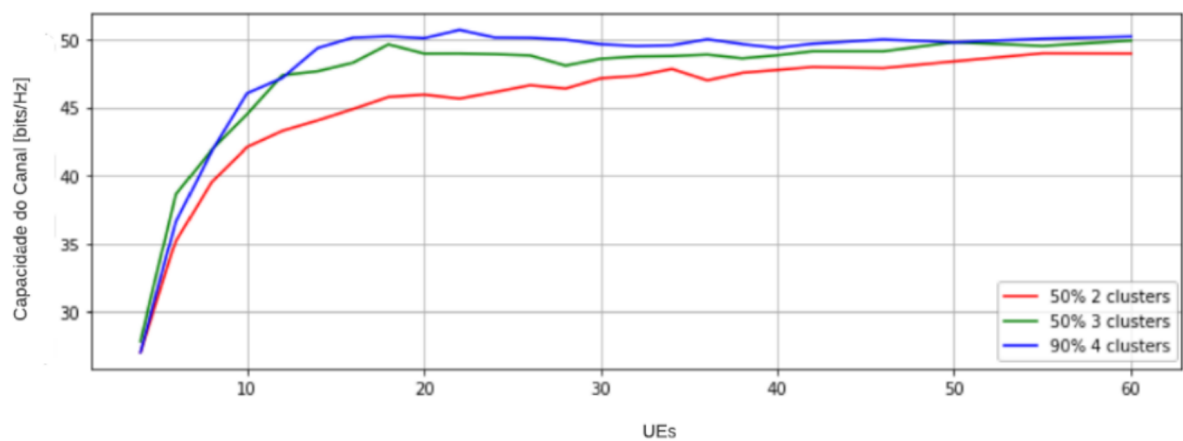


Figura 23 – Canal não estruturado utilizando o MRT e o método *K-Means*

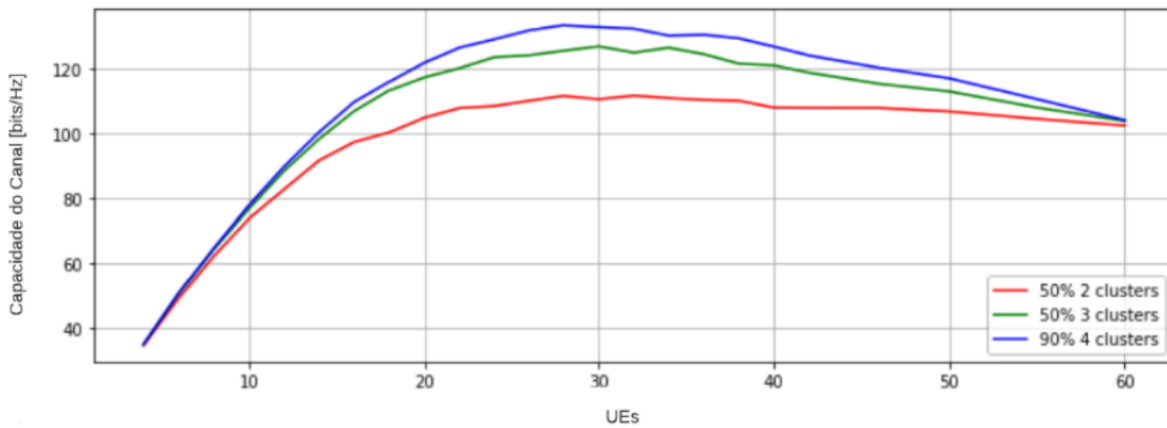


Figura 24 – Canal não estruturado utilizando o ZF e o método *K-Means*

## 5.1.2 Discussões

### 5.1.2.1 Sem critério de seleção de feixes

Esta simulação será utilizada para demonstrar um caso onde todos os UEs se conectam a todas as BSs, sem utilizar de critérios de seleção como o *K-Means* ou a distância entre o UE a BS.

