

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES  
*CAMPUS* PATOS DE MINAS

SAMUEL DAVI DE LIMA

**ANÁLISE E SIMULAÇÃO DOS ASPECTOS DE  
TRANSMISSÃO DE SINAIS 5G EM MACRO CÉLULAS EM  
AMBIENTES URBANOS**

Patos de Minas - MG

2023

SAMUEL DAVI DE LIMA

**ANÁLISE E SIMULAÇÃO DOS ASPECTOS DE  
TRANSMISSÃO DE SINAIS 5G EM MACRO CÉLULAS EM  
AMBIENTES URBANOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como pré-requisito para a graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Renan Alves dos Santos

Patos de Minas - MG

2023

SAMUEL DAVI DE LIMA

**ANÁLISE E SIMULAÇÃO DOS ASPECTOS DE  
TRANSMISSÃO DE SINAIS 5G EM MACRO CÉLULAS EM  
AMBIENTES URBANOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como pré-requisito para a graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Renan Alves dos Santos

Aprovado em \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2023.

Membros da Banca:

---

Prof. Dr. Renan Alves dos Santos  
(Orientador – FEELT – UFU)

---

Prof. Dr. Pedro Luiz Lima Bertarini  
(Membro – FEELT – UFU)

---

Prof. Dr. André Antônio dos Anjos  
(Membro – FEELT – UFU)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela oportunidade única de vida e saúde, à compreensão e apoio incondicional dos meus pais que muito me ajudaram ao longo deste percurso. Dedico a eles, as honrarias dos sucessos e conquistas que estão por vir, além do encorajamento a persistir em meio as dificuldades enquanto graduando, grato, principalmente pelos princípios que me foram ensinados. À minha digníssima esposa pela consideração e paciência, devido ao tempo oportuno que escolhi destinar aos meus estudos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Renan Alves dos Santos, pela grande parceria, compreensão, ajuda e grande incentivo, além do direcionamento, expressar a minha gratidão, pela dedicação, conhecimento, comprometimento, e pela variedade de ideias quanto a este trabalho.

Aos professores que tenho grande prestígio e admiração. Foram os alicerces do conhecimento que obtive até o presente momento, além das experiências em salas de aula, laboratórios e projetos que compactuaram com a solidificação do meu aprendizado. São valores estes aprendidos que terão uma grande importância profissional.

Aos colegas que se tornaram amigos na Universidade. Expressar a minha gratidão e o prazer de conhecer, conviver e aprender através das diversas experiências que compartilhamos. Vivências estas que acrescentaram em muito à minha formação profissional e que com certeza serão mais do que boas recordações.

A Universidade Federal de Uberlândia – *Campus* de Patos de Minas, pela disponibilização do ensino gratuito com qualidade e excelência e demais, a todo o corpo docente pela dedicação e comprometimento em ofertar o curso de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações.

# RESUMO

---

Atualmente a crescente demanda por maiores taxas de transmissão de dados tem se tornando um ponto de interesse de grandes empresas e provedores. Os serviços e aplicações atuais como Internet das coisas (IoT), *e-commerce*, automação industrial com base na Indústria 4.0, ampliação do IPV6, aplicações que requerem altas taxas de transferência (*throughput*) em tempo real, computação em nuvem (*cloud computing*) estão se tornando cada vez mais implementadas. Para que os fatores qualitativos destas aplicações sejam alcançados, a implementação de novas tecnologias em detrimento das passadas, torna-se algo crucial para suprir as necessidades empregadas pelas novas demandas. Como potencial solução dessas demandas a quinta geração da telefonia móvel celular (5G), tem as perspectivas de ampliar as capacidades de taxas de dados aplicadas as conexões de dados móveis. Além disso, o 5G visa prover maior conectividade e cobertura em área (mesmo em locais remotos) e redução da latência nas transmissões. Assim tendo em vista este campo de estudos tão atual, esse trabalho de conclusão de curso tem o objetivo estudar os aspectos de propagação de sinais 5G na faixa de 3,5GHz (uma das bandas definidas pela Anatel para a tecnologia no território brasileiro), utilizando o cenário urbano de alta densidade de usuários com conexão de banda larga aprimorada (eMBB), aplicado na cidade de Patos de Minas – MG. Evidentemente os resultados obtidos mostram as capacidades das ordens de modulações alcançadas para até 256-QAM utilizando o canal físico de downlink PDSCH, nos diferentes cenários sem a correção e com correção do ângulo de downtilt, aplicados aos modelos de propagação *Freespace* e *Close-in*, possibilitando com a utilização de portadoras agregadas e camadas MIMO, o alcance de taxas de dados de pico superiores à 1Gbps dadas as condições de BER inferior à  $10^{-6}$ .

**Palavras-chave:** 5G. Propagação. MIMO. Micro-ondas. 3,5GHz. PDSCH. eMBB.

# ABSTRACT

---

Currently, the growing demand for higher data transmission rates has become a point of interest for large companies and providers. Current services and applications such as Internet of Things (IoT), e-commerce, industrial automation based on Industry 4.0, expansion of IPV6, applications that require high throughput in real time, cloud computing are becoming increasingly implemented. In order for the qualitative factors of these applications to be achieved, the implementation of new technologies to the detriment of past ones, becomes something crucial to meet the needs employed by the new demands. As a potential solution to these demands, the fifth generation of cellular mobile telephony (5G) has the prospect of expanding the capabilities of data rates applied to mobile data connections. In addition, 5G aims to provide greater connectivity and area coverage (even in remote locations) and reduced latency in transmissions. Thus, in view of this very current field of study, this course completion work aims to study aspects of propagation of 5G signals in the 3.5GHz band (one of the bands defined by Anatel for technology in Brazilian territory), using the urban scenario of high density of users with enhanced broadband connection (eMBB), applied in the city of Patos de Minas – MG. Evidently, the obtained results show the capabilities of the modulation orders reached for up to 256-QAM using the PDSCH downlink physical channel, in the different scenarios without correction and with correction of the downtilt angle, applied to the Freespace and Close-in propagation models, making it possible, with the use of aggregated carriers and MIMO layers, to reach peak data rates greater than 1Gbps given conditions of BER lower than  $10^{-6}$ .

**Keywords:** 5G. Propagation. MIMO. Microwave. 3,5GHz. PDSCH. eMBB.

# LISTA DE FIGURAS

---

---

Figura 2.1 – Configuração de um enlace, com estação base (BS), e um dispositivo usuário (UE).....	27
Figura 2.2 – Representação da disposição das macrocélulas.....	28
Figura 2.3 – Constelações para QPSK, 16-QAM, 64QAM e 256-QAM.....	33
Figura 2.4 – Modulações do 5G vs Hartley-Shannon.....	34
Figura 2.5 – Representação da disposição das macrocélulas.....	38
Figura 2.6 – Esquema de disposição geral dos elementos de antenas na forma matricial.....	39
Figura 2.7 – Disposição angular para transmissão de sinais.....	40
Figura 2.8 – OFDM.....	44
Figura 4.1 – Ponto de origem do arranjo de sites.....	48
Figura 4.2 – Layout de rede e anexação dos transmissores.....	49
Figura 4.3 – Diagramas de irradiação.....	51
Figura 4.4 – UE.....	51
Figura 4.5 – Mapa SINR com modelo de propagação “Freespace”.....	53
Figura 4.6 – Mapa SINR com modelo de propagação “Close-in”.....	54
Figura 4.7 – Trajetória para a análise de percurso.....	56
Figura 4.8 – SINR para cenários com SCD e CCD.....	57
Figura 4.9 – Capacidade do Canal Para os diferentes modelos de propagação e cenário.....	58
Figura 4.10 – Probabilidade de erro de Bit BER, com modulações QPSK, 16-QAM, 64-QAM e 256-QAM.....	58
Figura 4.11 – BER para FR-SCD e FR-CCD.....	59
Figura 4.12 – BER para CI-SCD e CI-CCD.....	60
Figura 4.13 – Análise de percurso para FR.....	61
Figura 4.14 – Análise de percurso para CI.....	62
Figura 4.15 – Constelação FR-SCD.....	64
Figura 4.16 – Constelação FR-CCD.....	64
Figura 4.17 – Constelação CI-SCD.....	65
Figura 4.18 – Constelação CI-CCD.....	66
Figura 4.19 – Taxa de dados de pico para FR-SCD e FR-CCD.....	67
Figura 4.20 – Taxa de dados de pico para CI-SCD e CI-CCD.....	68
Figura 4.21 – Taxa de dados de pico para FR-SCD e CI-CCD.....	69

# LISTA DE TABELAS

---

---

Tabela 2.1 – Descrição técnica das modulações suportadas para o Canal Físico do 5G.....	32
Tabela 2.2 – Faixas de frequências para FR1 e FR2. ....	34
Tabela 2.3 – Numerologia com SCS e Prefixo Cíclico. ....	36
Tabela 2.4 – Quantidade de SLOT por SCS. ....	36
Tabela 2.5 – Quantidade de N_RB. Para Bw=20MHz.....	37
Tabela 2.6 – Dados de simulação aplicados ao cenário de alta densidade urbana para a Banda Larga Aprimorada eMBB conforme ITU. ....	41
Tabela 2.7 – Valores para OverHead em FR1 e FR2. ....	43
Tabela 3.1 – Descrição do Hardware. ....	47
Tabela 4.1 – Células com correção de posições aplicadas manualmente.....	50
Tabela 4.2 – Média linear da cobertura SINR para cenários SCD e CCD. ....	54
Tabela 4.3 – Pontos geográficos inicial e final da trajetória. ....	55
Tabela 4.4 – Dados das análises Figura 4.13 e 4.14.....	62
Tabela 4.5 – Dados gerais das análises conforme Figura 4.13 e 4.14. ....	63
Tabela 4.6 – Definição das variáveis para cálculo da taxa de dados de pico .....	66
Tabela 4.7 – Eficiência espectral.....	69



# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

---

---

16-QAM	<i>16th order quadrature amplitude modulation</i>
1G	1º Geração de Dispositivos Móveis
256-QAM	<i>256th order quadrature amplitude modulation</i>
3D	3 Dimensões
3GPP	<i>The 3rd Generation Partnership Project</i>
4G	4º Geração de Dispositivos Móveis
5G	5º Geração de Dispositivos Móveis
64-QAM	<i>64th order quadrature amplitude modulation</i>
5GC	5G Core
ABG	<i>Alfa-Beta-Gama</i>
ACFs	Autocorrelação temporal
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
AWGN	<i>Additive white Gaussian noise</i>
BER	<i>Bit error rate</i>
BS	<i>Base Station</i>
CCD	Com Correção de Downtilt
CCFs	Correlação cruzada espacial
CI	Close-in
CI-CCD	Modelo Close-in com Correção de Downtilt
CIF	Coefficiente de atenuação ponderado por frequência
CP-OFDM	<i>Cyclic Prefix-Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
DFT-OFDM	<i>Discrete Fourier Transform-Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>

DFT-s-OFDM	<i>Discrete Fourier Transform-Spread-Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
DL	<i>Downlink</i>
EIRP	<i>Effective Isotropic Radiated Power</i>
eMBB	<i>Enhanced Mobile Broadband</i>
eRAC	<i>Enhanced Remote Area Communications</i>
UE	<i>User Equipment</i>
EVM	<i>Error Vector Magnitude</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
FR1	<i>Fraquency Range 1</i>
FR2	<i>Fraquency Range 2</i>
FR-CCD	Modelo Freespace com correção de Downtilt
gNB	<i>gNodeB</i>
IMT-2020	<i>International Mobile Telecommunications-2020</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IPV6	<i>Interne Protocol Version 6</i>
ISD	<i>Inter site-distance</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
Jitter	Variação estatística no atraso de entrega de dados em uma rede
LOS	<i>Line of sight</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MIMO	<i>multiple input, multiple output</i>
mMTC	<i>Massive Machine-Type Communications</i>
M-QAM	<i>Ary-Quadrature Amplitude Modulation</i>
MU-MIMO	<i>Multi User MIMO</i>

NR	<i>New Radio</i>
NLOS	<i>Non-Line-of-Sight</i>
NSA	<i>5G non-standalone</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OH	<i>Overhead</i>
PBCH	<i>Physical Broadcast Channel</i>
PDCCH	<i>Physical Downlink Control Channel</i>
PDSCH	<i>Physical downlink shared channel</i>
PL	<i>Path Loss</i>
PLE	<i>Path Loss Exponent</i>
PRB	<i>Physical Resource Block</i>
PSDs	<i>Power Spectral Density</i>
PUCCH	<i>Physical Uplink Control Channel</i>
PUSCH	<i>Physical Uplink Shared Channel</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
RF	Radio Frequênci
SCD	Sem Correção de Downtilt
SCS	<i>Sub Carrier Spacing</i>
SINR	<i>Signal Interference + Noise Ratio</i>
SLOT's	Conjunto de símbolos
SNR	<i>Signal Noise Ratio</i>
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
TRxP	<i>Transmission Reception Point</i>
UE	<i>User Equipment</i>
UL	<i>Uplink</i>
UMa	<i>Urban Macro</i>

UMi *Urban Micro*

URLLC *Ultra-Reliable and Low Latency Communications*

# LISTA DE SÍMBOLOS

---

$P_{Rx}$	Potência Recebida
$P_{Tx}$	Potência Transmitida
$G$	Ganho
$A$	Atenuações
$LM$	Margem de operação do Enlace
$L_{path}$	Somatório das perdas entre Transmissor e Receptor
$TH_{Rx}$	Mínimo de sinal para operação do Enlace
$\lambda$	Comprimento de onda
$d$	Distância
$A_{el}$	Perdas pelo modelo “ <i>Freespace</i> ”
$PL^{CI}$	Potência recebida para modelo “ <i>Close-in</i> ”
$n$	Expoente de perda de caminho
$\chi_{\sigma}^{CI}$	Variável aleatória Gaussiana de média 0
$\sigma$	Desvio padrão
$FSPL$	Perdas no espaço livre
$P$	Potência
$N$	Ruído
$I$	Interferência
$C$	Capacidade do Canal
$S_{QPSK}(t)$	Símbolos QPSK
$S_i(t)$	Símbolos M-QAM
$E_s$	Energia de símbolo
$T_s$	Tempo de símbolo

$R_b$	Taxa de bits
$E_b$	Energia de Bit
$N_0$	Potência do ruído
$\eta$	Eficiência Espectral
$\mu$	<i>Numerology</i>
$N_{slot}^{sub-quadro,\mu}$	Quantidade de SLOT's por sub-quadro
$N_{RB}$	Quantidade de blocos de recurso
$T_x$	Transmissão de Sinais
$R_x$	Recepção de Sinais
<i>antHeight</i>	Comprimento da Antena
<i>txPowerDBm</i>	Potência de transmissão em decibel miliwatt
<i>dg.H</i>	Distância Horizontal
<i>dg.V</i>	Distância Vertical
Bw	Largura de Banda
$\phi''$	Ângulo de coordenada horizontal
$\theta''$	Ângulo de coordenada vertical
$\varphi_{3dB}$	Ângulo de abertura horizontal
$\theta_{3dB}$	Ângulo de abertura vertical
$f_o$	Frequência de Operação
$A_{E,H}$	Padrão de Irradiação Horizontal
$A_{E,V}$	Padrão de Irradiação Vertical
$A_m$	Inclinação Máxima de Atenuação
$A''$	Padrão de Irradiação
<i>SLA</i>	Coefficiente de atenuação
$J$	<i>Carrier Aggregation Band</i>
$v$	<i>Layers</i>

$Q_m$	<i>Modulation Order</i>
$f_s$	<i>Scalling Factor</i>
$T_s^\mu$	Tempo de duração do Símbolo OFDM
$N_{PRB}^{Bw(j),\mu}$	Alocação de RB em largura de banda
$OH^j$	<i>Overhead</i>

# Sumário

CONCEITOS INTRODUTÓRIOS.....	18
1.1 INTRODUÇÃO .....	18
1.2 PROBLEMATIZAÇÃO .....	20
1.3 TEMA DO PROJETO.....	23
1.4 OBJETIVOS.....	23
1.4.1 Objetivos Gerais .....	24
1.4.2 Objetivos Específicos.....	24
1.5 JUSTIFICATIVAS.....	25
1.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	25
REFERENCIAL TEÓRICO .....	26
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	26
2.2 CANAL RÁDIO MÓVEL .....	27
2.3 TELEFONIA MÓVEL CELULAR.....	28
2.4 PARÂMETROS DE DESEMPENHO.....	29
2.4.1 Link Budget.....	29
2.4.2 Modelos de Propagação.....	30
2.4.3 Sinal-ruído interferência.....	31
2.4.4 Modulações.....	32
2.4.5 BER.....	35
2.4.6 Eficiência espectral.....	35
2.5 5G NR.....	36
2.5.1 Layout De Rede .....	37
2.5.2 Arranjo de Antenas .....	38
2.5.3 Parametrização.....	40
2.5.4 Análise da Taxa de dados de Pico do 5G NR .....	41
2.6 OFDM .....	43



2.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	44
MATERIAIS E MÉTODOS .....		45
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	45
3.2	METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO .....	45
3.3	RECURSOS NECESSÁRIOS .....	46
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	47
RESULTADOS E DISCUSSÕES .....		48
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	48
4.2	CONFIGURAÇÃO DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO.....	48
4.2.1	Definição do ponto central.....	48
4.2.2	Criação e configuração dos transmissores:.....	50
4.2.3	Arranjo de antenas.....	50
4.2.4	Receptor .....	51
4.2.5	Ajustes dos parâmetros dos Mapas SINR.....	52
4.3	ANÁLISE DOS CENÁRIOS COM SCD E CCD .....	54
4.4	ANÁLISE COM TRAJETÓRIA LINEAR.....	55
4.4.1	Análise da SINR SCD e CCD.....	56
4.4.2	Análise da Capacidade do Canal.....	57
4.4.3	Análise da BER.....	58
4.4.4	Análise da Ordem de Modulação.....	60
4.4.5	Análise da Constelação.....	63
4.4.6	Análise da Taxa De Dados De Pico .....	66
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	70
CONCLUSÕES, CONTRIBUIÇÕES E TRABALHOS FUTUROS .....		71
5.1	CONCLUSÕES.....	71
5.2	PROPOSTAS PARA CONTINUAÇÃO DESTE TRABALHO .....	73
REFERÊNCIAS .....		75
APÊNDICE A: CÓDIGO MATLAB .....		78

# Capítulo 1

## CONCEITOS INTRODUTÓRIOS

---

### 1.1 INTRODUÇÃO

Com a evolução e desenvolvimento constante de novas tecnologias no cenário mundial, a sociedade tem-se tornado adepta as mudanças estabelecidas nos padrões qualitativos de serviços no âmbito tecnológico. Tais serviços buscam atender as demandas geradas pela população em geral e estabelecer melhorias quanto as tecnologias atuais, em detrimento das tecnologias anteriores. Para os padrões atuais é necessária uma alta taxa de transferência de dados (*throughput*) para suportar todas as aplicações móveis que utilizam a *internet* como meio de comunicação para *download* e *upload* de dados (1).

Em busca de soluções para atender à crescente demanda por conectividade, pesquisadores e empresas do ramo de tecnologia do mundo todo tem se dedicado a prover o próximo passo na evolução das telecomunicações. Dentro desse contexto o desenvolvimento da quinta geração da telefonia móvel celular (5G) vem tendo grande destaque nos últimos anos.

Com recentes avanços tecnológicos no âmbito nacional, observa-se a busca por conectividade em diversos segmentos da sociedade. Essa constatação leva a necessidade de investimentos que ficou claramente em evidência com o leilão do 5G realizado pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) no ano de 2021. O 5G irá coexistir com as tecnologias de comunicações móveis anteriores. Obtendo recordes de arrecadações por partes do governo, este cenário, evidencia um mercado altamente promissor, dado o interesse de grandes operadoras e empresas em atender as demandas requeridas pelo mercado brasileiro (2).

Se comparado as tecnologias anteriores, o 5G apresenta grandes evoluções em termos de largura de banda, capacidade de conexões, margem de cobertura suportando várias conexões simultâneas e altas taxas de transferência de dados (3). Dentre essas mudanças, espera-se que a velocidade de conexão atinja 10Gbps ou mais, representando um aumento significativo de 100

vezes na capacidade de envio de dados, quando comparadas com a quarta geração da telefonia móvel celular (4G) (4).

Este novo horizonte amplo de novas capacidades que a tecnologia 5G irá oferecer, abre caminhos para uma alta gama de oportunidades para o surgimento de novas aplicações e serviços escaláveis. Com este desenvolvimento, repercutirá em grandes concentrações de dispositivos conectados à nuvem simultaneamente (4). O aumento simultâneo das conexões em tempo real, tem demandado maior adequação das novas tecnologias de hardware por partes do setor operacional das operadoras, sendo imprescindível o acompanhamento tecnológico para os novos padrões requisitados pelo 5G. Tais demandas, dizem respeito, às novas performances, capacidades de processamento, automatização de processos dinâmicos, que flui diretamente na capacidade e qualidade da conectividade. Com desempenho escalável, esta nova adequação de equipamentos permitirá obter melhores resultados nos parâmetros importantes de desempenho, tais quais, *jitter* (atraso da informação enviada em rede), latência (tempo necessário para que uma informação seja respondida por um dispositivo em rede), que tornam a navegabilidade no mínimo satisfatória para o usuário (5).

Todas as características descritas anteriormente corroboram diretamente nos parâmetros basilares dos seguintes cenários para o 5G, Ultra-Reliable Low-Latency Communication (URLLC), Massive Machine-Type Communications (mMTC) e Enhanced Mobile Broadband (eMBB) (6). Tais requisitos correspondem às especificações apresentadas pelo Projeto de Parceria de 3º Geração (3GPP) seguindo a tecnologia 5G NR (*New Radio*), baseadas nos requisitos de desempenhos padronizadas pelo padrão Internacional de Telecomunicações Móveis em 2020 (IMT-2020).