- **Canal não estruturado com MRT:** A partir da Figura 13, observa-se que a capacidade de canal aumenta à medida que o número de usuários cresce. No entanto, esse aumento tende a saturar eventualmente, como é possível ver pela aproximação dos valores da CDF com o aumento de UEs no sistema. Esse fenômeno ocorre devido à relação sinal-ruído-interferência (SINR). À medida que o número de usuários aumenta, a interferência se torna mais significativa, e a filtragem espacial já não consegue eliminar eficientemente a interferência multiusuário. Assim, o desempenho do sistema atinge um limite, e a razão Taxa/Banda para de crescer significativamente.
- **Canal não estruturado com ZF:** Neste cenário, analisamos o desempenho utilizando o *precoding* ZF (*Zero-Forcing*) na Figura 14. Observamos que a capacidade de canal aumenta até um ponto ótimo. Acima desse valor, as taxas começam a diminuir. Esse problema pode ser explicado pelas características do ZF.

O cálculo do precodificador ZF requer a inversão de uma matriz com dimensões relacionadas às quarenta antenas e ao número de usuários da simulação. Quando o número de UEs se aproxima ou ultrapassa o número total de antenas, ocorre uma inversão matricial de posto deficiente. Nessa situação, o cancelamento da interferência não é efetivo, resultando na perda de eficiência da rede.

Ao comparar o ZF e o MRT, podemos concluir que as taxas alcançadas usando o *precoding* ZF são superiores às do MRT, conforme ilustrado na Figura 15. No entanto, esse desempenho superior é garantido somente se o sistema operar com

um número total de usuários menor que o número de antenas, conforme explicado anteriormente.

Se essa condição não for satisfeita, ambas as técnicas apresentam desempenhos similares, mas com uma vantagem para o MRT, que não requer inversão matricial e, portanto, é computacionalmente mais atrativo. Dessa forma, o MRT pode ser uma opção mais viável em cenários com maior número de usuários, considerando também a eficiência computacional.

- **Canal estruturado com MRT:** A Figura 16 e obtida considerando o canal definido pela Equação 3.5. Nela observa-se que o MRT apresenta um desempenho bastante insatisfatório. Devido ao baixo grau de liberdade (ou seja, poucos multipercursos), o desempenho do precodificador é severamente afetado pela interferência multiusuário. Isso demonstra a necessidade de incluir métodos que previnam ou minimizem essa interferência, a fim de melhorar o desempenho do sistema de comunicação e garantir uma experiência mais eficiente e satisfatória para os usuários.
- **Canal estruturado com ZF:** Na Figura 17, o ZF apresenta o melhor desempenho para 8 UEs, um número menor que o total de antenas da rede. Para um número de UEs maior que oito, o ZF, mais uma vez, exibe um desempenho insatisfatório, atingindo valores próximos de zero. Diferentemente do modelo anterior, no qual o mesmo precodificador alcançou um ponto ótimo com trinta e dois UEs, neste cenário, tal ponto foi verificado com apenas oito UEs. Essa redução se deve ao posto deficiente da matriz de canal  $H$ , o qual reflete a baixa diversidade de multipercursos e, portanto, a presença de canais linearmente dependentes.

Comparando os *precodings* na Figura 18, continua notável a diferença de *performance* do ZF para o MRT, pois um tenta anular a interferência enquanto o outro tenta coexistir com ela. Entretanto, devido o canal estruturado possuir limitação de percurso, percebe-se uma piora de resultado em relação aos *precodings* em canais não estruturados.

### 5.1.3 Distância do UE a BS como critério de seleção

Em relação à escolha de pontos de acesso com base na distância de uma BS a outra, essa abordagem é comumente usada em redes de comunicação sem fio para selecionar a BS mais próxima para se conectar. É importante notar, no entanto, que essa abordagem foi utilizada como ideal para posteriormente ser comparada ao método com inteligência artificial. Nesta análise, foi selecionados 10°, 50° e 90° percentil do CDF (pontos 0.1, 0.5 e 0.9 do gráfico) por número de UE para uma melhor visualização do resultados.

- **MRT em canal não estruturado:** A Figura 19 ilustra a importância do agrupamento de estações base. Ao conectar os usuários apenas às estações base mais

próximas diferentemente da sem critério de seleção onde todas as BSs se conectam a todos os UEs. Essa métrica reduz o número de conexões e, conseqüentemente, a interferência. Com isso, o MRT sofre menos com interferência, e em um regime com menos de 20 usuários, o MRT consegue atingir ganhos maiores quando comparado aos resultados obtidos sem agrupamento. Essa análise destaca a relevância de considerar estratégias de agrupamento na otimização do desempenho das redes de comunicação, especialmente em cenários com alta densidade de usuários.

Quando o número de usuários é maior que 20, observa-se a saturação vista anteriormente, porém em um patamar mais elevado em comparação com o caso sem agrupamento. Isso indica que o limitar a conexão entre UE e a BS (linha tracejada) oferece vantagens no desempenho do MRT, mesmo em situações com um maior número de usuários, ao proporcionar uma redução na interferência e, conseqüentemente, melhorar a eficiência da rede.

- **MRT em canal estruturado:** Na Figura 20, o agrupamento foi testado no canal definido pela Equação 3.5, e de maneira similar, observa-se a importância do agrupamento para um número menor que vinte UEs. No entanto, mesmo com o agrupamento, o MRT apresenta um desempenho ruim para cenários com muitos usuários. Isso ocorre devido à condição de canal extremamente desafiadora nesse caso, como explicado em na seção 5.1.2.1, no tópico do canal estruturado com MRT.
- **ZF em canal não estruturado:** De maneira similar ao que ocorreu com o MRT, o desempenho do ZF também se beneficiou do agrupamento. Para o canal não estruturado, a rede atingiu um desempenho melhor, desde que a relação entre o número de usuários e antenas fosse respeitada. No entanto, quando essa condição é violada, ou seja, quando o número de antenas é menor que o número de usuários, a rede apresentou uma perda de desempenho, como mostrado na Figura 21, com isso não apresenta ganhos que a formação de feixe pode proporcionar (MARZETTA, 2010).

Isso indica que, embora o agrupamento possa melhorar o desempenho tanto do MRT quanto do ZF limitando a conexão pela distância (linha tracejada no gráfico) em relação a todas as BS se conectando a todos os UE (linha contínua), é essencial considerar a relação entre o número de usuários e antenas para garantir uma eficiência adequada da rede. Caso contrário, a interferência e a limitação dos recursos disponíveis podem prejudicar significativamente o desempenho geral do sistema.

- **ZF em canal estruturado:** Neste cenário da Figura 22, é possível ver um comportamento semelhante com o canal não estruturado porém possui uma performance pior devido o canal ser estruturado e apresentar um modelo de canal mais realista.

### 5.1.4 *K-Means*

Nesta seção, avaliamos o desempenho da rede utilizando os métodos de formação de feixes MRT e ZF em conjunto com a técnica de agrupamento baseada em *K-means*. Essa abordagem combina as vantagens dos dois precodificadores com um método de agrupamento eficiente, buscando otimizar o desempenho da rede em diferentes cenários e condições de canal.

- **MRT com canal não estruturado:** Na Figura 23, o método de seleção onde a BS utiliza *K-Means* usando dois, três e quatro grupos (*clusters*), nesse cenário o *K-Means* auxiliou o MRT melhorar a performance para poucos UEs que em outros cenários com o mesmo precodificador.
- **ZF com canal não estruturado:** Na Figura 24, é perceptível o aumento em relação a seleção utilizando o limiar, com um pico entre 120  $[\frac{bit}{Hz}]$  com trinta e dois UEs no sistema. Em comparação com resultado da Figuras 21 e 22, o resultado é o mais consistente mesmo ao passar do pico, diferentemente dos cenários sem o uso do *K-Means*.

## 5.2 Ambiente 2

### 5.2.1 Resultados

Tabela 3 – Valores utilizados para a simulação do Ambiente 2

Variável	Descrição	Valor*	Unidade
$f_c$	Frequência central	28	GHz
$P$	Potência alocada para cada base	40	dBm
$B$	Largura de banda	144	MHz
$N_o$	Ruído Branco	-127	dBm
$gap$	Distância de uma BS a outra	15	m
$mc$	Número de execuções para aplicação	1000	-
$b$	Número de BSs	9	-
$n$	Número de antenas	64	-
$u$	Número de usuários	[1:10]	-
$u_{kmeans}$	Número de usuários no <i>k-means</i>	[1:10]	-

\* Os vetores são representados entre colchetes, em caso de grande quantidade é utilizado uma definição em *Python* [começo : fim].