Com o cumprimento dos requisitos estabelecidos pela padronização conforme a IMT-2020, o sinal 5G tornará possível a ampliação e inovação da *internet* das coisas (IoT), aplicação escalável do IPV6, aumento do comércio de aparelhos compatíveis com a nova tecnologia, dentre funções de automação industrial respectivos à indústria 4.0, aprimoramento do *e-commerce* (comércio e transações financeiras utilizando internet), e aplicações de tempo real que vão utilizar a nuvem como ambiente de aplicação (7). Tais perspectivas do 5G, ampliam os horizontes da aplicação da tecnologia, criando assim a necessidade de constantes inovações em inúmeros segmentos de serviços e aplicações.

## 1.2 PROBLEMATIZAÇÃO

Tendo em vista as grandes mudanças previstas para a tecnologia 5G, é necessário um levantamento eficaz das características operacionais comparadas com as diferentes regiões onde o sinal irá propagar, bem como as faixas de espectro de frequência onde ocorrerão as transmissões. Com a grande variabilidade topográfica dos centros urbanos (principalmente no cenário brasileiro), torna-se necessário levantar modelos que descrevam como o sinal irá se propagar, podendo assim prever e levantar parâmetros que descrevam os aspectos qualitativos nas transmissões. Estudos devem ser levantados para a análise das condições específicas de cada ambiente em relação à propagação do sinal utilizado no 5G. Fatores geográficos, ambientais e climáticos devem ser levados em consideração. Além disso, a faixa de frequência de operação é outro ponto crucial (7).

No Brasil, as frequências alocadas para o 5G são as faixas de espectro de radiofrequência de 3,5GHz e 26GHz leiloadas pela ANATEL (2). Dentre essas frequências, destaca-se a faixa de 3,5GHz como uma das mais importantes, principalmente no contexto de macro células para cobertura de áreas com grande concentração de usuários. Em termos geográficos, o Brasil é um país com vasto território, com diferentes ambientes relacionados a densidade de usuários, com grande variabilidade topográfica e climática, influenciando na propagação dos sinais de ondas eletromagnéticas (9). A análise de tais condições naturais corroboram para o levantamento de novos estudos que possibilitam gerar resultados que contribuam para o aperfeiçoamento da cobertura celular do 5G em ambientes regionais. Tal compreensão advém dos inúmeros cenários possíveis, com uma grande gama de variabilidade geográfica urbana, topológica e climática.

Tendo em vista a necessidade de se propor e analisar modelos de propagação voltados ao 5G, é possível encontrar na literatura (principalmente a partir de 2015 quando intensificou-se os estudos sobre a tecnologia) inúmeros trabalhos sobre o tema. Com esse intuito, realizou-se um breve levantamento bibliográfico sobre o tema, procurando mostrar a evolução dos estudos ao longo dos anos, desde o ano de 2015.

Em 2015, G. R. Maccartney *et al.* apresentaram um trabalho em que medições de propagação em ondas milimétricas foram realizadas nas faixas de frequência de 28GHz e 73GHz em um ambiente de escritório interno típico no centro de Brooklyn, Nova York, no campus da Universidade de Nova York (10). O estudo apresenta análise de atenuação voltadas para redes sem fio internas ultradensas, para futuras bandas em ondas milimétricas. Foram apresentados modelos de atenuação para transmissões

direcionais e omnidirecionais, com configuração de frequência única e multifrequência. Conforme os resultados apresentados, os modelos resultam maior proximidade das medições reais em comparações diretas com os modelos de propagação apresentados pela ITU (*International Telecommunication Union*) e 3GPP.

Em 2016, S. Sun *et al.* apresentaram três candidatos a modelos de atenuação em larga escala para uso em todo o espectro de rádio de micro-ondas e ondas milimétricas (11): o modelo alfa-beta-gama (ABG), o modelo de distância de referência de espaço livre *Close-In* (CI) e o modelo CI com um expoente de atenuação ponderado por frequência (CIF). Esses modelos foram estudados para uso em órgãos de padronização como o 3GPP e para uso no projeto de sistemas sem fio de quinta geração em cenários de macrocélula urbana, microcélula urbana, escritórios internos e shopping centers. A precisão e a sensibilidade desses modelos foram quantificadas usando medidas de 30 conjuntos de dados de medição de propagação de 2GHz a 73 GHz em distâncias que variam de 4m a 1238m. Os resultados mostraram que o modelo CI com distância de referência de 1m é adequado para ambientes externos, enquanto o modelo CIF é mais adequado para modelagem interna. Os autores afirmam que o trabalho mostra que uma mudança sutil não altera a forma matemática dos modelos ITU/3GPP existentes e oferece uma análise muito mais fácil e intuitiva, além de melhor estabilidade dos parâmetros do modelo e melhor precisão em testes de sensibilidade em uma vasta gama de frequências de micro-ondas e ondas milimétricas.

Em 2017, T. S. Rappaport *et al.* apresentaram um trabalho que fornece uma visão geral dos recursos dos sistemas de comunicação 5G operando em ondas milimétricas (12). Segundo os autores são apresentados os primeiros resultados e os principais conceitos de redes 5G, tendo como objetivo a apresentação da modelagem do canal radio móvel. Foram descritos parâmetros de propagação e modelos de canal para entender a propagação de ondas milimétricas sem linha de visada, propondo modelos de atenuação em larga escala e penetração do edifício na faixa de 0,5GHz a 100GHz.

Em 2018, P. Zhang *et al.* apresentaram um estudo sobre características de propagação espaço-temporal de pequena escala (em ambientes internos) em várias bandas candidatas ao 5G em ondas milimétricas (13). Os autores realizaram medição de canal em ambientes internos para capturar o atraso e os ângulos de partida e chegada dos caminhos a partir de uma sonda de canal projetada sob medida. Segundo eles, os resultados da medição apresentaram excelentes concordância com o esperado. Em seguida, os dados obtidos nas medições foram utilizados para modelar parâmetros de

canal dependentes de frequência para diferentes combinações, incluindo atraso quadrático médio e espalhamento angular. Assim, a publicação demonstra uma modelagem que completa o modelo de canal ITU/3GPP para frequências maiores que 6GHz, além de ajudar a compreender os impactos da frequência e da polarização na propagação em ondas milimétricas.

Em 2019, H. Jiang *et al.* apresentaram um modelo de canal de entrada e saída múltipla de cilindro tridimensional (3D) para analisar o efeito de objetos interferentes em ambientes de propagação de macrocélulas (14). Em tal modelo, o sinal recebido é construído como uma soma dos componentes com propagação em linha de visada e os componentes refletidos pelos objetos (propagação sem linha de visada). Além disso, investigou-se as propriedades estatísticas de propagação do canal, a função de correlação cruzada espacial (CCFs) de dois componentes de propagação diferentes, a função de autocorrelação temporal (ACFs) e densidades de espectro de potência Doppler (PSDs). Segundo os autores, os resultados analíticos numéricos das propriedades de propagação se ajustam muito bem aos resultados da simulação, o que demonstra que o modelo 3D proposto é prático para caracterizar os canais de macrocélulas 5G reais.

Em 2020, P. Zhang *et al.* apresentaram uma análise empírica das características de propagação em duas áreas suburbanas com vegetação de diferentes tipos, além de frações de cobertura vegetal distintas, em bandas de ondas milimétricas para 5G (28GHz e 39GHz) (15). O modelo apresentado fornece uma formulação para a atenuação dependente de distância (com uma variação aleatória gaussiana para desvanecimento de sombra), utilizado de acordo com os dados de medição direcional e omnidirecional de potência máxima, explorando assim expoentes significativos de atenuação na presença de vegetação. Segundo os autores, os resultados da medição melhoram os modelos ITU/3GPP existentes para cenários de macro células suburbanas em bandas de ondas milimétricas.

Em 2021, E. I. Adegoke *et al.* apresentaram um estudo sobre sinais 5G NR (New Radio) para avaliar a magnitude do vetor de erro (EVM), o que pode ser utilizado para analisar a taxa de erros de bits, em um ambiente rural/urbano com linha de visada (16). A análise consistiu em medidas de atenuação em função da dispersão no tempo, considerando as mesmas localizações do receptor. Com os resultados de medição apresentados, os autores concluem que o estudo embasa projetistas de sistemas a

projetar receptores eficientes, estimar a cobertura e fornecer serviços adequadamente usando 5G NR na faixa de frequência sub-6GHz, da qual se destaca 3,5GHz.

Os estudos de propagação apresentados na literatura (com os listados) tem como objetivo propor modelos matemáticos que forneçam a atenuação em redes 5G, objetivando prever com base nos parâmetros a qualidade nas transmissões. Em complemento a isso, trabalhos como o de Y. Banday *et al.* apresentam o estudo de propagação em localidades geográficas específicas (17). Assim, é possível, a partir de modelos de atenuação e das características geográficas e atmosféricas de uma região, analisar como seria os aspectos relevantes que enfatizaria a qualidade de uma transmissão 5G nessas condições.

Esse trabalho de conclusão de curso visa realizar um estudo análogo ao de Y. Banday *et al.*, todavia, ajustando os dados de simulação para as características do 5G no Brasil, bem como o relevo associado à topografia da cidade de Patos de Minas - MG. Dessa forma, tem-se e visa-se contextualizar os estudos de propagação para as condições mais próximas da nossa realidade.

### **1.3 TEMA DO PROJETO**

Este trabalho de conclusão de curso tem como tema a análise e simulação dos aspectos de transmissão de sinais 5G em macro células em ambientes urbanos. O trabalho irá fomentar uma análise em decorrência dos fatores geográficos, com base na densidade de usuários da cidade de Patos de Minas, aplicando conceitos de propagação de sinais, nas faixas de frequências licenciadas ao sinal 5G pela Anatel, para o território nacional utilizando a cobertura por macrocélulas semelhantes a tecnologia do 4G. Para tal, será utilizado a faixa de frequência em centrada em 3,5GHz, associada à faixa de FR1.

### **1.4 OBJETIVOS**

Este projeto tem como objetivo, simular o cenário eMBB de propagação do sinal 5G na cidade de Patos de Minas. Contudo, tem-se como fatores que implicam na variabilidade qualitativa da conexão, os aspectos geográficos como a topografia regional, além dos aspectos atenuantes do sinal, que envolvem parâmetros de posicionamento dos pontos centrais das células que correspondem aos pontos de transmissão e recepção de sinais (Transmission Reception Point - TRxP's), que definem a visada direta e indireta, além de especificamente os modelos de propagação que descrevem as características do canal.

A simulação tornará possível a identificação e análise de fatores veiculados a intensidade, ruído, interferências, distância, entre outros aspectos analisados a partir do sinal

em uma faixa específica de FR1 em 3,5GHz, que contribuirão para comparar aspectos práticos com as expectativas provenientes do 5G. Com os resultados, espera-se compreender as dificuldades de implementação da tecnologia 5G na região, empregabilidade dos recursos, além da avaliação técnica de localização prováveis de TRxP's, que vão inferir diretamente na conectividade relativa à cobertura 5G.

### 1.4.1 Objetivos Gerais

Os objetivos gerais desse trabalho estão ligados à compressão dos aspectos do 5G no cenário regional brasileiro, principalmente na faixa de frequências no entorno de 3,5GHz, e em análises de simulação sobre a transmissão de sinais desta tecnologia em ambientes urbanos utilizando a cobertura por macrocélulas.

### 1.4.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são baseados na análise numérica, utilizado o programa Matlab, analisando os aspectos da transmissão de sinais 5G em macrocélulas em ambientes urbanos na cidade de Patos de Minas conforme especificações da RESOLUÇÃO DA ANATEL Nº 742, DE 1º DE MARÇO DE 2021. Assim, tem-se como etapas objetivas:

- (a) A Criação do Ambiente de Simulação; caracterizado nos parâmetros pré-dispostos para análise do sinal 5G NR conforme a ITU (19), que vão permitir identificar com base em diferentes modelos de propagação, parâmetros de desempenho, sendo evidenciados;
  - i. Na criação de elementos de antenas resultando em mapas SINR (relação sinal-ruído com interferência).
  - ii. Parametrização dos transmissores utilizando-se de uma matriz de antena retangular N por N compatível com a utilização do MIMO no 5G.
  - iii. Criação dos receptores caracterizados pelos parâmetros funcionais definidos para UE.
  - iv. Levantamento de possíveis correções e ajustes em parâmetros de simulação.
  - v. Criação de diferentes mapas SINR usando modelos de propagação Freespace e Close-in.
  
- (b) Análise dos Mapas SINR; caracterizados pelos modelos de propagação Freespace e Close-in, resultando no levantamento de dados comparativos além de analisar os fatores práticos de desempenho esperados para o 5G, evidenciados em;
  - i. Obter dados e qualificar parâmetros comparativos de SINR.
  - ii. Analisar a probabilidade de erro de bits (BER) respectivas ao sinal 5G, com base nos parâmetros definidos pela ITU.
  - iii. Analisar as taxas de transmissão de dados relacionadas com as diferentes ordens de modulação utilizada pelo 5G NR.



- iv. Avaliar os resultados obtidos em simulação para o contexto prático real.
- v. Definir pontos importantes de melhorias, quanto à inserção da tecnologia no cenário regional.

## **1.5 JUSTIFICATIVAS**

Com estudos aprofundados nos temas que compreendem o espectro de frequência em micro-ondas associados as faixas de utilização do 5G NR, além de estudos que corroboram nas análises do sinal 5G em cenários ultradensos, observa-se na literatura, poucos estudos associados aos cenários regionais brasileiros. O intuito do estudo permite avaliar as condições e cenários diversificados associados aos fatores de desempenho que permite avaliar o sinal 5G em ambientes regionais.

## **1.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste capítulo foram abordados os assuntos relacionados à contextualização deste trabalho, além da definição do projeto e o escopo da linha de pesquisa abordada. Dessa forma, tem-se o fornecimento de um seguimento para o referencial teórico abordado no capítulo 2. Em conformidade com o capítulo 2, o capítulo 3 aborda a metodologia de execução conforme fundamentação e métodos dos conceitos apresentados. Evidentemente os resultados e a discussão conforme a fundamentação teórica e a metodologia de execução são evidenciadas no capítulo 4, e a conclusão apresentados no capítulo 5 seguidos das contribuições e das propostas de continuação para este trabalho.

# CAPÍTULO 2

## REFERENCIAL TEÓRICO

---

### 2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo a análise numérica de propagação de sinais 5G em macrocélulas aplicadas ao cenário urbano de alta densidade eMBB, operando na faixa de 3,5GHz na cidade de Patos de Minas - MG. Para tal, inicialmente é necessário levantar um referencial teórico a respeito dos aspectos do 5G e das etapas a se realizar as simulações, tendo como base os conceitos apresentados em (18).

O canal rádio móvel abrange todos os conceitos mais amplos das telecomunicações, que permite a definição do envio de informações de um ponto a outro via sinal de rádio frequência (RF). A ideia de canal rádio móvel configura-se e adequa-se ao estudo e análise com base nas diferentes tecnologias, os parâmetros necessários que visam o funcionamento de determinado sistema de transmissão de sinais por ondas eletromagnéticas (19). Logo, pode ser subentendido como o meio e características de dispositivos móveis pelo qual a informação é enviada e recebida. Considerando esta base ampla, a telefonia móvel celular aborda os conceitos do Canal Rádio Móvel. Desde as proeminências das tecnologias de 1º Geração da Telefonia Móvel Celular (1G) até à 5º Geração (5G), os desdobramentos e entendimento de novas configurações físicas, modelos estruturais e aos avanços científicos, permitiram o crescente avanço da tecnologia no desenvolvimento de novos dispositivos, que por sua vez, acompanharam as características de cada geração, em termos de capacidade, desempenho, velocidade e processamento (19).

Contudo, todo sistema tecnológico, assim como a Telefonia Móvel Celular, se adequa com base em uma ou várias arquiteturas, sendo subentendida como o modelo de operação estrutural, lógico e funcional, em que seu uso decorre das diferentes necessidades de aplicações (19). Para este trabalho, o foco será no 5G NR requisitada pelas especificações conforme IMT-2020 *Release 15* que especifica o NR 5G *Stand-Alone* (SA), com um sistema de rádio NR 5G complementado por um núcleo de rede de nova geração, o *5G Core* (5GC) e o *5G non-standalone* (NSA), que são integradas ao núcleo de rede das gerações anteriores ao 4G LTE (20). Quanto às diferentes arquiteturas, há a predominância de diferentes configurações, que se

adequam em conformidade com os avanços e aplicabilidades em detrimento das novas atualizações (19).

A avaliação dos parâmetros de desempenho é especificada com base nas taxas de transmissão, cobertura, conectividade, latência, compatibilidade e demais (5) (19). Tais pré-disposições a estes requisitos ampliam as análises das características que fomentam as diferenças em termos de desempenho da tecnologia 5G comparadas as tecnologias anteriores.

## 2.2 CANAL RÁDIO MÓVEL

Um canal Radio Móvel é compreendido com base nos mecanismos que especificam a propagação de um sinal, correspondente ao sinal recebido pelo receptor, emitido pelo transmissor separados por uma distância. Evidenciando os efeitos de propagação que impacta diretamente no sinal estão associados os efeitos de variações aleatórias, interferências e fatores atenuantes. Em suma, pode ser compreendido como os aspectos que envolvem a propagação do sinal entre o transmissor e receptor. Evidentemente por não ser um processo estacionário, sendo considerado como um sistema linear variável no tempo, há variações nos parâmetros associados à intensidade do sinal, interferências, campo de visão, e outros. Contudo pode ser considerado como um sistema estacionário, em intervalos de tempo pequenos para análises pontuais. Aplicando ao contexto de telefonia celular, o canal utilizando para a telefonia celular pode ser móvel ou fixo conectadas diretamente à Estação Rádio Base (Base Station 5G - gNB) (20).

Figura 2.1 – Configuração de um enlace, com estação base (BS), e um dispositivo usuário (UE).



Fonte: (IMT, 2020).

Os efeitos respectivos às transmissões de sinais em RF são evidenciados conforme à visibilidade, reflexão, difração. Estas características permitem analisar os efeitos de multi-

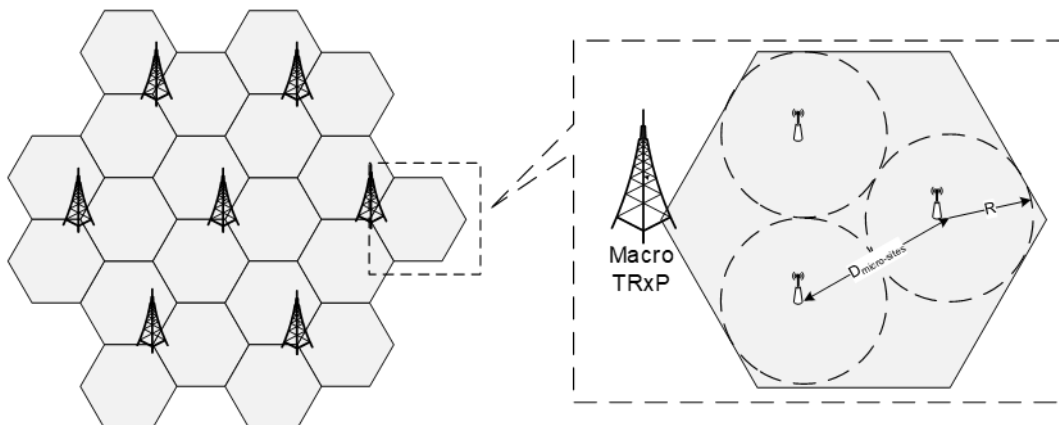
percurso, dadas as inúmeras multiplicidades de versões do mesmo sinal transmitido a ser captado pelo receptor, em devido às condições ambientes (21). Aspectos dos efeitos de sombreamento causados em função do relevo e as características topográficas são respectivos à cobertura de sinal (22). Contudo, tais fatores atenuantes do sinal possuem características importantes a serem analisadas na projeção de rádio enlaces, e como tal projetam as condições de funcionamento do canal rádio móvel (22).

## 2.3 TELEFONIA MÓVEL CELULAR

As características marcantes da telefonia móvel celular referidas ao 5G NR são as suas expectativas, já descritas nos capítulos anteriores semelhantes ao 4G (23).

Das principais características que definem os aspectos estruturais e de funcionamento do 5G estão as especificidades da estruturação celular: células no formato hexagonal com padrão de alocação dinâmica para macrocélulas e microcélulas (19). Tal recurso empregado, permite a adequação em rede de conexão de inúmeros dispositivos móveis simultaneamente conectados, com maior densidade em cobertura devido a quantidade dos transmissores e receptores de células (TRxP's), conforme pode ser visualizado na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Representação da disposição das macrocélulas.



Fonte: (IMT, 2020).

Dadas as condições das definições dos cenários especificados do 5G, eMBB, mMTC e URLLC, configurando um arranjo para alocação das TRxP's de acordo com o ponto central em junção de 3 células regulares constituindo um site, distintas, e separadas por uma distância ISD (24). Em outras palavras a formação das células regulares, ou seja, conjunto de 3 células individuais forma um site com uma TRxP central.

Para efeitos associados as atenuações do sinal, tem se diversos fatores, como especificados de forma generalizada anteriormente, respectivos à própria dispersão do canal, difração e reflexão. Para as interferências são compreendidas como sinais em rádio frequência indesejados na banda de transmissão, causados por outros sistemas de RF, ou mesmos sinais espúrios causados por dispositivos elétricos e eletrônicos. Contudo para os modelos de propagação visam analisar a potência média, que o receptor (UE) recebe (25). Ressalta-se que os fatores atenuantes, decorrem não somente da falta de visada direta, mas da intensidade da potência do sinal, obstáculos, e outros, mas como também da frequência de operação, visto que para frequências altas, a dificuldade de transmissão dados os fatores atenuantes são maiores (25).