Além dos cenários criados, utilizamos uma frequência utilizada por sistema de rede local sem fio que frequentemente são acessadas usando protocolos 3GPP TR38.901 com  $f = 28$  GHz e  $B = 144$  MHz. Todo o sistema possui uma potência de  $P = 40$  dBm a ser distribuída entre as 9 BSs, as quais contém 64 antenas em cada e as bases são distanciadas a 50 metros uma da outra.

Para a simulação, o código foi escrito na linguagem *Python* onde realizamos os cálculos para estimação do canal  $mc$  vezes para obtermos uma melhor aproximação dos resultados. Na tabela 2, temos as variáveis utilizadas na simulação e seus respectivos valores.

A partir dos conceitos acima, é possível criar um ambiente de simulação baseado no Ambiente 2 onde foi testado em cenários diferentes:

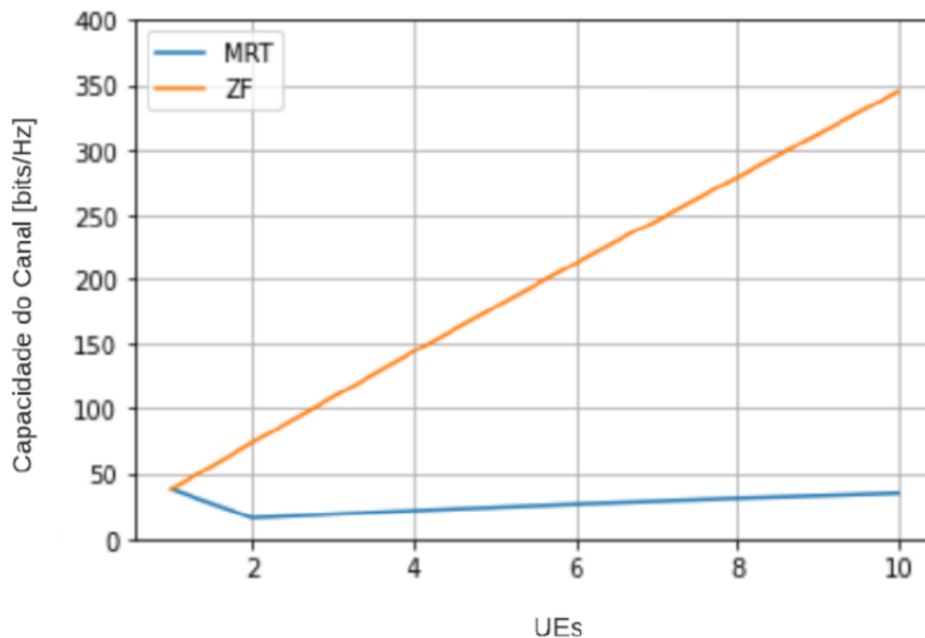


Figura 25 – Canal gerado no HermesPy utilizando sem critério de seleção

## 5.3 Discussões

### 5.3.1 Sem critérios de seleção

Na Figura 25, a resposta ao canal com base no 3GPP TR38.901 tem um comportamento parecido com o da Figura 18, onde apesar de existir uma certa limitação do canal o ambiente favorece na performance pois a distância entre a BS e o UE é menor que no Ambiente 1.



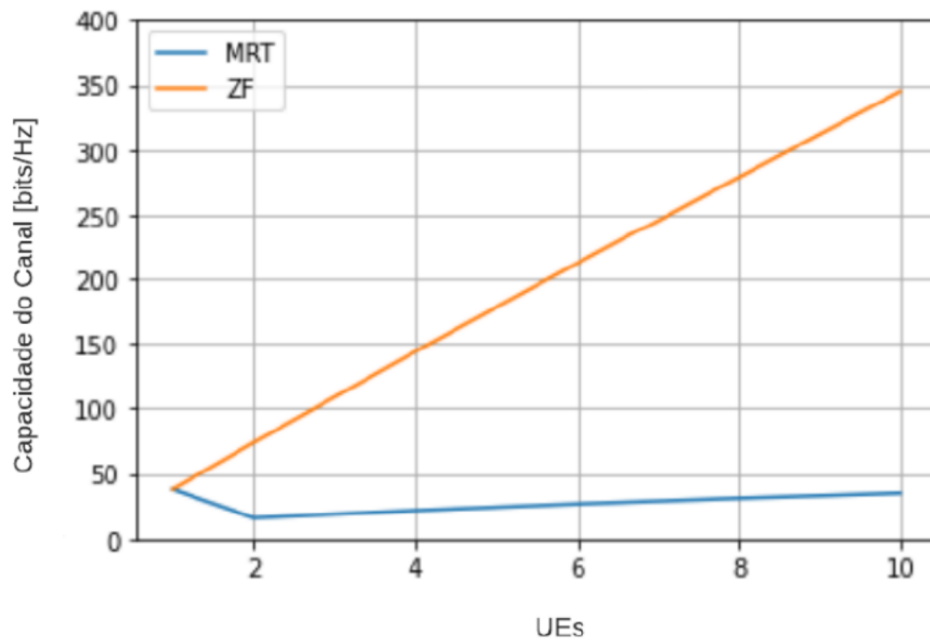
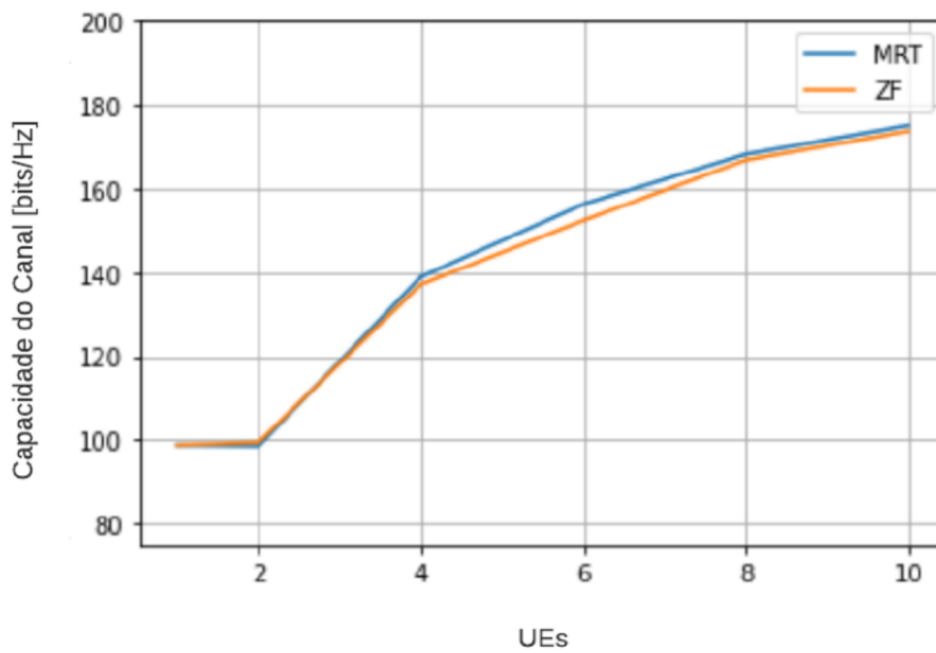


Figura 26 – Canal gerado no HermesPy limitando a distância de transmissão

Figura 27 – Canal gerado no HermesPy e utilizando o método *KMeans*

### 5.3.2 Limite de distância

O resultado da Figura 26 se assemelha ao do sem critério de seleção pois, a área de cobertura de uma BS onde o raio é dado pela distância de uma BS a outra, em relação a área do Ambiente 2 é de 79% e o Ambiente 1 que é de 39%, possível ver na 28, fazendo mais conexões que o necessário e aumentando a presença de interferência nas interações.

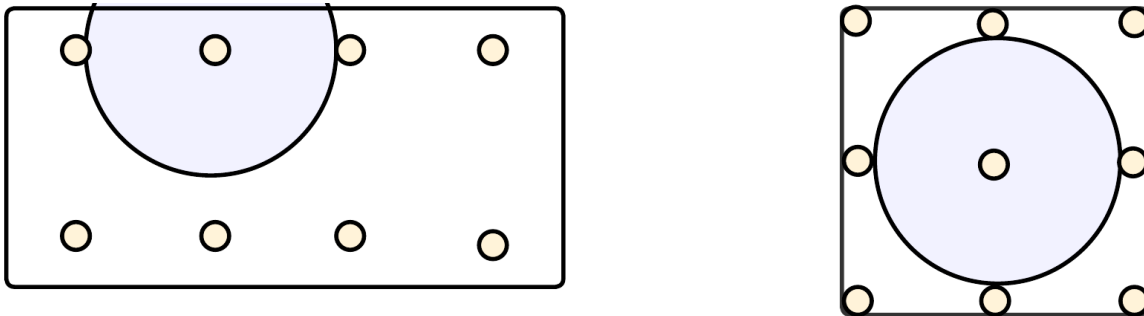


Figura 28 – Vista superior dos ambientes com visão da área de cobertura de uma BS