Com estes conceitos estabelecidos a priori, definem-se os principais problemas de interferências aplicadas as comunicações móveis, que são interferências de Canal adjacente e Co-Canal respectivas as características do canal, além das interferências de Inter-Modulação e Inter-Símbolo que são oriundas dos fatores dinâmicos de *hardware* (25). Contudo, altas frequências, acima de FR1 são utilizados para modelos *indoor* e microcélulas (Urban Micro - UMi), em decorrência da distância de enlace, potência de irradiação dos transmissores, e aspectos atenuantes para altas frequências (5) (20).

## 2.4 PARÂMETROS DE DESEMPENHO

### 2.4.1 Link Budget

Os parâmetros de desempenho, referem-se diretamente na intensidade do sinal recebido pelo receptor (26). Em conformidade com um canal rádio móvel, é possível traçar o balanço de potências (*Link Budget*) que especifica os parâmetros basilares de um enlace, na forma abrangente:

$$P_{Rx}(\text{dB}) = P_{Tx}(\text{dB}) + \sum G(\text{dB}) - \sum A(\text{dB}) \quad (2.1)$$

os somatórios dos  $G(\text{dB})$  e  $A(\text{dB})$  são respectivamente os ganhos e atenuações dados em dB. Para tais, ambos os parâmetros dependem do tipo de enlace, a depender se os ganhos podem ser de dispositivos ativos ou passivos, respectivamente amplificadores e antenas. Dadas tais condições, as atenuações são dadas em função de enlaces terrestres (26). Especificando a

Equação (2.1) para os sistemas de comunicações, tem-se que a LM do enlace, é relacionada na seguinte forma (26);

$$LM = EIRP - L_{Path} + G_{Rx} - TH_{Rx} \quad (2.2)$$

onde  $EIRP$  é a potência efetivamente irradiada em dBW ou dBm, dada por:

$$EIRP = P_{Tx} + G_{Tx} \quad (2.3)$$

em que  $P_{Tx}$  é a potência irradiada em dBW ou dBm e  $G_{Tx}$  é o ganho da antena transmissora em dBi. O termo  $L_{Path}$  é o total da perda de caminho entre transmissor e receptor,  $G_{Rx}$  é o ganho do receptor em dBi. Por sua vez,  $TH_{Rx}$  é especificado como o mínimo de sinal requisitado para que a confiabilidade em termos de erro de bits esteja dentro dos valores necessários.

Conforme as principais características do canal rádio móvel, é necessário definir o modelo de propagação que compete a análise como um todo. Tal definição impacta diretamente no valor de  $L_{Path}$ . Por esse modo, na seção a seguir serão apresentados os modelos de propagação usados nesse trabalho.

## 2.4.2 Modelos de Propagação

Os modelos de propagação objetivam prever à intensidade do sinal recebido no receptor. Para este trabalho, destacam-se dois modelos: “*Freespace*” e “*Close-in*”.

- a) *Freespace*: O modelo “*Freespace*”, termo que no português refere-se as perdas de propagação no espaço livre, leva a relação para a potência recebida como sendo (26):

$$P_{Rx} = P_{Tx} \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_{Tx} G_{Rx} \quad (2.4)$$

em que em escala logarítmica pode-se quantificar as perdas pelo modelo “*Freespace*” como:

$$A_{el} \text{ (dB)} = 32,44 + 20 \log (f \text{ [MHz]}) + 20 \log (d \text{ [km]}) - G_{Tx} \text{ (dBi)} - G_{Rx} \text{ (dBi)} \quad (2.5)$$

onde  $f$  é a frequência e  $d$  é a distância do enlace.

(b) *Close-in*: O modelo de propagação *Close-in* (Ci) é uma modelagem estocástica estudado e proposto para uso em órgãos de padronização como exemplo o 3GPP. Tal modelo é utilizado no projeto de redes sem fio, em macrocélulas e microcélulas respectivamente, definidas como UMi e macrocélula urbana (Urban Macro – UMa) (27). O modelo Ci apresenta facilidade computacional, melhor sensibilidade para faixas extensas de frequências. Contudo a relação para a perda de caminho nesse modelo por ser escrita como:

$$PL^{CI}(f, d)(dB) = 10n \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + 20 \log_{10}\left(\frac{4\pi d_0 \times 10^9}{c}\right) + 20 \log_{10}(f) + \chi_{\sigma}^{CI} \quad (2.6)$$

em que  $d \geq d_0$ , e que  $d_0 = 1\text{m}$ , para que a estabilidade dos parâmetros em decorrer da análise se mantenha. Onde  $f$  é dado em Gigahertz,  $d_0$  é dado como distância de referência de espaço livre próximo,  $n$  indica o expoente de perda de caminho (PLE),  $\chi_{\sigma}^{CI}$  uma variável aleatória Gaussiana de média zero com um desvio padrão  $\sigma$  em dB. Com tudo o software Matlab utiliza o parâmetro de expoente de perda PLE, como sendo 2.9, e desvio padrão de 5.7dB para cenário UMa no formato sem visada direta (Line of sight - NLOS) (11)(27).

### 2.4.3 Sinal-ruído interferência.

A relação sinal-ruído interferência (SINR) é uma relação entre a potência do sinal requisitado comparada à potência do ruído acrescida de interferências externas ou internas (28). Entende-se que SINR é um fator expresso de margem viável da comunicação, pois está diretamente relacionado à energia de bit e a probabilidade de erro de bit (BER). Contudo, em termos gerais, a SINR, é caracterizada na forma:

$$SINR = \frac{P}{N + I} \quad (2.9)$$

em que  $P$  é a potência do sinal,  $N$  e  $I$  são, respectivamente, a potência do ruído da interferência. Como tal, também está associada a capacidade do canal, pelo qual a informação será enviada. Então caracterizando a capacidade do canal com ruído branco aditivo gaussiano (AWGN), com a SINR, tem-se que conforme a Lei de Hartley-Shannon (28).

$$C = B \log_2\left(1 + \frac{S}{N + I}\right) \quad (2.10)$$

## 2.4.4 Modulações

A depender da energia de bit respectiva à informação e à SINR, uma modulação arbitrária influencia diretamente na assertividade da informação propagada. Logo, neste cenário com diferentes índices de modulação influi diretamente na probabilidade de erro de bit BER. O 5G utiliza as seguintes modulações para *Downlink* e *Uplink* em *NR Physical Channel* (29) conforme Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Descrição técnica das modulações suportadas para o Canal Físico do 5G.

Direção	Canal Físico NR	Tipo de Modulação Suportada
<i>Downlink</i>	PBCH	QPSK
	PDCCH	QPSK
	PDSCH	QPSK, 16QAM, 64QAM ou 256QAM
<i>Uplink</i>	PUCCH	CP-OFDM: BPSK (PUCCH formato 1), QPSK (PUCCH formato 1/2)
		DFT-OFDM: $\pi/2$ -BPSK (PUCCH formato 3/4), QPSK (PUCCH formato 3/4)
	PUSCH	CP-OFDM: QPSK, 16QAM, 64QAM ou 256QAM
		DFT-s-OFDM: $\pi/2$ -BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM ou 256QAM

Fonte: (29).

Visto que técnicas de modulação visam gerar um sinal para que seja transmitido adequadamente no canal de comunicação. Logo para M-PSK e M-QAM, o aumento da ordem de modulação proporciona o aumento da eficiência espectral, permitindo a transmissão de uma taxa de dados maior em uma mesma banda de transmissão (30). Contudo o aumento da taxa implica no prejuízo em termos da eficiência de potência. Em suma, equivale-se dizer que para uma mesma potência de transmissão, a utilização de ordens maiores para as modulações, terão maior probabilidade de erro de bit associado. Em outras palavras, equivale-se dizer que *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK) e *M-ary Quadrature Amplitude Modulation* (M-QAM) são utilizados com maior afinidade, visto a capacidade de entregar uma maior quantidade de símbolos por ciclo de frequência (30). Matematicamente, os símbolos podem ser expressos para o QPSK:



$$S_{QPSK}(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos \left[ 2\pi f_c t + \frac{2\pi(i-1)}{M} \right] \quad (2.11)$$

em que  $0 \leq t \leq T_s$ , e  $i = 1, 2, 3, 4$  evidentemente, expandindo em termos trigonométricos e definindo as funções bases no intervalo de  $T_s$  logo, os 4 sinais podem ser expressos caracterizando número arbitrário de fases para a modulação QPSK (30):

$$S_{QPSK}(t) = \sqrt{E_s} \left[ \cos \left( \frac{2\pi(i-1)}{M} \right) \phi_1(t) - \sin \left( \frac{2\pi(i-1)}{M} \right) \phi_2(t) \right] \quad (2.12)$$

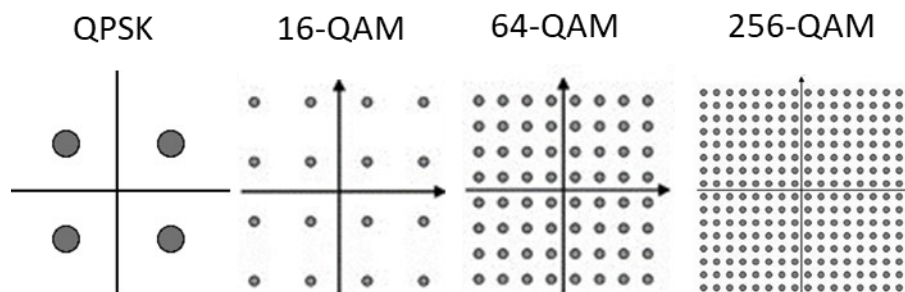
Como tal, para expressar matematicamente a modulação M-QAM, tem se que, a depender da ordem de modulação  $M$ , a quantidade de símbolos aumenta em um fator de  $2^k$ , em que  $k$  é o número de bits por símbolo, sendo  $k = \log_2(M)$  (30).

A forma geral definida para M-ary QAM pode ser expressa como:

$$S_i(t) = \sqrt{\frac{2E_{\min}}{T_s}} a_i \cos(2\pi f_c t) + \sqrt{\frac{2E_{\min}}{T_s}} b_i \sin(2\pi f_c t) \quad (2.13)$$

Em que  $0 \leq t \leq T_s$ , e  $i = 1$  até  $M$ . Contendo o par de funções bases  $\phi_1$  e  $\phi_2$  é possível gerar a constelação M-QAM, conforme a Figura 2.3.

Figura 2.3: Constelações para QPSK, 16-QAM, 64QAM e 256-QAM

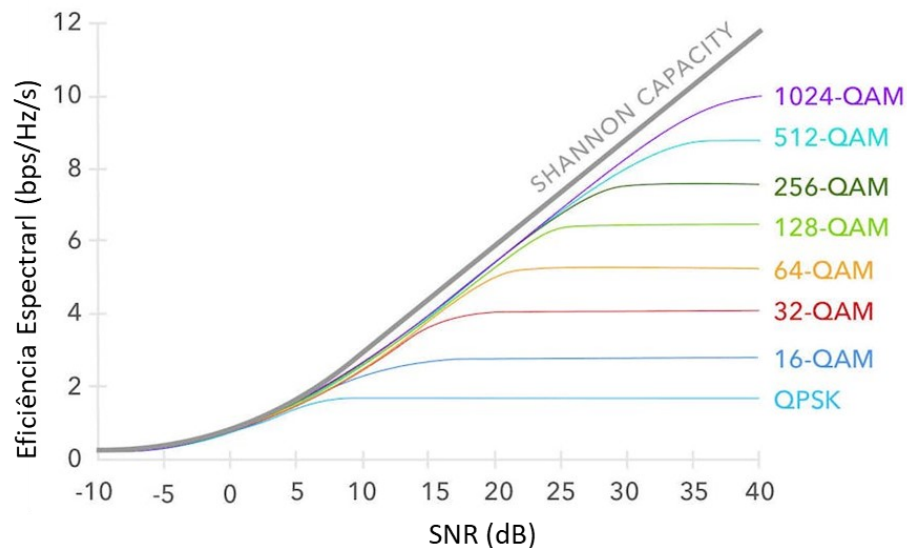


Fonte: Alterado pelo autor.

Segundo o teorema de Hartley-Shannon, considerando um canal em que  $R \leq C$ , onde a taxa de dados transmitidos  $R$  não supera a capacidade  $C$  do canal AWGN, especificamente, há limites da eficiência espectral para QPSK e M-QAM conforme a Figura 2.4 (30).

Os cenários compreendidos pela Figura 2.4, define que se  $R \leq C$ , então a informação que chega ao receptor, é inteligível com assertividade suficiente para compreensão da informação. Já extrapolando a função para  $R > C$ , o erro devido as condições do ruído e interferência no canal AWGN, são suficientes para comprometer a informação, tornando-a incompreensível (30)(31).

Figura 2.4: Ordem das Modulações vs Hartley-Shannon



Fonte: Alterado pelo autor (31).

Conforme Tabela 2.1, apresenta os tipos de canais físicos utilizados pelo 5G. Contudo o 5G NR utiliza o canal físico PDSCH incluindo os devidos tipos de modulações para *downlink*. Conquanto, para o espectro de frequência de funcionamento do 5G, as faixas de frequências são denotadas com base as faixas de frequência específicas de FR1 e FR2 na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Faixas de frequências para FR1 e FR2.

Faixa de frequência de Operação Designada	Faixa de Frequência Correspondente
FR1	410 MHz - 7125 MHz
FR2	24250 MHz – 52600 MHz

Fonte: (28).

### 2.4.5 BER

Para as medições práticas e da confiabilidade do enlace, analisa-se a taxa de erro de bits (BER). Este parâmetro evidencia, em termos probabilísticos o acerto da informação propagada no canal e recebida no receptor e que baseado nas equações anteriores, a BER relaciona-se diretamente com a SINR (28). Conforme definido anteriormente, com o aumento da taxa de transmissão com potência e banda de transmissão fixas, a probabilidade de erro de bit será maior. Logo, para o aumento da ordem de modulação  $M$ , é imprescindível o aumento da relação de  $E_b/N_0$ , uma vez que seja necessário manter a BER com margem definida (28).

Evidentemente, conforme a Tabela 2.1 para o canal físico NR PDSCH, a BER a ser analisada neste trabalho, compreende as modulações QPSK, 16QAM, 64QAM e 256 QAM. A BER matematicamente expressa para QPSK:

$$BER_{QPSK} = \frac{1}{\log_2(M)} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_b \log_2(M)}{N_o}} \operatorname{sen} \left( \frac{\pi}{M} \right) \right) \quad (2.14)$$

Semelhantemente, para a modulação M-QAM pode ser expressa como:

$$BER_{M-QAM} = \frac{2}{\log_2(M)} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \sum_{k=0}^{\sqrt{M}/2-1} \operatorname{erfec} \left( (2k+1) \sqrt{\frac{3 \log_2(M) E_b}{2(M-1) N_o}} \right) \quad (2.15)$$

### 2.4.6 Eficiência espectral

Eficiência espectral é definida como sendo a razão entre a taxa de transmissão e a banda ocupada por um determinado sistema de comunicação digital. Logo, a eficiência espectral quantifica o quanto é eficiente o enlace de comunicação, respectiva ao uso da taxa de dados  $R_b$  com a banda  $Bw$  do canal (3).

$$\eta = \frac{R_b}{Bw} \quad (2.16)$$

A unidade característica para eficiência espectral é expressa em bit/s/Hz.

## 2.5 5G NR

O 5G NR é estruturado conforme os parâmetros de operação. Contudo, tais parâmetros importantes, de forma geral para este trabalho, são evidenciados nos modelos de testes apresentados nos relatórios da ITU (33). Referenciando objetivamente, tem-se que:

- (a) *Numerologia*: Que define o espaçamento entre subportadoras (SCS) e o prefixo cíclico a ser utilizado.

Tabela 2.3: Numerologia com SCS e Prefixo Cíclico.

$\mu$	$\Delta f = 2^\mu \cdot 15 [kHz]$	Prefixo cíclico
0	15	Normal
1	30	Normal
2	60	Normal, Estendido
3	120	Normal
4	240	Normal

Fonte: (11).

- (c) *Número de Slots por sub-quadro (Sub-Frame)*: Define quantidade de SLOT's de prefixo cíclico por símbolos OFDM. A Tabela 2.4 define quantidade por sub-quadro.

Tabela 2.4: Quantidade de SLOT por SCS.

SCS	$N_{slot}^{sub-quadro, \mu}$
15	1
30	2
60	4
120	8
240	16

Fonte: (11).

- (d) *Número de blocos de Recurso (PRB's)*: Especifica a quantidade de PRB's máxima que podem ser alocados por espaçamento de sub-portadoras.

Ressalta-se que para ambiente Brasileiro irá depender da parametrização da ANATEL para o 5G com banda de frequência de 20MHz.

Tabela 2.5: Quantidade de  $N_{RB}$  para  $Bw = 20MHz$ .

SCS (KHz)	20MHz
	$N_{RB}$
15	106
30	51
60	24

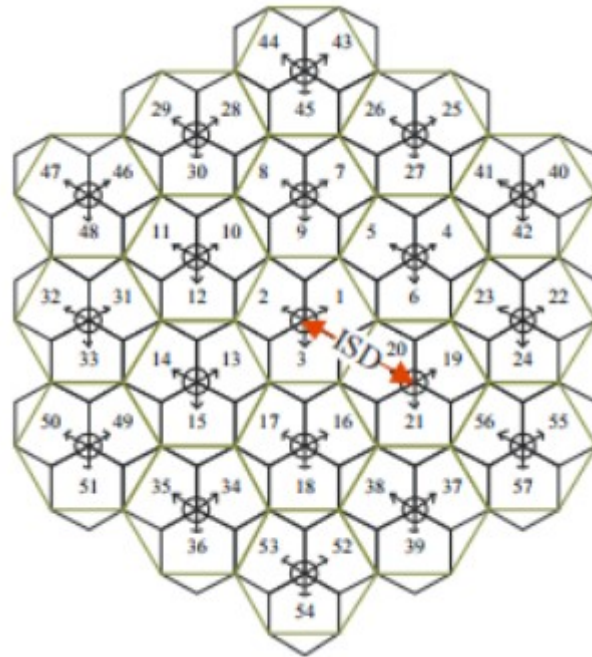
Fonte: (32).

Sendo necessário um levantamento detalhado da parametrização em conformidade com os cenários de testes apresentados, que pode ser observada de forma objetiva nos itens a seguir.

### 2.5.1 Layout De Rede

O estudo de propagação 5G NR para UMA de referência à reutilização do layout de rede de teste para tecnologias 4G definido no Relatório ITU-R M.2135-1 (35). O *layout* é composto por 19 sites em formato hexagonal, em que cada um é composto por 3 células (ver na Figura 2.5). Um dos parâmetros importantes da análise é a distância entre sites adjacentes (ISD). A ISD depende do cenário de teste, sendo que para o eMBB, conforme a Tabela 2.6, a ITU sugere ISD definida para 200m (25).

Figura 2.5 – Representação da disposição das macrocélulas.



Fonte: (MATHWORKS, 2020).

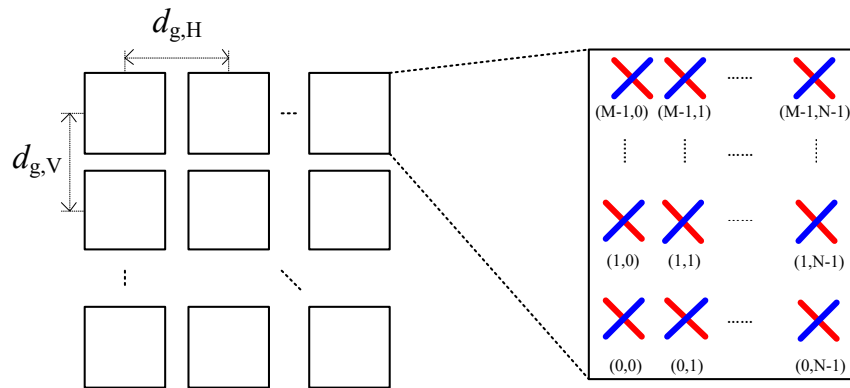
As predisposições para o layout de rede, aqui referenciadas dizem respeito ao cenário eMBB para o 5G NR. Contudo, para cenários envolvendo a UMi, a parametrização influencia diretamente nas faixas de frequência partindo da análise geral célula a célula (24).

## 2.5.2 Arranjo de Antenas

Os padrões requisitados pela ITU, também se referem às disposições dos formatos e quantidades de elementos de antenas, a fim de cumprir as legislações concernentes às potências para irradiação do sinal (11). Assim, tem-se o estabelecimento de modelos de antenas, subdividindo em antenas do tipo Estação Rádio Base ou simplesmente Estação Base (BS – *Base Station*) e do tipo Equipamento de Usuário (EU – *Multi-Antenna User Equipment*).

As antenas BS tipicamente são formadas por um arranjo de antenas, que representa vários elementos configuradas na forma e dimensões matriciais  $M \times N$  (24), onde  $M$  é o número de linhas e  $N$  o número de colunas, conforme a Figura 2.6. É possível observar os aspectos de construção de uma antena do tipo BS, onde  $d_{g,H}$  e  $d_{g,V}$  representam uniformemente a distância horizontal e vertical entre os centros de localização dos elementos de antenas, respectivamente.

Figura 2.6 – Esquema de disposição geral dos elementos de antenas na forma matricial.



Fonte: (Relatório ITU-R M.2135-1, 2017).

Conforme o número de elementos matricial  $M \times N$ , tem-se o diagrama de irradiação do sinal, o diagrama de irradiação horizontal de um elemento do arranjo é dado na seguinte forma (24):

$$A_{E,H}(\varphi'') = -\min \left\{ 12 \left( \frac{\varphi''}{\Phi_{3dB}} \right)^2, SLA \right\} \quad (2.17)$$

onde  $-180^\circ \leq \varphi'' \leq 180^\circ$ , representa a função mínima,  $\Phi_{3dB}$  é a abertura de feixe horizontal e  $SLA$  é a atenuação máxima do nível do lóbulo lateral. A forma geral do diagrama de irradiação vertical de um elemento do arranjo é especificada dada como (24):

$$A_{E,V}(\theta'') = -\min \left\{ 12 \left( \frac{\theta'' - \theta_{tilt}}{\theta_{3dB}} \right)^2, SLA \right\} \quad (2.18)$$

em que onde  $0^\circ \leq \theta'' \leq 180^\circ$ ,  $\theta_{3dB}$  é a abertura do feixe vertical de e  $\theta_{tilt}$  é o ângulo de inclinação. É importante destacar que  $\theta'' = 0^\circ$  aponta para o zênite (projeção vertical para cima a partir do ponto de referência) e  $\theta'' = 90^\circ$  aponta para o horizonte. O diagrama de irradiação que combina os planos vertical e horizontal é dado como (24):

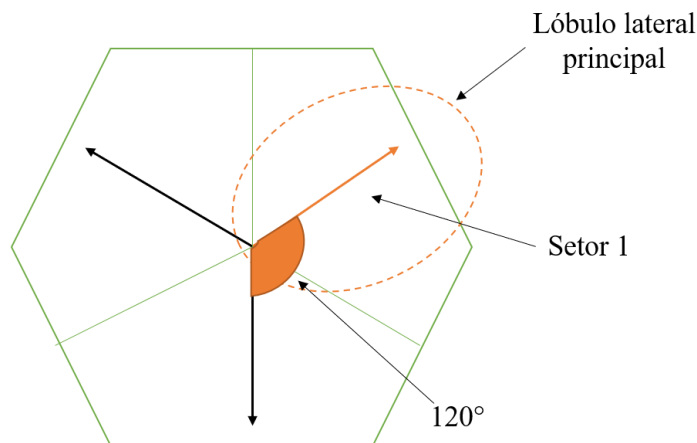
$$A''(\theta'', \varphi'') = -\min \left\{ -[A_{E,V}(\theta'') + A_{E,H}(\varphi'')], SLA \right\} \quad (2.19)$$

onde  $A(\theta'', \varphi'')$  é o ganho relativo da antena (dBi) de um elemento de antena na direção na  $(\theta'', \varphi'')$ .

Conforme as orientações descritas pela ITU no Relatório ITU-R SG05, o ângulo de meia potência ( $\theta_{3dB}$  e  $\varphi_{3dB}$ ) é prescrito como sendo  $65^\circ$  e o máximo lóbulo lateral é  $SLA = 30^\circ$  (para ambos os casos horizontal e vertical (24). Com isso, deve-se ter o ganho na direção de máxima irradiação como sendo de 8dBi, conforme apresentado na Tabela 2.6.

O Relatório ITU-R SG05 também apresenta que a orientação da antena deve ser definida como o ângulo entre o centro do lóbulo principal de irradiação e uma linha direcionada para leste dada em graus (ver na Figura 2.7, onde tem-se uma célula hexagonal e seus três transmissores). O ângulo aumenta no sentido horário.

Figura 2.7 – Disposição angular para transmissão de sinais.



Fonte: Adaptado pelo autor de (Relatório ITU-R M.2135-1, 2017).

Segundo Relatório ITU-R SG05 o elemento de antena do usuário, UE, deve apresentar diagrama de irradiação omidirecional para a faixa FR1 do 5G NR, de modo que é estipulado ganho 0dBi (conforme a Tabela 2.6). Isso implica que as antenas dos terminais móveis não devem concentrar a captura/irradiação de sinais em determinadas direções, podendo assim ter mesma forma de atuação independente da orientação do usuário.

### 2.5.3 Parametrização

As parametrizações conforme ITU são apresentadas na Tabela 2.6. A Tabela referenciada possui os dados dos cenários veiculados para testes da tecnologia. Em suma, a priori as informações listadas correspondem aos parâmetros selecionados, definidos e



necessários a serem utilizados neste trabalho. Contudo que para melhor detalhamento a Tabela completa pode ser consultada na referência (24).

Tabela 2.6: Dados de simulação aplicados ao cenário de alta densidade urbana para a Banda Larga Aprimorada eMBB conforme ITU.

Parâmetros	Densidade Urbana - eMBB
	Eficiência Espectral e Avaliações de Mobilidade
	Configuração A
Frequência da Portadora	1 layer (Macro) em 4 GHz
Altura da Antena BS	25 m
Total de potência de transmissão por TRxP	44 dBm para 20 MHz de banda 41 dBm para 10 MHz de banda
Parâmetros Adicionais para os Níveis de Sistemas Simulados	
Distância entre sites (ISD)	200 m
Número de antenas por elemento TRxP	Até 256 Tx/Rx
Número de Antenas UE	Até 8 Tx/Rx
Modelo de mobilidade UE	Velocidade fixa e idêntica $ v $ de todas as UEs da mesma classe de mobilidade, direção distribuída aleatoriamente e uniformemente.
Velocidades de interesse UE	Usuários internos: 3km/h Usuários ao ar livre (no carro): 30 km/h
Modelagem de interferência entre sites	Modelo Específico
BS Figura de ruído	5 dB
UE Figura de ruído	7 dB
Ganho do elemento de antena BS	8 dBi
Ganho do elemento de antena UE	0 dBi
Nível de ruído térmico	-174 dBm/Hz
Modelo de tráfego	Buffer completo
Simulação de banda	20 MHz para TDD, 10 MHz, +10 MHz para FDD
Comprimento da antena UE	Exterior das UEs: 1.5 m

Fonte: Alterado pelo autor de (IMT-2020, 2017).

## 2.5.4 Análise da Taxa de dados de Pico do 5G NR

Para o cálculo da taxa de dados de pico, ou seja, a taxa máxima, é representada matematicamente pela fórmula (32).

$$R_{b_{\max}} = 10^{-6} \sum_{j=1}^J \left( v_{Layers}^{(j)} \cdot Q_m^{(j)} \cdot f^{(j)} \cdot R_{\max} \cdot \frac{N_{PRB}^{Bw(j),\mu} \cdot 12}{T_s^\mu} \cdot (1 - OH^{(j)}) \right) \quad (2.20)$$

A Equação (2.20), define a taxa máxima de pico que corresponde ao que é transmitido pela TRxP para a UE. Os parâmetros da equação denotam quais são as características e configurações associadas ao enlace.

As variáveis respectivas a Equação (2.20), e seus atributos são definidas conforme (32):

**$J$**  - *Carrier aggregation band*: Um conjunto de uma ou mais bandas operacionais agregadas (CC) com um conjunto específico de requisitos técnicos. Valor máximo para o 5G NR é 16.

**$v$**  - *Layers*: Número máximo de camadas MIMO. Especificamente, o valor máximo corresponde ao número de antenas. Conforme estabelecido, valores de DL é 8 e para UL é 4 no 5G NR.

**$Q_m$**  - *Modulation Order*: Especifica a ordem da modulação correspondente com a Tabela 2.1.

**$f_s$**  - *Scaling Factor*: Utilizado para Mobilidade média e alta, e explicitamente, é um fator configurado pelas operadoras. Para este parâmetro os valores padronizados são 0.4, 0.75, 0.8 e 1.

**$R_{max}$**  : Depende da taxa de codificação. Assume a forma de  **$R/1024$** . Se a taxa de codificação é máxima, logo  **$R_{max}$**  assume o valor de 0.92578125.

**$\mu$**  - *Numerology*: Assume os valores correspondentes à Tabela 2.3, variando de 1 a 5.

**$T_s^\mu$** : Tempo de duração do símbolo OFDM em um sub-quadro para o valor de  **$\mu$** . Matematicamente representado

$$T_s^\mu = \frac{10^{-3}}{(14 \times 2^\mu)} \quad (2.21)$$

**$N_{PRB}^{Bw(j),\mu}$**  : Alocação máxima de RB em largura de banda, em que  **$\mu$**  representa a numerologia, e  **$Bw$**  é a largura de banda máxima suportada pela UE, com combinações de banda, para caso CC, ou banda determinada para parametrização conforme 3GPP 38.104. Contudo para este trabalho, seguindo as normativas da ANATEL, este parâmetro assume  **$Bw$**  com 20MHz em FR1 e  **$\mu$**  definido em 0 com 15KHz.

**$OH^j$**  - *Overhead*: Corresponde à sobrecarga dos canais de controle. Assume os seguintes valores:

Tabela 2.7: Valores para *OverHead* em FR1 e FR2.

<b>Direção</b>	<b>Faixa de Frequência</b>	<b>Valor nominal</b>
DL	FR1	0.14
DL	FR2	0.18
UL	FR1	0.08
UL	FR2	0.10

Fonte: (32).

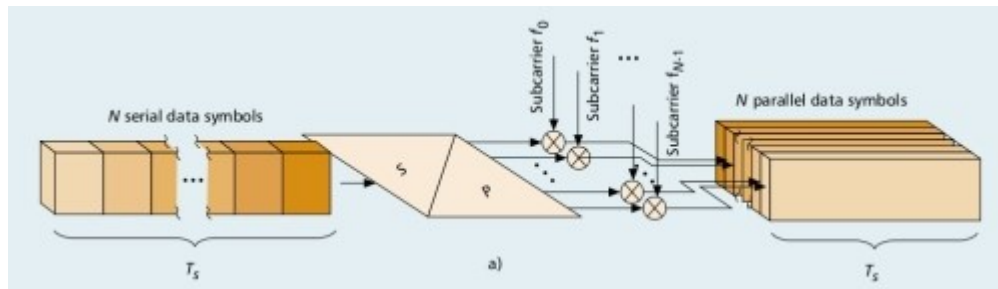
Com tais parâmetros de configurações, é possível prever a taxa máxima de pico do enlace 5G NR obedecendo as atribuições conforme (33)(34). Para estes casos as variáveis sobressalentes implícitas podem ser consultadas junto com seus parâmetros conforme 3GPP e ITU na referência (32), fugindo do escopo do trabalho o detalhamento completo.

## 2.6 OFDM

É uma técnica de modulação que permite a transmissão de informação em fluxos segmentados em vários canais com portadoras ortogonais com taxas menores (36). Evidentemente, a multiplexação por divisão de frequência ortogonal (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing - OFDM) é utilizado com base em suas vantagens, como a robustez ao fenômeno de multipercurso, dada a possibilidade de canais transmitirem simultaneamente taxas de dados variáveis, conforme a necessidade da transmissão. Dentre as modulações mais utilizadas no OFDM, estão as modulações de fase PSK e amplitude e fase QAM (36).

Há variações nas técnicas utilizando a aplicação direta do OFDM para o 5G. No 5G utiliza-se o CP-OFDM, com mesmas características funcionais do OFDM acrescidos de redundâncias na informação transmitida, permitindo uma assertividade maior na compreensão da informação que é recebida no receptor (36). Na Figura 2.8 é possível analisar o processo de segmentação dos dados para as portadoras ortogonais respectivas à transmissão utilizando OFDM.

Figura 2.8 – OFDM



Fonte: (36).

## 2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os processos que analisam o desempenho do enlace de maneira geral, a todos os fatores levantados anteriormente que evidenciam explicitamente à SINR, BER, eficiência espectral e constelações. Contudo, a análise do 5G NR, deve seguir estas parametrizações importantes, que se baseiam nas estruturas e características de funcionamento, como TDD ou FDD, frequência de operação, características técnicas de recepção do usuário, núcleo da rede, divisão do espectro, largura de banda, e o modelo de propagação a ser analisado.

Conforme referenciado no decorrer nos capítulos anteriores, foram abordados a teoria basilar necessária para compreensão e abordagem de forma a gerar os resultados em conformidade com a premissa deste trabalho. Ressalta-se que com as equações de forma geral das características do canal Rádio Móvel prospecta inúmeros caminhos para diferentes análises no contexto da tecnologia 5G.

Contudo, as Tabelas e informações características abordadas são fomentadas pela ITU como resultados e testes já confirmados pelos órgãos competentes, com base em cenários que contém alta densidade de pedestres e automóveis. Considerando estes referenciais teóricos, os objetivos da análise prática da simulação irão se interpor com estes dados, uma vez que o projeto irá adotar as especificações técnicas fornecidas pela ANATEL.

Por fim, considera-se que este referencial teórico possui uma abrangência necessária para desenvolvimento e compreensão de toda a perspectiva objetivadas no Capítulo 1, e enfatizada neste Capítulo 2, gerando uma base teórica necessária para elaboração dos próximos capítulos.

# CAPÍTULO 3

## MATERIAIS E MÉTODOS

---

### 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente trabalho objetiva implementar em simulação as características gerais de um cenário de cobertura para a rede 5G NR utilizando o padrão eMBB a partir do programa comercial Matlab. Respectivamente tem-se que os recursos são referências para o conteúdo teórico de simulação, é empregado com base em livros, dissertações, artigos e projetos, conforme discutido no capítulo 2.

### 3.2 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO

Empregando tais recursos teóricos e experimentais, conforme citado anteriormente, os resultados a serem apresentados serão analisados e comparados com as perspectivas teóricas de projeto. Portanto, realizado anteriormente um levantamento da teoria respectiva a cobertura 5G em ambientes urbanos de alta densidade, e a priori serão empregadas as análises numéricas dos resultados, conforme os dados expedidos da análise na cidade de Patos de Minas-MG.

A metodologia basear-se-á em uma análise seguindo 3 etapas importantes. Dentre estas etapas inclui objetivamente:

(a) Criação do cenário dinâmico para Simulação: Baseia-se na atribuição e definição dos pontos centrais, à alocação dos sites e disposição das células, na configuração das TRxP's, e definição dos parâmetros de funcionamento conforme o cenário Brasileiro regional. Na análise do cenário de forma gráfica e numérica, evidenciando as comparações entre testes posteriores para diferentes modelos de propagação. Ressaltando que as diferenças relativas as normatizações da ANATEL comparadas ao cenário de testes da ITU, diz respeito principalmente, as faixas alocadas para funcionamento do 5G, conquanto a faixa a ser utilizada durante o todo o desenvolvimento experimental deste trabalho é a de 3.5GHz conforme abordado no Capítulo 1.

(b) Correção dos parâmetros de simulação: Conforme retratado em (17) e (18), uma análise para este cenário eMBB difunde os parâmetros técnicos regulares. Com tal conceituação, para o cenário dinâmico prático, há a variação dinâmica de obstáculos

(Variação na visada Direta), relevo de forma irregular (Topografia), fatores estes que intensificam a atenuação do sinal, ou compactuam precisamente em determinados ambientes urbanos, como tal, ressalta-se que os dados topográficos disponibilizados pela *OpenStreetMap* não contêm dados geográficos suficientes para análise eMBB precisamente regular em pequenas localidades regionais brasileiras. Para uma abordagem mais precisa em termos regionais, algumas correções em detrimento dos aspectos geográficos práticos precisam ser considerados, sendo levantados nesta etapa.

(c) Levantamento dos resultados: Conforme as etapas (a) e (b), é possível analisar o cenário modelado com as configurações discutidas no Capítulo 2. Os resultados numéricos das etapas anteriores permitem o detalhamento das condições dos Macro-canais em UMA em termos de balanço de potências, diagramas de irradiação, mapas de SINR, taxa de dados de pico, BER, constelação, eficiência espectral. Outros levantamentos podem ser feitos com base nos itens 2.1 a 2.4 do Capítulo 2, relacionando-se diretamente ao contexto teórico das comunicações digitais.

Em suma estas etapas descrevem a forma de execução das análises e projeções para o próximo capítulo, referendando objetivamente os resultados obtidos a partir das simulações.

### 3.3 RECURSOS NECESSÁRIOS

O projeto de simulação da propagação do sinal 5G, visando a cobertura de dispositivos móveis, será executada em ambiente de simulação, utilizando o programa voltado ao cálculo numérico Matlab. Para desenvolvimento do trabalho, será utilizado o pack de bibliotecas do próprio *software*, além do trabalho de Y. Banday *et al*, e o modelo de “*SINR Map for a 5G Urban Macro-Cell Test Environment*” (18) como base. Segue-se também a padronização das normas definidas pela ITU, com análise da propagação do sinal utilizando as macrocélulas, além do levantamento dos dados dos mapas de SINR referidos à propagação das ondas eletromagnéticas.

Conforme a disponibilidade de utilizar a versão do *software* gratuito na versão estudante e online, e a disposição de se utilizar o software na versão “*Trial*” *Offline* para um melhor desempenho em computador *desktop*, com as seguintes condições e configurações de hardware dispostas abaixo.

Tabela 3.1: Descrição do Hardware.

<b>Hardware</b>	<b>Descrição</b>
Placa Mãe	MACHINIST E5-MR9A PRO
Processador	Intel Xeon E5 2640 v3
Disco	SSD 1TB
Placa de Vídeo	AMD Radeon RX 580 2048SP
Memória RAM	16Gb

Fonte: O autor.

### **3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste capítulo sintetizou-se de forma simples a metodologia e os recursos necessários para o desenvolvimento desse trabalho. Essas informações têm como objetivo demonstrar de uma forma mais direta as etapas já desenvolvidas e os resultados expressos a serem discutidos nos próximos capítulos, bem como os recursos empregados para a execução.

# Capítulo 4

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nesse capítulo são apresentados os resultados e discussões a respeito do projeto proposto nesse trabalho. Assim, tem-se a execução dos passos respectivos à análise da SINR e demais parâmetros de desempenho conforme a metodologia evidenciada no Capítulo 3. Como tal os procedimentos e etapas características são distintos de acordo com os passos que se segue nas simulações realizadas no MATLAB.

### 4.2 CONFIGURAÇÃO DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

As configurações do ambiente de simulação respectivas aos cenários de testes são pré-definidas de acordo com a Tabela 2.6, e discutidas no Capítulo 2. A seguir, tem-se os tópicos que caracterizam a forma de aplicação das parametrizações.

#### 4.2.1 Definição do ponto central

Evidentemente para expressar o ponto de partida da análise na cidade de Patos de Minas, é definida o ponto geográfico inicial e a partir do ponto de origem, os sites serão configurados. Para uma abordagem dinâmica foi escolhido o ponto geográfico  $-18,58971$  e  $-46,51506$ , conforme apresentado na Figura 4.1 objetivando em um ambiente com alto índice de pedestres. Na notação geográfica usual é representado por  $18^{\circ}35'23.0''S$  e  $46^{\circ}30'54.2''W$ .

Figura 4.1 – Ponto de origem do arranjo de sites.



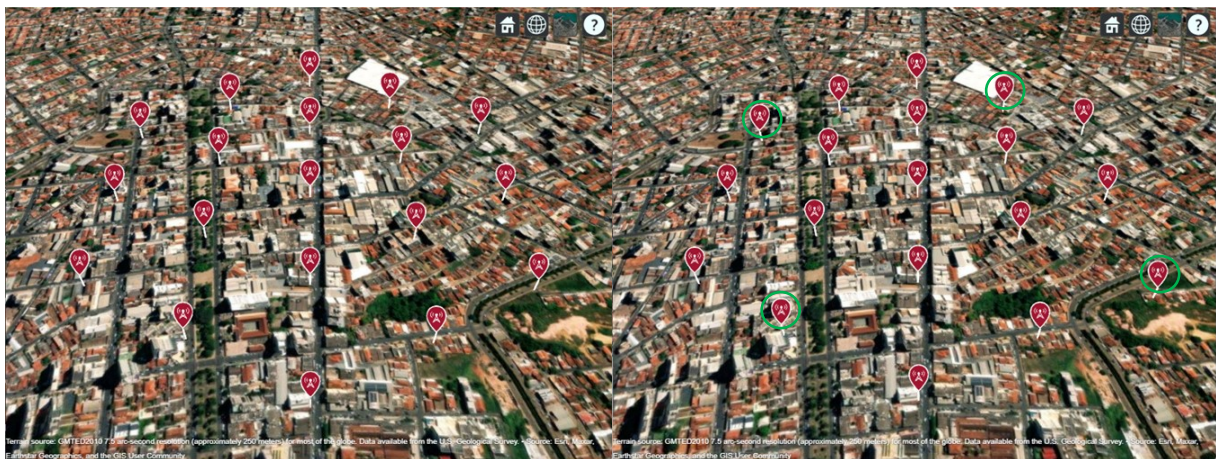


Fonte: O autor.

A partir deste ponto inicial, a cobertura das células é definida conforme a quantidade de 19 sites é feita (ver Figura 2.6). Contudo é necessário indicar que na criação dos sites, tem as definições do *layout* de rede e anexação dos transmissores e receptores (TRxP's) (conforme a Figura 4.2). Ressaltando que a modificação do cenário comparadas com as resoluções de testes da ITU está baseada na frequência de operação de 3,5GHz. A priori a criação da cobertura celular (Apêndice A 1.1.2 e 1.1.3), propaga-se diretamente de forma regular, como apresentado na Figura 4.2(a). Entretanto, em tal situação implica em uma incoerência prática, visto que alguns transmissores podem, por exemplo, ser definidos em vias de circulação (ruas, avenidas etc.).

A correção do *layout* de rede e anexação dos transmissores pode ser visualizada na Figura 4.2(b). Basicamente, isso decorre da necessidade de maximizar os termos práticos, para que os pontos de alocação das TRxP's não estejam situados em ruas, avenidas, faixas de passagem, e demais locais inapropriados, com tal correção é possível definir localizações com maior grau de coerência (Apêndice A 1.1.4).

Figura 4.2 – *Layout* de rede e anexação dos transmissores.



(a) *Layout* com posição regular

(b) *Layout* com posição corrigida

Fonte: O Autor.

As correções das posições efetuadas dizem respeito ao apontamento dos transmissores para as células. As posições foram definidas arbitrariamente mais próximas dos pontos originais, para que a influência no *layout* do conjunto de sites seja mínima, conforme a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Células com correção de posições aplicadas manualmente.

<b>Células</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>
25/26/27	-18,5871	-46,5132
34/35/36	-18,5924	-46,5169
46/47/48	-18,5880	-46,5182
55/56/57	-18,5917	-46,5116

Fonte: O autor.