### 5.3.3 *K-Means*

Na Figura 27 pode-se observar um declínio na capacidade de canal utilizando ZF, sendo semelhante ao cenário 5.1.4 quando comparado ao 5.1.3. Entretanto, no MRT houve uma melhora considerável quando comparado com outros métodos de seleção.

Nesta seção, é possível observar que a técnica de agrupamento baseada em *K-means* trouxe benefícios ao desempenho do MRT. Sendo particularmente interessante, pois, do ponto de vista da complexidade computacional, o MRT é uma abordagem mais atrativa em comparação ao ZF.

## 6 Conclusão

Esse trabalho pretendeu entender os métodos de seleção de feixe com MRT e ZF, buscando melhorar a SE e diminuir o ruído, a partir de simulações geradas em canais estruturados e não estruturados.

Para se atingir uma compreensão de avaliar e implementar o sistema de comunicação CF-mMIMO, com diferentes métodos de precodificação para o estudo nos diferentes casos e definiu-se três objetivos específicos. O primeiro, implementar solução de formação de feixe com MRT e ZF, sendo possível reproduzir tais técnicas com aplicação do cálculos na simulação. Em ambos as precodificações, a grande quantidade de UE interfere na qualidade do canal, pois as interferências entre os canais acaba saturando (MRT) ou atenuando (ZF) a capacidade do canal.

Ademais, outro objetivo analisado neste trabalho foi implementar métodos de seleção de feixe limitando a distância da BS e pela inteligência artificial *K-means*. Com base nos resultados da Figuras 28 a 27, podemos concluir que a combinação do MRT e ZF com técnicas de agrupamento, como o *K-means*, pode melhorar o desempenho da rede CF-mMIMO. Essa abordagem equilibra eficiência e complexidade computacional, tornando-se uma solução promissora para os diferentes métodos de seleção de feixe.

Avaliando capacidade de canal em diferentes cenários, o MRT apesar de ser menos complexo em termos computacionais, pode se beneficiar do agrupamento *K-means* segundo a Figura 27, proporcionando um desempenho aprimorado em diversos cenários. O ZF, por sua vez, também apresentou melhorias no desempenho quando combinado com o *K-Means*, embora seja importante considerar a relação entre o número de usuários e antenas para garantir a eficiência adequada da rede.

As simulações foram testadas em três modelos de canal: o primeiro, o modelo não estruturado ou modelo de *Rayleigh*; o segundo, o modelo estruturado com um percurso; e o terceiro, o modelo de canal do 3GPP. Neste último, verificou-se que o MRT atingiu desempenho similar ao ZF quando empregado o *K-means*. Isso aponta que o MRT combinado ao *K-means* pode prover uma solução de custo computacional e eficiência atrativa para redes CF-mMIMO, contribuindo para o desenvolvimento de soluções de comunicação mais robustas e eficientes no futuro.

Ao aprofundarmos neste tema, fica evidente a eficácia do método de seleção de feixes *K-Means*, tornando-se importante implementá-lo no mundo real para compará-lo com a simulação. Além disso, é crucial testar tanto o sistema CF-mMIMO distribuído quanto o sistema centralizado.

# Referências

3GPP. *3GPP TR38.901*. [S.l.]: 3GPP, 2022. v. 17. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 35.

ADLER, J.; KRONAUER, T.; BARRETO, A. N. Hermespy: An open-source link-level evaluator for 6g. *IEEE Access*, IEEE, v. 10, p. 120256–120273, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 35.

ANDREWS, J. G. et al. Are we approaching the fundamental limits of wireless network densification? *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 54, n. 10, p. 184–190, 2016. Citado na página 27.