## 4.2.2 Criação e configuração dos transmissores:

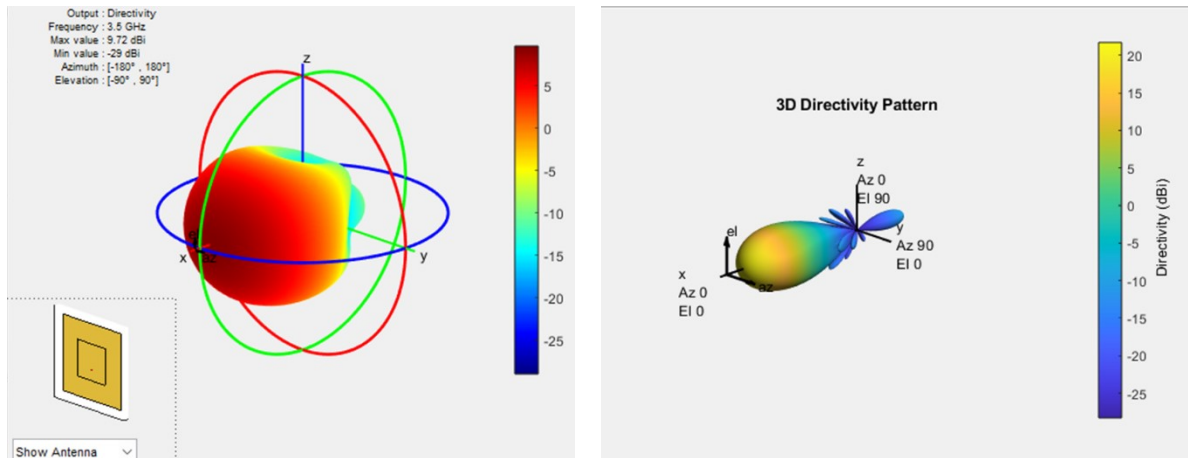
Cada site é formado por 3 transmissores distribuídos uniformemente com angulação para células definidas na Figura 2.7. Esta etapa define o objeto "txsite" contendo todos os sites transmissores criados anteriormente. Com cada qual, cada site conterá informações e parâmetros definidos de forma coletiva, como (Apêndice A 1.1.3).

- a) Identificação;
- b) Latitude;
- c) Longitude;
- d) Ângulo de apontamento das células;
- e) Altura;
- f) Frequência de operação;
- g) Potência de transmissão.

## 4.2.3 Arranjo de antenas

Utilizando a biblioteca phased.CustomAntennaElement é possível visualizar o diagrama de irradiação da antena de microfita e do arranjo de antenas 8x8 de microfita a partir do comando `pattern(patchMicrostrip,fq e phased.URA`, respectivamente. Assim, observa-se os diagramas de irradiação de ambas corresponde a análise conforme Capítulo 2 e ganho definido de 8dBi para antena de microfita conforme Tabela 2.6. E que, para o arranjo de antenas de microfita, analisando o código no Matlab (Apêndice A 1.2.2 e 1.2.3) observa-se que tal arranjo na configuração proposta apresenta cerca de 21,66dBi de ganho da direção de máxima irradiação.

Figura 4.3 – Diagramas de irradiação.



(a) Diagrama de Irradiação antena de microfita.

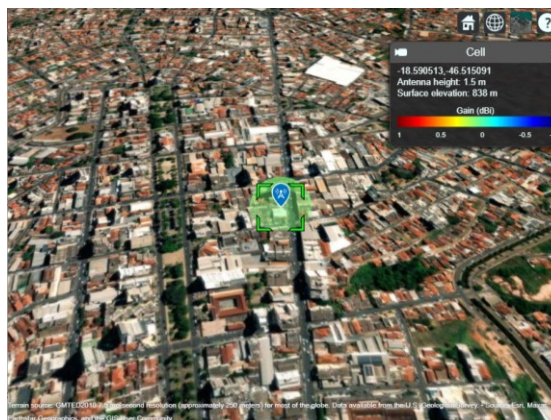
(b) Diagrama do arranjo de antenas de microfita.

Fonte: O Autor.

## 4.2.4 Receptor

Os parâmetros de configuração do receptor dizem respeito aos atributos correspondentes do comando do Matlab *rxsite*, e especificam a indexação, coordenadas geográficas, altura da antena de 1,5m, perda do sistema de 0dB, e sensibilidade do receptor configurada para  $-120\text{dBm}$  (Apêndice A 1.3). Tais parâmetros são discriminados na Tabela 8-2 (b) do Report ITU-R M.[IMT-2020.EVAL]. Em conformidade com os atributos definidos, o receptor (definido como UE) pode ser visualizado na Figura 4.4.

Figura 4.4 – UE.



Fonte: O Autor.

## 4.2.5 Ajustes dos parâmetros dos Mapas SINR

Após o seguimento dos itens abordados anteriormente, foram gerados um mapa respectivo ao modelo “*Freespace*” para fins de teste. Como tal, após referidos as primeiras análises do cenário para o ambiente urbano de Patos de Minas, o seguinte problema pode ser identificado visualizando a Figura 4.5.

É possível observar que em termos práticos, a inclinação da antena como fator mecânico deve ser atentamente observado. Para o cenário referido, o ângulo de *downtilt* deve ser levado em consideração, visto que, mesmo utilizando o arranjo de 8x8 para os mapas de SINR, a distribuição é mínima de potência, tal coloração corresponde à média de 7dB conforme Figura 4.5(a).

Vale ressaltar que conforme o comando *sinr* o parâmetro “*resolution*” é configurado arbitrariamente para  $ISD/5$ , e será utilizado durante as análises, visto o melhor aspecto gráfico dos mapas gerados (Apêndice A 1.4.1). Outro detalhe importante, que com a correção de posicionamento das *TRxP*'s surgem outros problemas característicos, como:

- a) *Valores de Downtilt's não coerentes*: São determinados com valores fixos próximos de  $15^\circ$  para o ângulo de elevação das *TRxP*'s com cenários planos em relação à elevação. Para implementação em termos práticos, considerando o cenário mais próximo da realidade, os valores são obtidos com base na elevação do ambiente de cobertura, e do apontamento das antenas dos transmissores e receptores.
- b) *Rotacionamento e Deslocamento do formato da célula Hexagonal*: A correção das localizações com base nas situações descritas anteriormente, rearranjam o formato dos sites influenciando diretamente na forma de cobertura dos mapas de SINR.
- c) *Mudanças significativas no mapa de densidade de potência e de SINR*: Com base nas correções realizadas, identifica-se diferenças quanto à cobertura expressa pelos mapas de SINR.
- d) *Interferência de campos próximos às células adjacentes (dado o modelo Single Carrier – 3,5GHz)*: É evidenciado com base nos parâmetros físicos das macrocélulas, conforme os efeitos de localização das *TRxP*'s há a mistura de sinais de sites adjacentes em um mesmo ponto de cobertura.
- e) *Interferência Co-Canal amplificada*: Interferência causada pelo reuso de faixas de frequências associadas aos sites adjacentes.

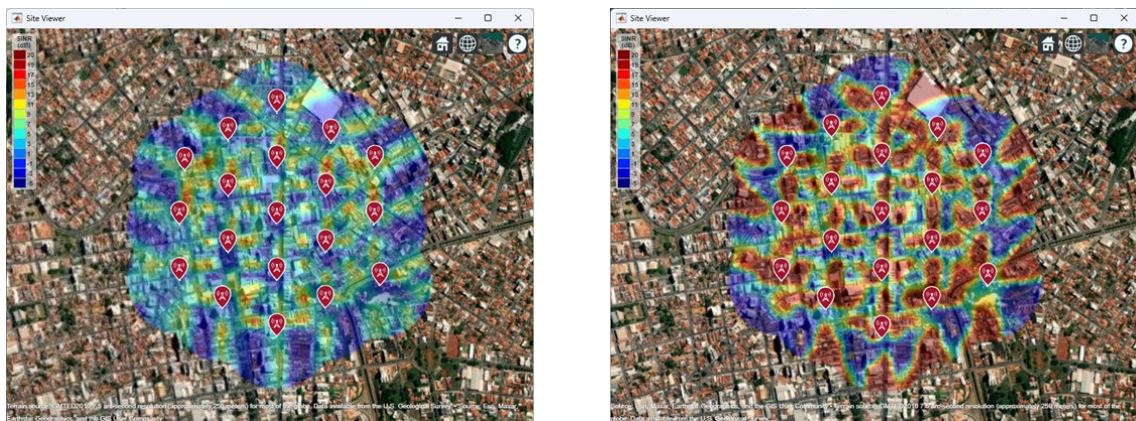
Sendo que o aspecto prejudicial com maior de maior significância, neste trabalho será considerado o *Downtilt*, correlato e ligado diretamente aos demais fatores. No entanto, neste



caso, para este trabalho viabiliza-se uma possível solução a ser implementada em definir um ponto médio de maior incidência do sinal irradiado de cada transmissor com localização corrigida anteriormente, com o ponto central entre o *TRxP* transmissor e a célula adjacente mais próxima, observando a disposição angular. Uma forma de correção coletiva além da idealizada anteriormente, seria a utilização de *Beamforming*, contudo pode ser objeto de estudos futuros.

Logo, calculando valores individuais de *Downtilt* para cada arranjo de antena de microfita em cada *TRxP* da célula definida melhora os resultados da SINR para o mapa como um todo. O código que gera a correção calculando os ângulos individuais de *Downtilt* pode ser visualizada no Apêndice A item 1.4.2 conforme o script apresentado. Sendo que utilizando-se do cálculo vetorial e geometria analítica, é possível encontrar o ângulo de *Downtilt* que aponta para o ponto médio entre 2 *TRxP*'s próximos individualmente e replicando para os 19 Sites. Ressaltando que a correção ocorre na direção de irradiação de cada transmissor individualmente. Sendo que visivelmente é possível observar a diferença entre a coloração de maior destaque para o vermelho de 20dB na Figura 4.5(b), evidenciando um aumento da distribuição de potência do sinal na cobertura.

Figura 4.5 – Mapa SINR com modelo de propagação “*Freespace*”.



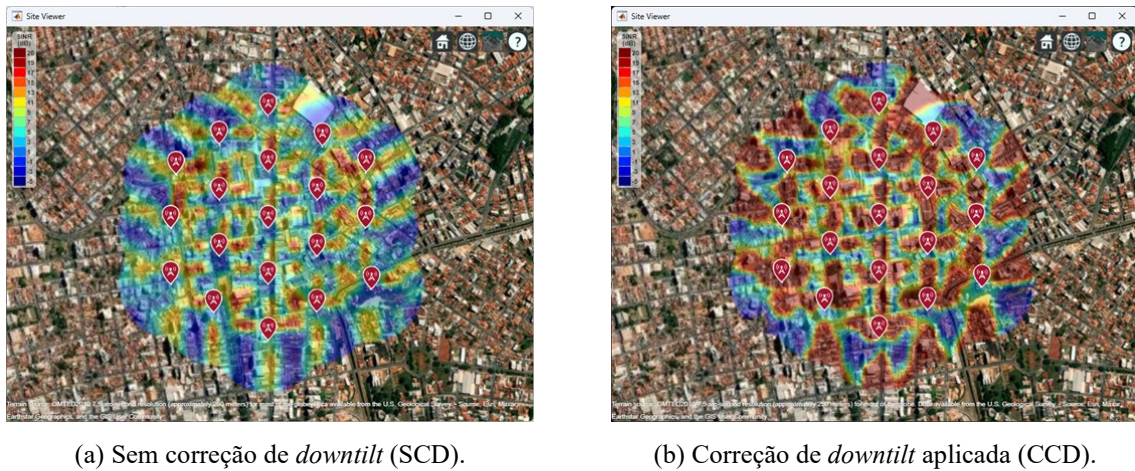
(a) Sem correção de downtilt (SCD).

(b) Correção de downtilt aplicada (CCD).

Fonte: O Autor.

Considerando a construção e configuração do cenário, é possível fazer as análises objetivando a comparação dos 2 modelos de propagação “*Freespace*” e “*Close-in*” para os cenários sem a correção de *downtilt* (SCD) e com a correção aplicada de *downtilt* (CCD). O mapa da SINR para o modelo “*Close-in*” é apresentado na Figura 4.6. Vale destacar que por esse modelo de propagação leva-se em consideração mais fatores que o “*Freespace*”, os sinais interferentes são mais atenuados e por isso observa-se uma melhor SINR.

Figura 4.6 – Mapa SINR com modelo de propagação “Close-in”.



Fonte: O Autor.

As Figuras 4.5 e 4.6, tem o objetivo de mostrar o ganho da SINR em relação à projeção da correção dos ângulos de inclinação. O detalhamento numérico pode ser analisado nos próximos itens. Contudo ressalta-se que até este momento desta discussão, foram evidenciadas as formas de configuração e parametrização do ambiente que visa gerar os resultados dos cenários previstos para os diferentes modelos de propagação.

### 4.3 ANÁLISE DOS CENÁRIOS COM SCD E CCD

Os mapas gerados com as situações SCD e CCD, implicam a importância do grau de inclinação dos transmissores para o ponto médio. Conforme ITU, o ponto médio angular definindo a altura da antena de 25m e ISD com 200m o é de 15°. Contudo o cenário idealizado pela ITU, especifica um ambiente plano e sem variação da elevação do relevo.

Nas Figuras 4.5 e 4.6, é possível visualizar as diferenças gráficas em temas da projeção em cobertura da SINR. E que a média linear da cobertura SINR nos mapas para respectivos cenários, expressão as condições nos quais viabiliza o ganho de potência, dadas as condições de correção (Apêndice A 2.1).

Tabela 4.2 – Média aritmética da cobertura SINR para cenários SCD e CCD.

Modelos de Propagação	Cenários	
	SCD (dB)	CCD (dB)
<i>Freespace</i>	3,0485	10,7923
<i>Close-in</i>	5,2873	13,1321

Fonte: O Autor.

Com estes dados e a análise das Figuras 4.5 e 4.6, é possível confirmar em teoria, que o modelo de propagação “*Close-in*” não atenua o sinal próximo do transmissor e receptor, além de superestimar as margens de cobertura nos pontos de sombras, quando comparadas com o modelo “*Freespace*” que atenua o sinal nos pontos localizados próximos do transmissor e receptor, além de se observar pontos do mapa de SINR com maior sombreamento.

#### 4.4 ANÁLISE COM TRAJETÓRIA LINEAR

Esta etapa de análise fomenta verificar, a variação de SINR de acordo com o um percurso traçado no mapa para ambos os modelos, com as características de simular um usuário que se encontra na faixa de cobertura conforme o cenário. A Figura 4.7 mostra a trajetória partindo do ponto A até o ponto B, respeitando os limiaries conforme Tabela 2.6.

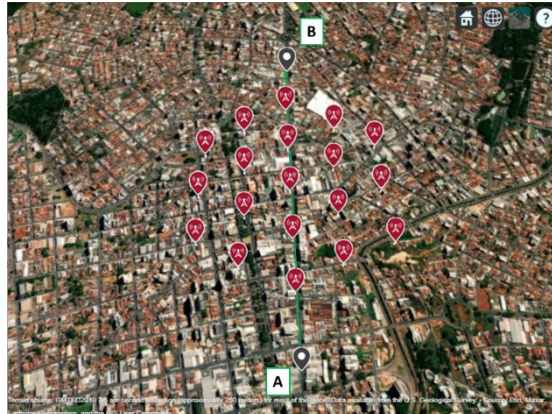
Tabela 4.3 – Pontos geográficos inicial e final da trajetória.

Pontos	Coordenadas	
	Longitude	Latitude
A	-18,595547	-46,514955
B	-18,583937	-46,514910

Fonte: O Autor.

Os pontos conforme descritos dizem respeito à rua Major Gote no centro de Patos de Minas, escolhida em detrimento pelo elevado número de edifícios e tráfego de pessoas. Conforme poder ser observado na Figura 4.7, o percurso de acordo com o mapa (Apêndice A 2.2.1).

Figura 4.7 – Trajetória para a análise de percurso.



Fonte: O Autor.

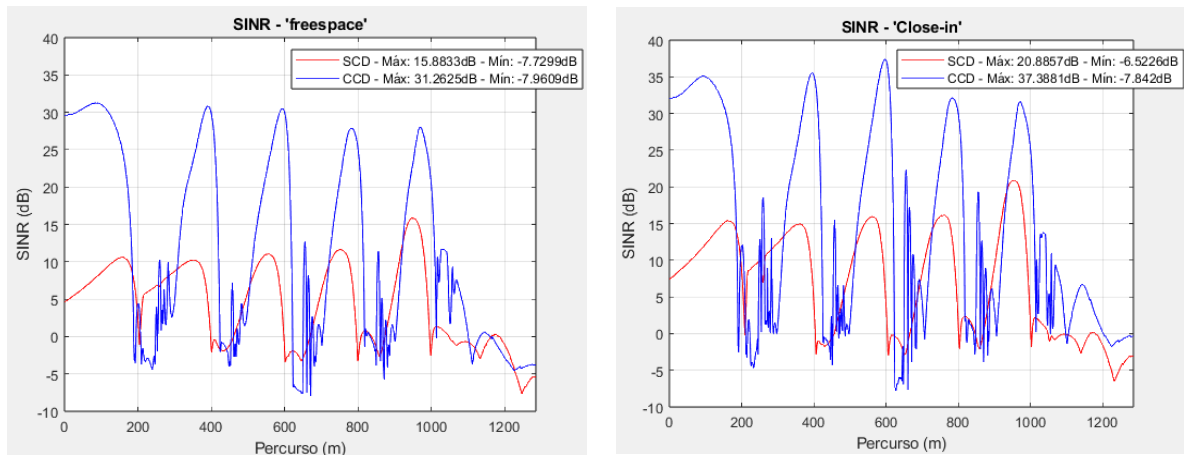
Conforme a definição do percurso analisado, as análises se concentram em observar a SINR para os determinados modelos e variações nos cenários conforme o critério de cada análise. Concernentes ao contexto da trajetória, foram escolhidos arbitrariamente 1000 pontos linearmente espaçados, com distância **AB** de 1.285m.

#### 4.4.1 Análise da SINR SCD e CCD

Esta análise obtém os dados graficamente gerados conforme a trajetória escolhida, como tal, pode ser visualizado na Figura 4.8. Conforme discutido anteriormente, o ganho de SINR com modelo “*Freespace*” (Figura 4.8(a)) para a correção de elevação nas *TRxP*'s quando comparadas nos 2 cenários, apresenta diferença de aproximadamente 15,38dB, e para o modelo “*Close-in*”, na Figura 4.8(b) essa comparação aumenta aproximadamente para 16,40dB. Contudo é possível notar que os picos correspondem à cobertura efetiva de maior diretividade dos lóbulos principais de cada *TRxP*, em contrapartida os vales correspondem as regiões próximas das bases, considerados como pontos de sombras. As curvas CCD para ambos os modelos quando comparadas com as curvas SCD, apresentam uma oscilação nos pontos de sombras. Tais oscilações podem ser subentendidas como os pontos dos lóbulos laterais dos diagramas de irradiação dos transmissores.



Figura 4.8 – SINR para cenários com SCD e CCD.



Fonte: O Autor.

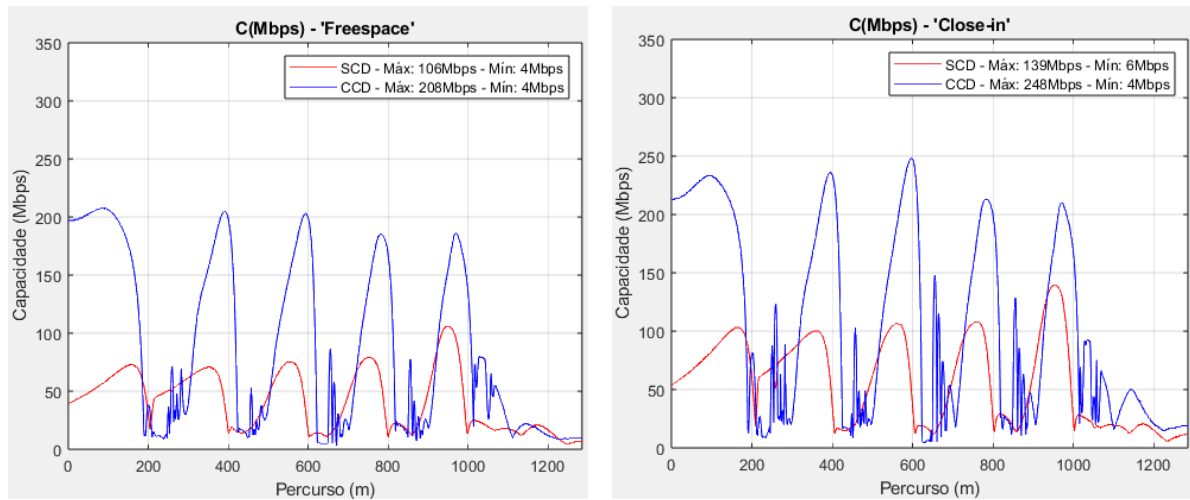
#### 4.4.2 Análise da Capacidade do Canal

Conforme Capítulo 2, a capacidade do canal relaciona-se diretamente com a energia de Bit, e potência do ruído acrescida da interferência, conduzindo explicitamente no cálculo da SINR. Logo podemos calcular a capacidade do canal e expressar a relação com o percurso definido.

Analisando a Figura 4.9, é possível ver que podemos obter com o cenário CCD para o modelo “*Freespace*” (FR-CCD) 208Mbps, com SINR de 31,26dB, enquanto para “*Close-in*” (CI-CCD) alcançamos 248Mbps com SINR de 37,27dB (Apêndice A 2.2.4). O mínimo para ambos decorre de 4Mbps, evidentemente, ainda é possível manter a comunicação no enlace dada as piores condições, observando a previsibilidade da capacidade do canal dada por Shannon. Observando os cenários com modelo “*Freespace*” com SCD (FR-SCD) e “*Close-in*” com SCD (CI-SCD), a margem corresponde à uma pequena parcela de aumento quando comparados com os 2 modelos para cenário CCD.

Previamente os piores pontos onde os valores de SINR são mínimos, correspondente a taxas pequenas. Contudo as relações entre os cenários expressam as mesmas observações do aumento da taxa em relação ao modelo “*Freespace*” comparados com modelo “*Close-in*”.

Figura 4.9 – Capacidade do Canal para os diferentes modelos de propagação e cenários.

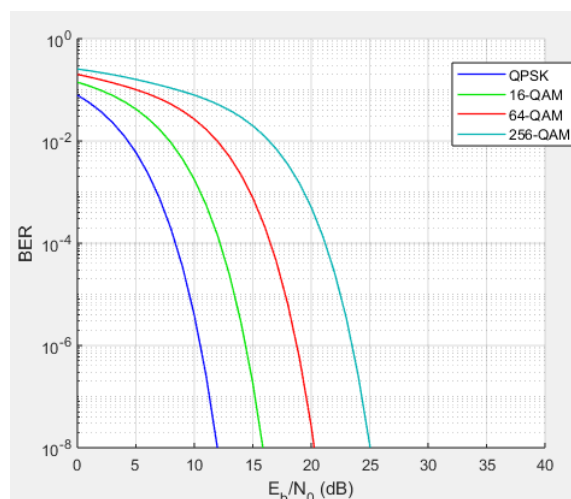


Fonte: O Autor.

### 4.4.3 Análise da BER

A análise da taxa de erro de bit, segue a analogia descrita conforme o capítulo 2. Uma vez que definidos os parâmetros, a abordagem utilizando a ferramenta *bertool* do matlab, podemos plotar as curvas para respectivas modulações correspondentes ao PDSCH que podem ser visualizadas na Figura 4.10. Logo, com as informações de SINR definidas nas análises anteriores, é possível traçar os gráficos respectivos as probabilidades de erro de bit conforme a ordem das modulações para os diferentes cenários e modelos de propagação.

Figura 4.10 – Probabilidade de erro de Bit (BER), com modulações QPSK, 16-QAM, 64-QAM e 256-QAM.

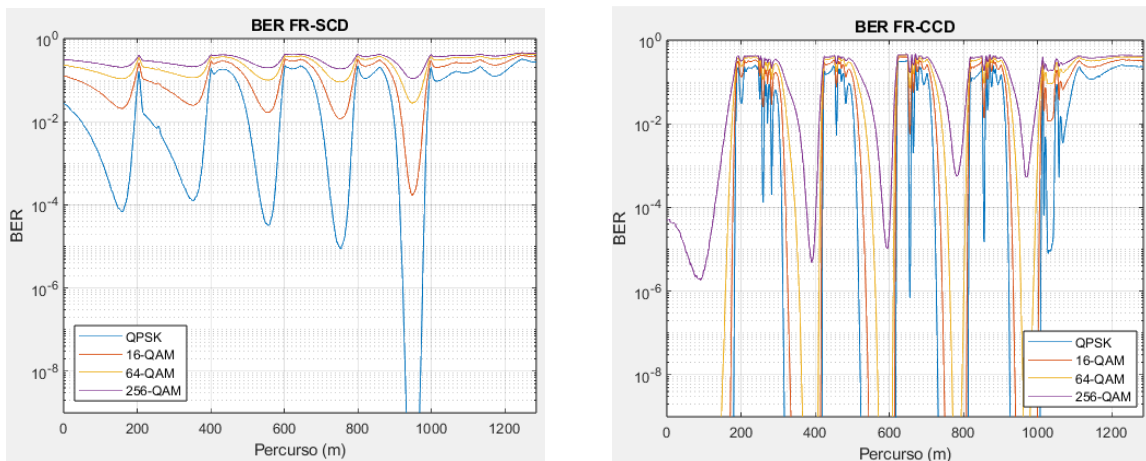


Fonte: O Autor.

Para os cenários FR-SCD e FR-CCD, podem ser observados as relações da BER na Figura 4.11. É possível observar que para ambos os cenários FR-SCD e FR-CCD, à ordem de

modulação M-QAM tem valor calculado para BER, e que quanto mais próximo de 1, implica dizer que a taxa de erro respectiva ao aumento da modulação cresce exponencialmente, e tão somente não atende ao critério de BER menor que  $10^{-6}$ . Para tal, é mantido a menor ordem de modulação para o critério de estabilidade do enlace. A probabilidade de erro de bit aumento dado a mesma relação de  $E_b/N_0$  avaliada para ordens mais altas de modulação, além de que esta observação é analisada em ambos modelos e cenários.

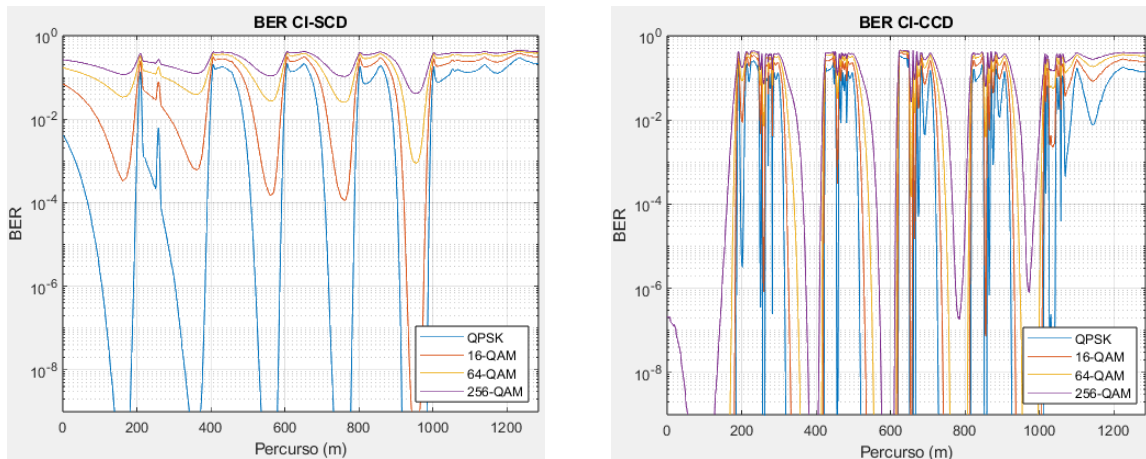
Figura 4.11 – BER para FR-SCD e FR-CCD.



Fonte: O Autor.

Para cenários CI-SCD e CI-CCD, a Figura 4.12 ressalta as diferenças conforme pode ser visualizado. Já para o modelo “Close-in”, em ambos os cenários SCD e CCD, é possível ver que QPSK, é a modulação que proporciona BER mínima, enquanto para M-QAM, tem valores distintos com BER máxima em pontos específicos. Estes pontos de BER próximas de 1, enfatiza os pontos de sombras, onde a cobertura não é eficaz, e logo não permite modulações de alta ordem. Para ambos os modelos de propagação e cenários, é possível verificar que QPSK, responde bem para os critérios de BER, contudo não o suficiente para que obtenha maiores taxas de transmissão de dados quando a relação de  $E_b/N_0$  aumenta.

Figura 4.12 – BER para CI-SCD e CI-CCD.



Fonte: O Autor.

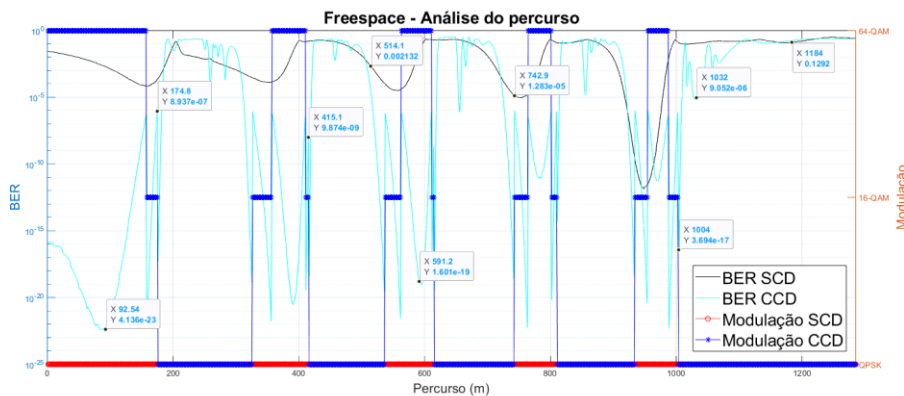
As descontinuidades geradas nas análises das Figuras 4.11 e 4.12, são respectivas a BER mínima alcançando valores não estipulados conforme os limites de visualização do gráfico. Nota-se que essas descontinuidades das curvas acontecem para modulações de baixa ordem como QPSK e 16QAM.

#### 4.4.4 Análise da Ordem de Modulação

O 5G NR com PDSCH utiliza-se das Tabelas de esquema de modulação e codificação (Modulation and Coding Scheme – MCS) 38.214-Tabela 5.1.3.1-1, 38.214-Tabela 5.1.3.1-2 e 38.214-Tabela 5.1.3.1-3 para a definição do *index* MCS, informações da taxa de codificação (*Target Code Rate*), além da própria ordem de modulação ( $Q_m$ ). Este recurso do 5G, avalia a taxa de erro de bloco BLER, para escolha do índice MCS utilizando a eficiência espectral como fator determinante. Tal recurso das diferentes Tabelas empregadas, vislumbra-se de se haver particionamento da quantidade de símbolos por slots do frame 5G NR para os canais físicos. Com tal ferramenta, é possível classificar aplicações com maior grau de importância na rede, dando agilidade na comunicação. É importante destacar, que a escolha do índice MCS depende da gNB e UE, quando equiparados as compatibilidades de modulações e características do rádio, como também das características de SCS e  $B_w$  conforme discutido no Capítulo 2. Contudo, uma análise das Tabelas MCS, compreende a análise de outros blocos funcionais do 5G NR não objetivados neste trabalho. Como tal, para expressar a proximidade das simulações com o contexto prático do 5G NR, será analisado a ordem de modulação de acordo com o critério de BER de  $10^{-6}$  conforme resultados nas Figuras 4.11 e 4.12 (Apêndice A 2.3.1).

Definindo as modulações de mais alta ordem que atendam o critério de BER menor que  $10^{-6}$  estabelecido é possível verificar a modulação utilizada, de acordo com o percurso, na forma apresentada na Figura 4.13. A curva BER SCD, implica no comportamento da BER, quando analisados as condições para o modelo “*Freespace*”, que em suma, corresponde constantemente em todo o percurso a curva que representa a modulação Mod-SCD. Pode ser observado que em todo percurso a única modulação correspondente é o QPSK. Para a curva BER CCD, relaciona-se diretamente a BER correspondente a curva que identifica a ordem de modulação Mod-CCD para este cenário. Observa-se que em todos os pontos a BER satisfaz a condição estipulada. Um ponto a se ressaltar, conforme a curva da BER para ambos os modelos decrescem, não significa que a ordem da modulação deve aumentar, visto a não linearidade da função que resulta no cálculo da BER. Outra observação importante, que o comando *semilogy()* usado para plotar as curvas probabilísticas, não segue escala linear na grade da imagem gerada no *plot*. Logo, para fins de análise, é possível replicar o gráfico conforme o código 2.3.2, e analisar os pontos de forma individual. Observa-se que em alguns pontos a BER é menor que o limiar estabelecido, contudo, para modulações de ordem superior, não atenderá o critério.

Figura 4.13 – Análise de percurso para FR.

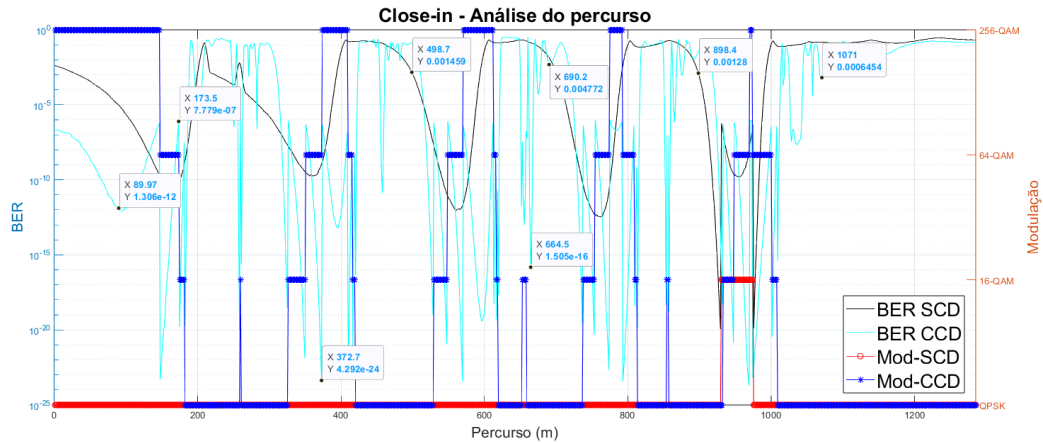


Fonte: O Autor.

Para o modelo “*Close-in*”, podem ser visualizadas as diferenças conforme, se segue na Figura 4.14. É possível analisar as mesmas características visíveis na Figura 4.13, incluindo as análises anteriores. Ambas as Figuras 4.13 e 4.14 é possível ver que para o cenário FR-CCD a máxima modulação utilizando 256-QAM acontece em 5 vezes no percurso, como também ocorre para o cenário CI-CCD, mas com uma pequena distância no último espaço com modulação 256-QAM. Outra ressalva, que para cenário CI-SCD, houve dado momento entre 900m e 1000m a partir do ponto inicial, que a modulação aconteceu em 16-QAM, tal condição

não ocorre para o cenário FR-SCD, dadas as diferentes condições dos modelos de propagação. Na Tabela 4.4, é possível visualizar melhor as diferenças concernentes aos parâmetros observados nas Figuras 4.13 e 4.14.

Figura 4.14 – Análise de percurso para CI.



Fonte: O Autor.

Com base nas figuras 4.13 e 4.14 os dados coletados são mostrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Dados das análises Figura 4.13 e 4.14.

Modelos de Propagação	BER mínima		Modulação máxima	
	SCD	CCD	SCD	CCD
<i>Freespace</i>	$1,343 \times 10^{-12}$	$3,383 \times 10^{-23}$	QPSK	256-QAM
<i>Close-in</i>	$1,546 \times 10^{-10}$	$3,623 \times 10^{-20}$	16-QAM	256-QAM

Fonte: O Autor.

Os dados coletados na Tabela 4.4 dizem respeito a menor BER para todos os cenários com os diferentes modelos de propagação “*Freespace*” e “*Close-in*”. Logo, como pode ser observado, a seletividade da ordem de modulação a ser aplicada durante o percurso, necessariamente precisa atender ao critério da probabilidade de erro de bit ser menor que  $10^{-6}$ . Conforme Tabela 4.4, todos os dados atendem ao critério, para cada qual a maior ordem de modulação aplicada aos cenários. Evidentemente, a correção do *downtilt* permite uma melhor relação de SINR conforme já discutido, evidenciando a ordem de modulação mais alta, quando comparados ambos os cenários SCD e CCD.

### 4.4.5 Análise da Constelação

Dados os resultados obtidos anteriormente, é possível traçar as características das constelações para ambos os cenários SCD e CCD, aplicados aos modelos de propagação *Freespace* e *Close-in*. Conforme apresentado em 4.4.4, a análise da BER e ordem de modulação, já evidencia os dados do percurso que vão ser utilizados para análise com BER máxima e mínima, junto com as diferentes modulações, conforme pode ser analisado na Tabela 4.5. Um ponto importante a se ressaltar, (Conforme Tabela 4.5), pode se notar os valores respectivos à BER, que estão ligadas diretamente a relação da maior ordem possível de modulação dadas as características definidas para o limiar analisado a ser menor que  $10^{-6}$ . Facilmente pode se notar as diferenças expressas em ambos os modelos para os diferentes cenários (Apêndice A 2.4). A Tabela 4.5, por sua vez demonstra os valores máximos e mínimo para BER e ordem  $M$  de modulação, expressando os parâmetros necessários para representar graficamente as constelações.

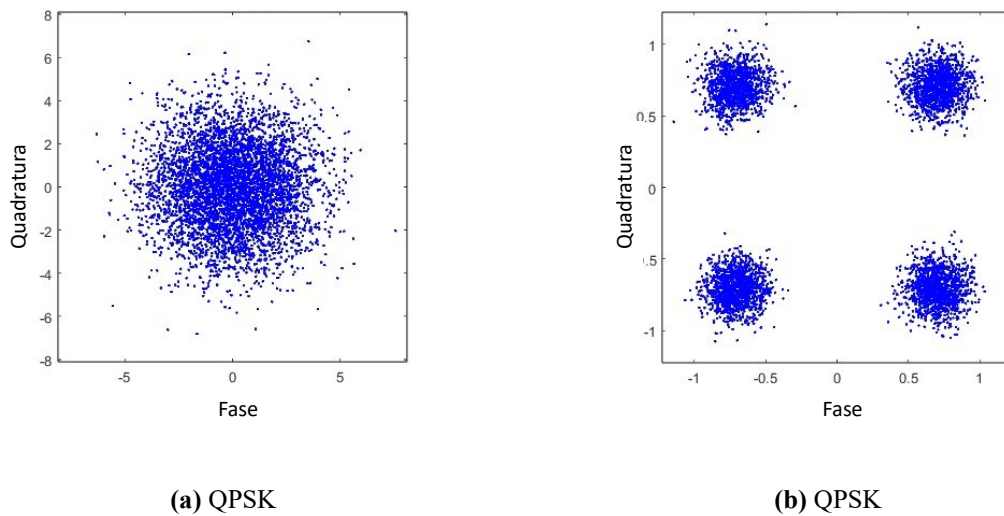
Tabela 4.5 – Dados gerais das análises conforme Figuras 4.13 e 4.14.

Parâmetros	<i>Freespace</i>		<i>Close-in</i>	
	SCD	CCD	SCD	CCD
<b>BER mínima</b>	$1,343 \times 10^{-12}$	$3,383 \times 10^{-23}$	$1,546 \times 10^{-10}$	$3,623 \times 10^{-20}$
<b>BER máxima</b>	0,322	0,327	0,297	0,325
<b>Modulação mínima</b>	QPSK	QPSK	QPSK	QPSK
<b>Modulação máxima</b>	QPSK	256-QAM	16-QAM	256-QAM

Fonte: O Autor.

Logo, traçando as constelações baseadas na Tabela 4.5, para FR-SCD, tem-se a Figura 4.15. Nota-se, que para FR-SCD tem-se uma SINR de  $-7,73\text{dB}$  equivalente ao ponto onde a BER com 0,322 é máxima (Próxima de 1) para a modulação QPSK, correspondendo à um ponto de sobreposição, não permitindo identificar a informação transmitida dado o embaralhamento em torno dos pontos da modulação. Já na Figura 4.15(b) é possível ver que o ponto de maior pico para modulação QPSK acontece em SINR com  $15,88\text{dB}$ , atendendo ao critério da BER, mas não suficiente para uso do 16-QAM (Apêndice A 2.4), em suma é possível ver a variação em torno da constelação para QPSK, contudo há uma margem considerável entre cada símbolo, representando uma estabilidade para comunicação no enlace.

Figura 4.15 – Constelação FR-SCD.

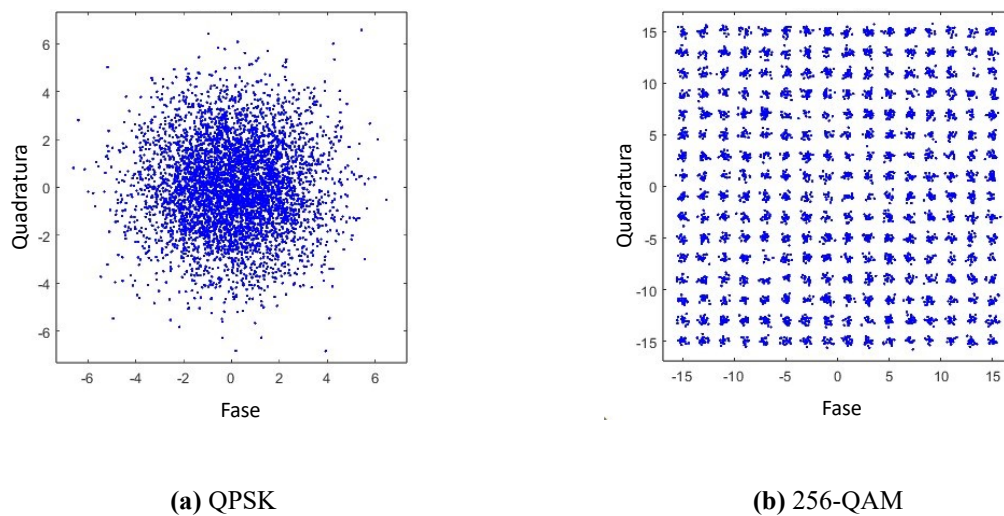


Fonte: O Autor.

Para o cenário FR-CCD, vê-se que conforme na Figura 4.16 (a), a SINR correspondente é de  $-7,96\text{dB}$  no ponto  $670,92\text{m}$  do percurso, enfatiza-se que este ponto é de sombreamento, contudo não há estabilidade para comunicação dado o embaralhamento da mensagem que se propaga nestas condições do canal.

Para a Figura 4.16(b), tem-se que a BER mínima conforme Tabela 4.5, uma SINR de  $31,26\text{dB}$ , no ponto  $91,25\text{m}$  do percurso, com modulação 256-QAM (Apêndice A 2.4), em suma, a maior ordem de modulação para PDSCH, tendo margem considerável para estabilidade do enlace, dados os espaçamentos entre os símbolos no diagrama.

Figura 4.16 – Constelação FR-CCD.