BENSON, K. Phased array beamforming ics simplify antenna design. *Analog Dialogue*, v. 53, n. 1, p. 10–13, 2019. Citado na página 28.

BJÖRNSSON, E.; HOYDIS, J.; SANGUINETTI, L. Massive mimo networks: Spectral, energy, and hardware efficiency. *Foundations and Trends in Signal Processing*, Now Publishers Inc. Hanover, MA, USA, v. 11, n. 3-4, p. 154–655, 2017. Citado 6 vezes nas páginas 13, 26, 29, 30, 33 e 34.

BJÖRNSSON, E.; SANGUINETTI, L. *HermesPy: A Python package for Massive MIMO simulations*. 2021. <<https://hermespy.org/>>. Citado na página 25.

CHEN, S. et al. A survey on user-centric cell-free massive mimo systems. *Digital Communications and Networks*, Elsevier, 2021. Citado na página 30.

ERNFORS, E. *Radio stripes – ericsson*. 2019. Disponível em: <<https://www.ericsson.com/en/blog/2019/2/radio-stripes>>. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 31.

FOSCHINI, G. J.; GANS, M. J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas. *Wireless personal communications*, Springer, v. 6, n. 3, p. 311–335, 1998. Citado na página 36.

GARG, V. *Wireless communications & networking*. [S.l.]: Elsevier, 2010. Citado na página 37.

GUNNARSSON, S. et al. Channel hardening in massive mimo: Model parameters and experimental assessment. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, IEEE, v. 1, p. 501–512, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 29.

INTERDONATO, G. *Cell-Free Massive MIMO: Scalability, Signal Processing and Power Control*. [S.l.]: Linköping University Electronic Press, 2020. v. 2090. Citado 6 vezes nas páginas 13, 24, 27, 28, 30 e 31.

JOHAM, M.; UTSCHICK, W.; NOSSEK, J. A. Linear transmit processing in mimo communications systems. *IEEE Transactions on signal Processing*, IEEE, v. 53, n. 8, p. 2700–2712, 2005. Citado na página 36.

JR, R. W. H.; LOZANO, A. *Foundations of MIMO communication*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 27.

- KRIEGEL, H.-P.; SCHUBERT, E.; ZIMEK, A. The (black) art of runtime evaluation: Are we comparing algorithms or implementations? *Knowledge and Information Systems*, Springer, v. 52, p. 341–378, 2017. Citado na página 40.
- LO, T. K. Maximum ratio transmission. In: IEEE. *1999 IEEE international conference on communications (Cat. No. 99CH36311)*. [S.l.], 1999. v. 2, p. 1310–1314. Citado na página 36.
- MARZETTA, T. L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas. *IEEE transactions on wireless communications*, IEEE, v. 9, n. 11, p. 3590–3600, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 24, 28 e 52.
- NGO, H. Q. et al. Cell-free massive mimo: Uniformly great service for everyone. In: IEEE. *2015 IEEE 16th international workshop on signal processing advances in wireless communications (SPAWC)*. [S.l.], 2015. p. 201–205. Citado na página 31.
- NGO, H. Q.; LARSSON, E. G.; MARZETTA, T. L. Aspects of favorable propagation in massive mimo. In: IEEE. *2014 22nd European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*. [S.l.], 2014. p. 76–80. Citado na página 29.
- PAULRAJ, A. J.; KAILATH, T. *Increasing capacity in wireless broadcast systems using distributed transmission/directional reception (DTDR)*. [S.l.]: Google Patents, 1994. US Patent 5,345,599. Citado na página 27.
- PEPPER, R. *Cisco visual networking index (VNI) global mobile data traffic forecast update*. [S.l.], 2013. Citado na página 26.
- PERSON. *Phased array beamforming ICS simplify antenna design*. 2019. Disponível em: <<https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/phased-array-beamforming-ics-simplify-antenna-design.html>>. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 29.
- RAHIM, M. K. A. et al. Antenna array at 2.4 ghz for wireless lan system using point to point communication. In: IEEE. *2007 Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics*. [S.l.], 2007. p. 1–4. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 35.
- VEEN, B. D. V.; BUCKLEY, K. M. Beamforming: A versatile approach to spatial filtering. *IEEE assp magazine*, IEEE, v. 5, n. 2, p. 4–24, 1988. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 30.