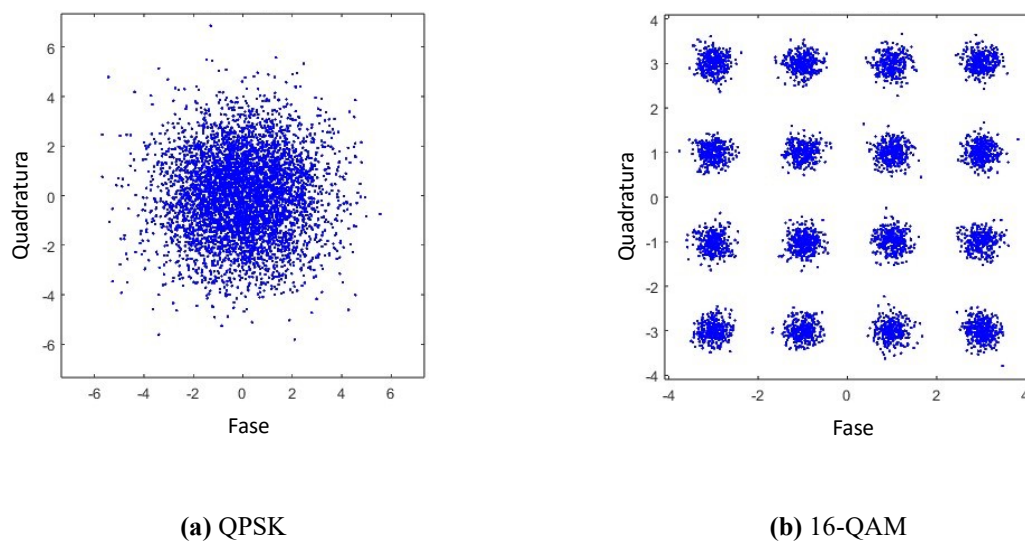


Fonte: O Autor.



Para o Cenário CI-SCD a constelação correspondente para BER máxima e mínima pode ser visualizada na Figura 4.17 abaixo. Compreende-se que para CI-SCD Figura 4.17(a), é possível observar uma SINR de  $-6,62\text{dB}$  no ponto 1.230m do percurso, com BER listada na Tabela 4.5 (Apêndice A 2.4), tal relação, permite QPSK, mas sem estabilidade de comunicação, dada a alta probabilidade de erro de bit. Já na Figura 4.17(b), correspondendo ao ponto de maior SINR e BER mínima, tem-se uma SINR de  $21,29\text{dB}$  à 957,54m do ponto inicial do percurso, permitindo o uso de 16-QAM (Apêndice A 2.4).

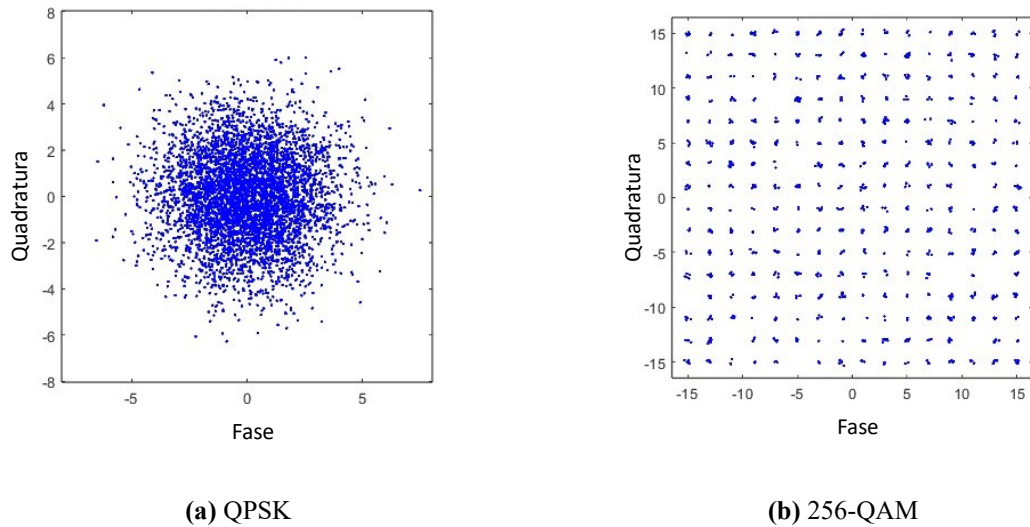
Figura 4.17 – Constelação CI-SCD.



Fonte: O Autor.

Finalizando a análise das constelações, tem-se o cenário CI-CCD que poder ser visualizado na Figura 4.18(a) Para este cenário, tem para o ponto de menor modulação e BER máxima, a SINR de  $-8,45\text{dB}$  no ponto 660,64m do percurso, que assim como as análises anteriores para cenários SCD, apresentam falta de estabilidade, e impossibilidade de comunicação, visto o embaralhamento da mensagem em torno dos pontos de sinal para QPSK. Já na Figura 4.18(b) é possível verificar que a maior ordem de modulação alcançada é o 256-QAM, com SINR de  $37\text{dB}$ , no ponto 596,37m (Apêndice A 2.4), objetivamente, é o melhor cenário para estabilidade da comunicação com a maior ordem de modulação prevista para PDSCH. Pode ser observado a distribuição suavizada em torno dos pontos de sinal com margem ampla de separação.

Figura 4.18 – Constelação CI-CCD.



Fonte: O Autor.

Contudo estas análises, permite-nos verificar que independente do modelo utilizado, e cenário aplicado, sempre haverá pontos com pouca incidência de sinal, pois dadas as características físicas do transmissor, e do ambiente, os aspectos de cobertura mudam drasticamente.

#### 4.4.6 Análise da Taxa De Dados De Pico

Em contrapartida, os resultados teóricos obtidos anteriormente, viabiliza-se em calcular a taxa de dados de pico para o 5G NR, conforme apresentado em 2.5.4. Com essas características a Equação (2.20), será utilizada para cálculo. Conforme abordado no item 4.4.5 as sequências obtidas respectivas à modulação a depender dos pontos individuais do percurso, com parâmetro selecionados de acordo com a BER, vão ser utilizados para definir a taxa de dados de pico graficamente (Apêndice A 2.5).

As variáveis respectivas ao cálculo assumem os seguintes valores conforme pode ser visualizado na Tabela 4.6. Com base nas informações vê se que para a análise definida para UE, será considerado os parâmetros básicos, com portadora agregada unitária, apenas 1 camada MIMO, codificação máxima, e demais parâmetros conforme abordados em 2.5.4.

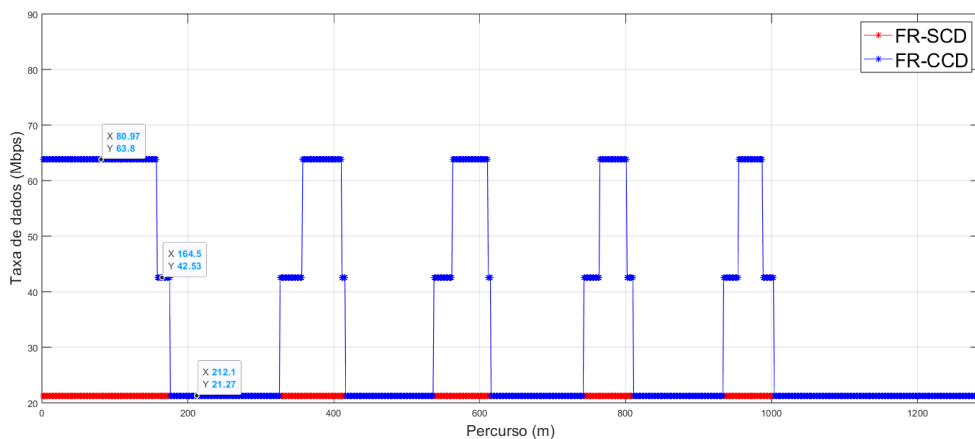
Tabela 4.6 – Definição das variáveis para cálculo da taxa de dados de pico

Variáveis	$j$	$V^{(j)}$	$f$	$R_{max}$	$N_{PRB}^{Bw(j),\mu}$	$T_s$	$OH$
Valores	1	1	0,75	948/1024	106	$7,14 \times 10^{-4}$	0,14

Fonte: O autor.

Na Figura 4.19 é possível visualizar a taxa de dados de pico referentes aos cenários FR-SCD e FR-CCD. Conforme pode ser observado para cenário FR-SCD, a taxa alcançada fica constante em 21,27Mbps, visto que a constelação respectiva à Figura 4.15 especifica a instabilidade do enlace, não sendo possível a comunicação direta entre a gNB e usuário UE. Para o cenário FR-CCD, é possível verificar que a taxa máxima de pico encontrada está em 85,07Mbps, para com apenas 1 camada MIMO. Sendo que, se o dispositivo usuário tenha compatibilidade para 4 camadas MIMO ou superior, seria possível quadruplicar a taxa, podendo chegar à 340,28Mbps sem levar em consideração a possibilidade de aumento de  $Bw$  maior que 20MHz, e aumento do uso de portadoras agregadas. Se houver compatibilidade de usuário UE com 4 camadas MIMO e 4 portadoras agregadas a alocação direta permitiria prever uma taxa de downlink superior à 1Gbps (Apêndice A 2.5).

Figura 4.19 – Taxa de dados de pico para FR-SCD e FR-CCD.

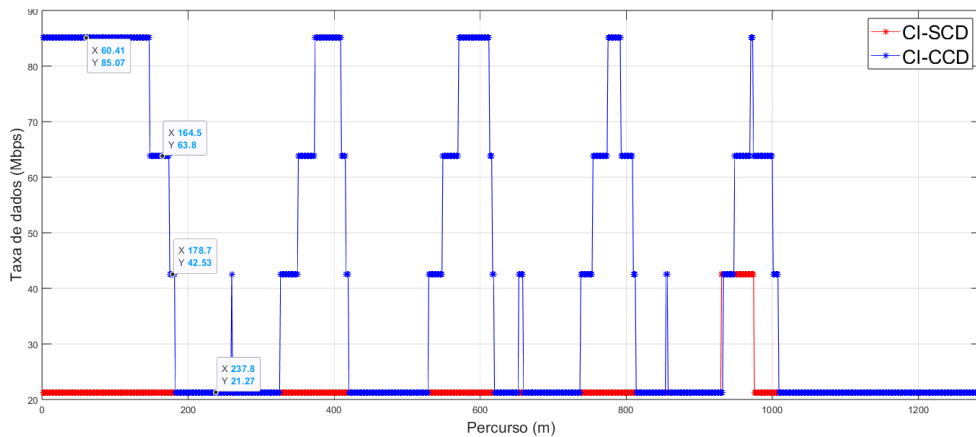


Fonte: O Autor.

Conicionados aos fatores da SINR conforme ordem  $M$  das modulações e BER menor que  $10^{-6}$ , para o cenário CI-SCD e CI-CCD conforme pode ser visualizado na Figura 4.19, é possível verificar a diferença correspondente no decorrer do percurso. As taxas para o modelo CI-SCD, não apresenta diferenças quando comparadas com o mesmo cenário para modelo FR na Figura 4.18. Tal implicação, sugere que no cálculo da taxa de dados de pico, o fator preponderante é analisar a ordem  $M$  de modulação, já expressadas em 4.4.4. O mesmo padrão segue-se para CI-CCD, contudo a principal diferença, conforme discutido anteriormente, é que no modelo “Close-in” há a superestimação da SINR, para pontos onde o modelo “Freespace” não superestima. Este fato implica que no momento de escolher a modulação, a característica da SINR superestimada produz uma BER que possibilita a escolha de maior grau para a ordem

de modulação. Nos pontos que compreendem as distâncias de 500m até 1,000km do percurso inicial, observa-se na Figura 4.19 quando comparadas à Figura 4.18, o alcance de 256-QAM com taxas de dados de pico definidas em 85,07Mbps acontece 3 vezes, enquanto para FR-CCD, utiliza-se 64-QAM.

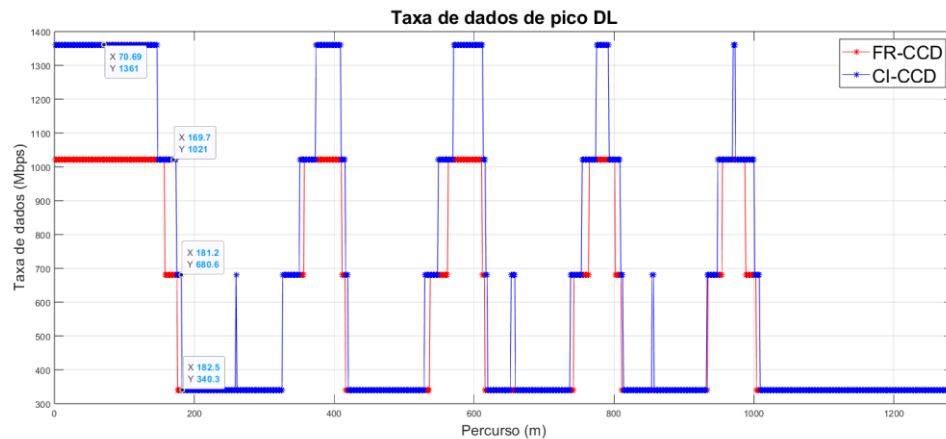
Figura 4.20 – Taxa de dados de pico para CI-SCD e CI-CCD.



Fonte: O Autor.

Para fins de simulação, agregando apenas para os 2 cenários FR-CCD e CI-CCD, conforme a Tabela 4.6, mudando apenas os parâmetros de portadora agregada para 4, e camadas MIMO para 4, obtemos então os resultados conforme a Figura 4.20. Observando que a taxa de dados de pico de *downlink* está acima de 1Gbps, evidentemente, quando há compatibilidade entre gNB e UE para enlaces com taxas elevadas, é possível estabelecer comunicação acima das taxas evidenciadas na Figura 4.20. Uma das formas de aumentar a taxa, depende do tamanho de cada slot para subframes por quadro OFDM, quando a numerologia aumenta, subsequentemente  $Bw$  e SCS aumentam, permitindo assim que uma quantidade maior de dados por *frame* seja transmitida, ainda assim, quanto ao aumento da numerologia, também especifica os tipos de aplicações, que podem conter frames menores, dados os tamanhos dos slots, e isso contribui ainda mais para a maior vazão de dados no enlace.

Figura 4.21 – Taxa de dados de pico para FR-CCD e CI-CCD.



Fonte: O Autor.

Numericamente, para esta configuração (Figura 4.21), tem-se que no cenário FR-CCD e CI-CCD modulando em 256-QAM, alcança-se uma taxa de dados de pico de 1,36Gbps, com média de 554,99Mbps para FR-CCD e 655,03Mbps para CI-CCD ao longo do percurso (Apêndice A 2.5.2). Ainda fazendo uma análise para eficiência espectral dada a ordem de modulação e comparação com parâmetros respectivos à Tabela 4.6, tem-se a Tabela 4.7, respectiva à coleta dos dados conforme a Figura 4.21, em que são comparados os modelos FR-CCD e CI-CCD.

Tabela 4.7 – Eficiência espectral.

Modulação	Eficiência Espectral (b/s/Hz)	Taxa de dados de pico máxima (Mbps)
QPSK	1,06	21,26
16-QAM	2,12	42,53
64-QAM	3,19	63,80
256-QAM	4,25	85,07

Fonte: O autor.

É possível notar que a eficiência condiz com as Tabelas MCS para as diferentes ordens de modulação vistas na Tabela 4.7, e a taxa de dados de pico máxima, é referenciada para apenas 1 canal, previsto que o 5G, utiliza-se de portadoras CC e tecnologia MIMO, que pode se utilizar várias portadoras e camadas MIMO, simultaneamente com modulações distintas para elevar a vazão de dados. Evidentemente, nem todos os dispositivos UE possui *hardware* compatível para tal topologia de rede, logo as taxas encontradas neste trabalho, ressaltam as possibilidades

que o 5G oferece em termos de taxa de dados de pico conforme a abordagem inicial com mapas de SINR.

## 4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme obtidos os resultados neste capítulo, considera-se que a abordagem utilizando os métodos de análise da tecnologia 5G NR a partir da SINR é eficaz, para propensão dos resultados para ambiente de simulação visando obter a BER, modulações, taxas de dados de pico, eficiência espectral e outros parâmetros. Contudo a busca das parametrizações em conformidade com a montagem do ambiente de simulação é correlata com modelo teórico, uma vez que ainda falta dados que descreva com maior exatidão a topografia regional.

As análises efetivadas tiveram como principal fundamento, aplicar a inserção do sinal 5G em contexto realístico de um centro urbano voltado a atender o cenário eMBB para o 5G na cidade de Patos de Minas. As considerações feitas a priori, para estabelecer os critérios de escolha do ponto central para disposição dos sites, realocação das posições das células, BER  $10^{-6}$ , número de portadoras agregadas e MIMO para 1, foram escolhidos de forma arbitrária.

Ressalta-se que ao trabalhar com ambos os cenários sem correção de *downtilt* SCD e cenários com correção de *downtilt* aplicados CCD traz a perspectivas do contraste que todas as variáveis inerentes as análises feitas, tem determinado grau de importância, influenciando diretamente nos dados gerados.

Entretanto, as análises realizadas compactuaram para utilização apenas dos blocos específicos de funcionamento do 5G que são inerentes do canal físico PDSCH, compreendendo uma análise que envolve a transmissão de sinais 5G, o canal AWGN e o receptor, previsto como dispositivo usuário UE. As parametrizações foram evidenciadas de acordo com as normativas expressas pela ITU, evidentemente referenciadas para o ambiente nacional conforme ANATEL.

Por fim, este capítulo gerou resultados importantes para análise, permitindo assim, avaliar os aspectos de funcionamento da tecnologia 5G em detrimento de ambientes urbanos regionais.

# Capítulo 5

## CONCLUSÕES, CONTRIBUIÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

---

### 5.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados os modelos e métodos de análises de forma a prever e prever as características do sinal 5G, quando aplicados à ambientes regionais nacionais, conforme a cidade de Patos de Minas. Evidentemente, foi possível contrastar com base nas Figuras 4.5 e 4.6, os problemas para instalação das TRxP's, as mesmas não podem ser alocadas em ambientes com passagens de pedestres, ruas, avenidas, muros, calçadas etc. Contudo estas dificuldades dinâmicas afetam diretamente na disposição das coberturas celulares para macro células, e no formado da grade dos sites.

Mesmo com uso de espaçamentos de frequências, e alocação dinâmicas de faixas de frequência, foram observados ainda a possibilidade de problemas de interferência co-canal, reflexão, difração, multipercurso, dentre outros fatores que são observados em 4.4.1. As relações de SINR para ambos os modelos *Freespace* e *Close-in* estabelece diferenças importantes nas análises, devido a superestimativa, que o modelo CI emprega para a relação de SINR, quando comparadas ao modelo FR, ainda há diferenças nas definições dos pontos onde a cobertura de sinal é mínima, como as bases das TRxP's, havendo uma oscilação que acontece para o modelo CI que pode ser determinada pela variação dos lóbulos laterais superestimados.

Mediante as etapas iniciais, a caracterização do canal, relativos à capacidade em Mbps conforme Teorema de Shannon, estabelece uma relação importante da diferença de 204Mbps para 248Mbps para a máxima capacidade aplicado aos cenários FR-CCD e CI-CCD. As análises que conduziram o cálculo da BER, permite-nos observar que a probabilidade de erro de bit, é maior para cenário SCD, visto a baixa densidade de potência de cobertura onde os mapas de SINR foram gerados, levando diretamente as características da necessidade da correção do ângulo de inclinação das antenas. Conforme Figura 4.3(b), o diagrama de irradiação do arranjo de antenas tem alta diretividade, corroborando para que o ângulo de inclinação conforme testes realizados pela ITU de 15° (18)(24) não atenda aos requisitos para elevação fixa, sendo

necessário que seja variável a depender da elevação dos pontos centrais de alocação dos sites, objetivando o acompanhamento topográfico do ambiente.

A correção da inclinação de forma individual de todas as antenas para referido cenário CCD foi fundamental para que os resultados fossem expressos em conformidade para comparação teórica das taxas aplicadas ao 5G NR. As ordens de modulação conforme já foram abordadas compreendem QPSK, 16-QAM, 64-QAM e 256-QAM dentro dos limiares estabelecidos para utilização das Tabelas MCS que dependem explicitamente da eficiência espectral como parâmetro fundamental. Contudo a análise com Tabelas MCS não foram objetivadas neste trabalho por abordar blocos funcionais adicionais, mas retratados aqui como forma a constatar a relação dos resultados obtidos pelas análises quando comparados pelos parâmetros técnicos de desempenho definidos para o 5G NR.

As constelações obtidas e analisadas, permite-nos verificar a forma em que se comporta o sinal mediante as características de  $E_b/N_0$ , contudo há diversos pontos nos mapas gerados, onde o sinal transmitido é recebido sem a possibilidade de interpretação, em alguns casos com SINR com  $-7,96\text{dB}$  para FR-CCD em trajetória de percurso linear. Ainda analisando o percurso para CI-CCD a SINR mínima é de  $-6,62\text{dB}$ . Para 256-QAM em ambos os cenários FR-CCD e CI-CCD, é possível analisar SINR de  $31,26\text{dB}$  e  $37\text{dB}$  respectivamente. É possível classificar que as curvas respectivas as modulações, estabelece o critério que atenda a BER requisitada, observando o parâmetro de  $E_b/N_0$ .

Com tais prerrogativas é importante definir que para as taxas de dados de pico não representa a vazão de dados real, que expressamente o usuário terá. A taxa de dados de pico pode ser expressa no contexto, para verificar o maior grau de vazão possível do enlace, atribuídas as condições estabelecidas na Tabela 2.6, com resultados evidenciados nas Figuras 4.18, 4.19 e 4.20, além da Tabela 4.7. Conforme discutido anteriormente, para que o usuário tenha a experiência de ter uma conexão que permita  $R_b > 1\text{Gbps}$ , é necessário que a taxa de dados de pico supere este limiar com consistência suficiente para que não haja retransmissão de dados, influenciando negativamente na probabilidade de erro de bit.

Ainda é possível afirmar, com bases nos cálculos realizados, que as atribuições do canal com  $B_w = 20\text{MHz}$  tem a taxa de pico com modulação 256-QAM, portadora unitária, e MIMO para 1, com  $85,07\text{Mbps}$  para cada canal, considerando apenas 1 canal, e conectividade para apenas 1 antena. Isso resolve, que para que as taxas no 5G sejam alcançadas no patamar de Gbps é necessário que UE e gNB suportem as características de aumento de CC e MIMO superando assim as características do 4G LTE, uma vez que o 5G permite, utilizar sub-portadoras com diferentes modulações a depender da utilização e aspectos do canal.



Considerando o dispositivo mais básico que suporta o uso do 5G, é possível dizer que o usuário terá uma experiência razoável de conexão, para FR-CCD com média de 36,55Mbps, e para CI-CCD com média de 42,19Mbps. Para que o usuário consiga simplesmente assistir um vídeo em FULL HD (1080p), é necessário ter no mínimo 4Mbps para uma boa experiência, e previamente pelos modelos simulados é possível atender desde que o usuário esteja em margem de cobertura com BER estimada dentro dos limiares aceitáveis.

Maximizando os parâmetros das opções conforme descrito anteriormente, a alta conectividade e vazão de dados na rede, permitirá exceder 10Gbps com uso de várias sub-portadoras e diferentes larguras de banda, envolvendo aplicações como realidade aumentada, IoT, aplicações em tempo real, streaming de vídeos, e outros serviços que requer alta vazão de dados na rede. Contudo, com a adequação do Core do 5G com o passar das novas atualizações e migrações dos dispositivos e hardware compatíveis com a tecnologia, a latência da rede diminuirá drasticamente, logo será possível analisar além dos cenários eMBB, o uRLLC e mMTC. Contudo, toda esta análise para TRxP's com apontamento estático, gera coberturas irregulares, que só podem ser sanadas com o uso de *Beamforming*, ou seja direcionamento da irradiação do sinal a ser propagado diretamente para a localização da UE. Tão somente, o uso de TDD, gera a predominância de outros fatores interferentes no sinal, como os aspectos interferentes de espaçamento entre frames, comprimento do slot, faixas dinâmicas de frequência, reutilização de faixas de frequência, e todas estas características influem diretamente na qualidade dos serviços e aplicações desta arquitetura do 5G NR como meio de conexão.

Por fim, espera-se que este trabalho tenha contribuído de forma a apresentar um estudo ainda que específico, mas importante para a implantação da tecnologia 5G em ambientes regionais com características distintas de topografia, contrastando com a importância de se analisar as variáveis que afetam o sistema como um todo.

## **5.2 PROPOSTAS PARA CONTINUAÇÃO DESTE TRABALHO**

Este trabalho de conclusão de curso, tem como objetivo realizar a análise do sinal 5G para a cidade de Patos de Minas, ambiente regional com base na cobertura de sinal utilizando a SINR. Contudo, há vários segmentos que podem ser corroborados para continuação dele, como, aplicação de *Beamforming* para cenários estudados previamente analisados neste trabalho, associação de portadoras agregadas para ambiente FR-CCD e CI-CCD, além de acrescentar

demais modelos teóricos como “*rain*”, “*fog*”, “*gas*”, “*Longley-ric*”, além de possíveis associações de modelos de propagação, prevendo cenários específicos de *downlink* e *uplink*.

Analisando explicitamente as condições de canais e portadoras, à aplicação de MIMO para cenários diversos e das possibilidades de testes de cenários com MU-MIMO aplicados ao 5G. As contribuições para este trabalho no segmento de análise de desempenho do 5G, podem ser expressas, no cálculo da capacidade do canal para *uplink* UP, taxa de dados real para UE. São condições diversas que permeiam abranger de forma geral uma análise da qualidade e desempenho do sinal 5G como um todo.

# REFERÊNCIAS

---

- 1 INTEL. **Understanding the Advantages of 5G.** Disponível em: <https://www.intel.com.br/content/www/br/pt/wireless-network/5g-technology-overview.html>. Acesso em: 27 dez. 2021.
- 2 SÉRIE Especial 5G. **Governo do Brasil.** GOV.BR, 05, nov. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/transito-e-transportes/2021/11/leilao-do-5g-confirma-expectativas-e-arrecada-r-47-2-bilhoes>. Acesso em: 27 dez. 2021.
- 3 A. P. K. Reddy *et al.*, "**5G New Radio Key Performance Indicators Evaluation for IMT-2020 Radio Interface Technology,**" in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 112290-112311, 2021
- 4 THALES. **5G technology and networks (speed, use cases, rollout).** 2021. Disponível em: <https://www.thalesgroup.com/en/markets/digital-identity-and-security/mobile/inspired/5G>. Acesso em: 27 dez. 2021.
- 5 RAPPAPORT, S. Theodore. **Comunicações sem Fio, Princípios e Práticas.** 2. Ed, PEARSON.: Prentice Hall, 2008.
- 6 PATEL Saurabh, C. Malhar and Kinjal Kapadiya. **5G Future Mobile Technology-Vision 2020.** International Journal of Computer Applications (0975-8887), v. 54-No, 2012.
- 7 H. Samer and S.S. Elvino . **5G is Real: Evaluating the Compliance of the 3GPP 5G New Radio System with the ITU IMT-2020 Requirements.** IEEE Access, Department of Electrical and Computer Engineering, Canadá. 02, mar. 2020.
- 8 F. J. S. Paulo. **Geografia das Telecomunicações no Brasil.** Cultura Acadêmica Editora. 1. Ed, UNESP.: CIP, 2015.
- 9 G. Amitabha, M. Andreas, B. Matthew and C. Davaki. **A View on 5G Cellular Technology Beyond 3GPP Release 15.** IEEE Access, Nokia Bell Labs, USA. 2020.
- 10 G. R. Maccartney, T. S. Rappaport, S. Sun and S. Deng, "**Indoor Office Wideband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Channel Models at 28 and 73 GHz for Ultra-Dense 5G Wireless Networks,**" in *IEEE Access*, vol. 3, pp. 2388-2424, 2015.
- 11 S. Sun *et al.*, "**Investigation of Prediction Accuracy, Sensitivity, and Parameter Stability of Large-Scale Propagation Path Loss Models for 5G Wireless Communications,**" in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 5, pp. 2843-2860, May 2016.
- 12 T. S. Rappaport, Y. Xing, G. R. MacCartney, A. F. Molisch, E. Mellios and J. Zhang, "**Overview of Millimeter Wave Communications for Fifth Generation (5G) Wireless Networks - With a Focus on Propagation Models,**" in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 12, pp. 6213-6230, Dec. 2017.
- 13 P. Zhang, J. Li, H. Wang, H. Wang and W. Hong, "**Indoor Small-Scale Spatiotemporal Propagation Characteristics at Multiple Millimeter-Wave Bands,**" in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 12, pp. 2250-2254, Dec. 2018.

- 14 H. Jiang, Y. Xue, J. Zhou, Z. Chen, J. Dang and L. Wu, "**A 3D Cylinder MIMO Channel Model for 5G Macrocell Mobile-to-Mobile Communication Systems**," in IEEE Access, vol. 7, pp. 119350-119356, 2019.
- 15 P. Zhang, B. Yang, C. Yi, H. Wang and X. You, "**Measurement-Based 5G Millimeter-Wave Propagation Characterization in Vegetated Suburban Macrocell Environments**" in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 68, no. 7, pp. 5556-5567, July 2020
- 16 E. I. Adegoke, E. Kampert and M. D. Higgins, "**Channel Modeling and Over-the-Air Signal Quality at 3.5 GHz for 5G New Radio**" in IEEE Access, vol. 9, pp. 11183-11193, 2021.
- 17 Y. Banday, G. M. Rather and G. R. Begh, "**SINR Analysis and Interference Management of Macrocell Cellular Networks in Dense Urban Environments**," in Wireless Personal Communications, vol. 111, pp. 1645–1665, 2020.
- 18 MATHWORKS. **SINR Map for a 5G Urban Macro-Cell Test Environment. Resources Documentation R2021b**. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/phased/ug/sinr-map-for-a-5g-urban-micro-cell-test-environment.html>. Acesso em: 13, jan. 2022.
- 19 A 5G Americans White Paper: **Cellular Communications In A 5G Era**. Jan 2022.
- 20 F. Launay. **NG-RAN and 5G NR, 5G Rádio Access Network and Radio Interface**. iSTE and Wiley & Sons Inc, Ago 2021
- 21 W. C. Lee. **Mobile Communications Design Fundamentals**. 2° Ed, Jhon Wiley & Sons, Jan 1993.
- 22 G. L. Stüber. **Principles of Mobile Communication**. 2° Ed. Jan 2000.
- 23 Y. Hao. **Investigation and Technological Comparison of 4G and 5G Networks**. Journal of Computer and Communications, 9, 36-43, Vol.9 No.1, 2021.
- 24 Report ITU-R "**Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020**", 2017. Disponível em: <https://www.itu.int/md/R15-SG05-C-0057>. Acesso em: 15, jul. 2022.
- 25 M. D. Yacoub. **Foundations of Mobile Radio Engineering**. 1° Ed, CRC Press, Apr 1993.
- 26 J. S. Seybold. **Introduction to RF Propagation**. 1° Ed, Jhon Wiley & Sons, Set 2005.
- 27 T. Tolulop et al. **Path Loss Measurements and Model Analysis in an Indoor Corridor Environment at 28 GHz and 38 GHz**. Sensors 2022, 22, 7642. Out 2022.
- 28 R. E. Ziemer and W. H. Tranter. **Principles of Communications**. 7° Ed, Wiley, Mar 2014.
- 29 EN-DC Mode According to 3GPP 38.521-3. **5G NR FR1 NON-STANDALONE UE RF CONFORMANCE TESTING**. HOHDE & SCHWARZ SL368, V-0e, Jun 2021.
- 30 L. Hanzo, S.X. Ng, T. Keller, W.T. Webb. **Quadrature Amplitude Modulation: From Basics to Adaptive Trellis-Coded, Turbo-Equalised and Space-Time Coded OFDM, CDMA and MC-CDMA Systems**. Wiley-IEEE Press, Pages: 1036, Cap. 1-41, 2004.

- 31 WAVEFORM. 5G's Faster Data Rates and Shannon's Law. Updated: Apr 28, 2022. Disponível em: <https://www.waveform.com/a/b/guides/5g-and-shannons-law>. Acesso em: 12, jun. 2023
- 32 J. G. Proakis and M. Slehi. **Digital Communications**. 5° Ed, McGraw-Hill Education, Nov 2007.
- 33 3GPP, ETSI TS 138 306 V16.1.0. **5G; NR; User Equipment (UE) radio access capabilities**. Ago 2020.
- 34 3GPP TS 38.101-1 version 15.2.0 Release 15. **5G; NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone**. Ago. 2018.
- 35 Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). **PROPOSED AMENDMENTS TO [IMT.EVAL]. RADIOCOMMUNICATION STUDY GROUPS**, Document 5D/5-E, Dez 2007.
- 36 Weiss, T.A. e Jondral, F.K., Karlsruhe Univ., Alemanha; **Spectrum pooling: an innovative strategy for the enhancement of spectrum efficiency**, IEEE Communications Magazine, vol 42, no.4, Mar 2004, pp. 8-14.

# APÊNDICE A: CÓDIGO MATLAB

Ressalta-se que o código foi gerado Utilizando MatLab R2020a com tipo de arquivo (.mlx)

## 1 – CRIAÇÃO DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

### 1.1.1 - Variáveis iniciais

```
% 1.1 - Variáveis iniciais
n_CellSites = 19; %Número de células
isd = 200; % Distância entre células
%Site central
tx.Name = "Site_1"; %String
tx.TransmitterFrequency = 3.5e9; %Hz
tx.Latitude = -18.58971; %Degree
tx.Longitude = -46.51506; %Degree
%Ant = ;
tx.AntennaHeight = 25; %m
tx.TransmitterPower = 25; %W

tx_center = txsite(tx)

%Distância e ângulos das posições das células adjacentes
siteDistances = zeros(1,n_CellSites);
siteAngles = zeros(1,n_CellSites);

%1° Anel de células adjacentes (Interior)
siteDistances(2:7) = isd;
siteAngles(2:7) = 30:60:360;

%2° Anel de células adjacentes (Meio)
siteDistances(8:13) = 2*isd*cosd(30); %Por triangulação dos hexágonos
encontra-se este angulo de 30°
siteAngles(8:13) = 0:60:300;

%3° Anel de células adjacentes (Externo)
siteDistances(14:19) = 2*isd;
siteAngles(14:19) = 30:60:360;

%Visualização
viewer1 = siteviewer;
show(tx_center)
viewer1.Basemap = 'Satellite';
viewer1.Name = "Figura 1 - Ponto Central"
```

### 1.1.2 - Parâmetros de criação das células

```
%Parâmetros da matriz correspondentes as células
n_Cells = n_CellSites*3;
cellLats = zeros(1,n_Cells);
cellLons = zeros(1,n_Cells);
cellNames = strings(1,n_Cells);
cellAngles = zeros(1,n_Cells);
```

```

cellSectorAngles = [30 150 270]; %ângulos respectivos a orientação dos
transmissores de cada célula

%Indexação dos dados de posição de cada célula
i = 1; % Contador
ii = 1;
for i = 1:n_CellSites
    %Obtenção das coordenadas geográficas
    [cell_Lat,cell_Lon] = location(tx_center,siteDistances(i),siteAngles(i));
    %Obtém coordenadas geográficas

    %Laço iterativo definindo coordenadas para cada site
    for cellSectorAngle = cellSectorAngles
        cellNames(ii) = "Cell_" + ii;
        cellLats(ii) = cell_Lat;
        cellLons(ii) = cell_Lon;
        cellAngles(ii) = cellSectorAngle;
        ii = ii + 1;
    end
end

```

### 1.1.3 - Criação dos Transmissores

```

%Criação dos Transmissores de cada célula
tx_s = txsite('Name',cellNames, ...
    'Latitude',celllats, ...
    'Longitude',celllons, ...
    'AntennaAngle',cellAngles, ...
    'AntennaHeight',tx.AntennaHeight, ...
    'TransmitterFrequency',tx.TransmitterFrequency, ...
    'TransmitterPower',tx.TransmitterPower);

```

### %Visualização

```

figure;
viewer2 = siteviewer;
show(tx_s)
viewer2.Basemap = 'Satellite';
viewer2.Name = "Figura 2 - Disposição geral dos Sites"

```

### 1.1.4 - Correção das posições centrais das células:

```

%CORREÇÃO DA POSIÇÃO CÉLULAS:
pos_correction = zeros(2,length(tx_s)); %Inicialização da matriz
A = ones(2,3); %Matriz de controle

%Definição das informações definidas manualmente
%Células 25/26/27
[new_Lat,new_Lon] = location(tx_s(25),20,340)
pos_correction(:,[25:27]) = ([new_Lat;new_Lon].*A);

%Células 34/35/36
[new_Lat,new_Lon] = location(tx_s(34),20,180)
pos_correction(:,[34:36]) = ([new_Lat;new_Lon].*A);

```

```

%Células 46/47/48
[new_Lat,new_Lon] = location(tx_s(46),20,340)
pos_correction(:,[46:48]) = ([new_Lat;new_Lon].*A);

% %Célula 55/56/57
[new_Lat,new_Lon] = location(tx_s(55),30,320)
pos_correction(:,[55:57]) = ([new_Lat;new_Lon].*A);

%Aplicação da correção do posicionamento geográfico
for i=1:length(tx_s)
    if pos_correction(1,i) ~= 0
        tx_s(i).Latitude = pos_correction(1,i)
        tx_s(i).Longitude = pos_correction(2,i)
    end
end
end

```

### %Visualização

```

viewer2_1 = siteviewer;
show(tx_s)
viewer2_1.Basemap = 'Satellite';
viewer2_1.Name = "Figura 3 - Células realocados geograficamente"

```

## 1.2 - Elementos de Antena

### 1.2.3 - Arranjo 8x8

```

% Define as dimensões da matriz
nrow = 8;
ncol = 8;

% Define o espaçamento dos elementos
lambda = physconst('lightspeed')/tx.TransmitterFrequency;
drow = lambda/2;
dcol = lambda/2;

% Define o tipo de redução dos lóbulos laterais
dBdown = 30;
taperz = chebwin(nrow,dBdown);
tapery = chebwin(ncol,dBdown);
tap = taperz*tapery.'; % Multiply vector tapers to get 8-by-8 taper values

% Cria uma matriz consistentes com os dados anteriores, de 8x8
arrayAntenna = phased.URA('Size',[nrow ncol], ...
    'Element',antennaElement, ...
    'ElementSpacing',[drow dcol], ...
    'Taper',tap, ...
    'ArrayNormal','x');

```

### %Visualização

```

image_Ant3 = figure
pattern(arrayAntenna,tx.TransmitterFrequency);

```

```

%Definição do modelo de antena 3

```



```
antenna_Model3 = arrayAntenna;
```

## 1.3 - Receptor

```
% Padrão do receptor
% Define receiver parameters using Table 8-2 (b) of Report ITU-R M.[IMT-
2020.EVAL]
bw = 20e6; % 20 MHz Bande frequência para transmissão
rxNoiseFigure = 7; %dB - Figura de ruído do receptor
rxNoisePower = -174 + 10*log10(bw) + rxNoiseFigure; %Potência do ruído no
receptor
rxGain = 0; % dBi
rxAntennaHeight = 1.5; % m

rx = [];
    rx.Name = "Cell"; %String
    rx.Latitude = -18.590513; %Degree
    rx.Longitude = -46.515091 ; %Degree ,
    rx.AntennaHeight = rxAntennaHeight; %m
    rx.SystemLoss = 0;
    rx.ReceiverSensitivity = -120; %Sensibilidade

rx_Device = rxsite(rx)
```

### %Visualização

```
image_Rec1 = figure
pattern(rx_Device,tx.TransmitterFrequency)
```

## 1.4 - Mapas de SINR

### 1.4.1 - Mapa SINR de Teste do cenário

```
txs_am3 = tx_s; %Cópia da matriz de dados, visando modificações ao decorrer do
código
```

```
downtilt = 15; %Valor definido manualmente para cada transmissor
```

```
for tx = txs_am3
    tx.Antenna = antenna_Model3;
    tx.AntennaAngle = [tx.AntennaAngle, -downtilt];
end
```

```
% Display SINR map
if isvalid(image_Ant3)
    close(image_Ant3)
end
```

### %Visualização

```
sinr(txs_am3,'freespace', ...
    'ReceiverGain',rxGain, ...
    'ReceiverAntennaHeight',rxAntennaHeight, ...
    'ReceiverNoisePower',rxNoisePower, ...
    'MaxRange',isd, ...
    'Resolution',isd/5)
```

**%Visualização**

```
sinr(txs_am3,'close-in', ...
    'ReceiverGain',rxGain, ...
    'ReceiverAntennaHeight',rxAntennaHeight, ...
    'ReceiverNoisePower',rxNoisePower, ...
    'MaxRange',isd, ...
    'Resolution',isd/5)
```

**#SALVAMENTO DOS DADOS DOS MAPAS SCD**

```
fr_SCD_DATAmap = sinr(txs_am3,'freespace', ...
    'ReceiverGain',rxGain, ...
    'ReceiverAntennaHeight',rxAntennaHeight, ...
    'ReceiverNoisePower',rxNoisePower, ...
    'MaxRange',isd, ...
    'Resolution',isd/5);

ci_SCD_DATAmap = sinr(txs_am3,'close-in', ...
    'ReceiverGain',rxGain, ...
    'ReceiverAntennaHeight',rxAntennaHeight, ...
    'ReceiverNoisePower',rxNoisePower, ...
    'MaxRange',isd, ...
    'Resolution',isd/5);

save("fr_SCD_DATAmap.mat","fr_SCD_DATAmap")
save("ci_SCD_DATAmap.mat","ci_SCD_DATAmap")
```

**1.4.2 - Correção do ângulo de inclinação (Downtilt) dos Transmissores**

```
txs_am3_Cor = txs_am3; %Transposição da matriz de sites, para variável a ser
trabalhada durante o código neste passo!
rel_Dist = 4; %Relação da distância do ponto focal entre as partes do ponto de
transmissão até a célula mais próxima
d_tilt = zeros(1,length(txs_am3_Cor))
```

**%CORREÇÃO - DOWNTILT**

```
%p1 -> Ponto de Origem do transmissor
%p2 -> Ponto do Transmissor + Altura da antena
%p3 -> Ponto de apontamento do transmissor
%p4 -> Ponto de Origem do vetor interesse
%p5 -> Ponto do Transmissor + Altura da Antena
%vec1 -> p2-p1 - Vetor Origem
%pi -> Ponto imaginário de interesse
```

```
for i=1:length(txs_am3_Cor) %1° Varredura
    %Definição dos pontos
    p1 = [txs_am3_Cor(i).Latitude,
txs_am3_Cor(i).Longitude,txs_am3_Cor(i).elevation]; %1° Ponto
    p2 = [txs_am3_Cor(i).Latitude,
txs_am3_Cor(i).Longitude,(txs_am3_Cor(i).elevation+25)]; %2° Ponto

    %Definição do Vetor 1
```

```

vec21 = p2-p1;

%Ponto de Interesse
pi = location(txs_am3_Cor(i),200,txs_am3_Cor(i).AntennaAngle(1)); %Ponto
imaginário
tx_pi = txsite('Latitude',pi(1),'Longitude',pi(2)); %Só para encontrarmos
os sites mais próximos

for ii=1:length(txs_am3_Cor) %2° Varredura - Distâncias do ponto
imaginário com todas as células
    dist(ii) = distance(tx_pi,txs_am3_Cor(ii)); %Encontra as distâncias
dos o sites mais próximos do ponto imaginário
end

%Definir p4 e p5
cmp = find(dist == min(dist)); %Site com menor distância ao ponto
imaginário
p4 = [txs_am3_Cor(cmp(1)).Latitude, txs_am3_Cor(cmp(1)).Longitude,
txs_am3_Cor(cmp(1)).elevation]; %4° Ponto
p5 = [txs_am3_Cor(cmp(1)).Latitude, txs_am3_Cor(cmp(1)).Longitude,
(txs_am3_Cor(cmp(1)).elevation+25)];

%Definir p3
p3 = ((p4-p1)/rel_Dist)+p1; %Ponto p3
p3(3) = txsite('Latitude',p3(1),'Longitude',p3(2)).elevation;

%Definir distâncias entre os pontos definidos
p1(3) = p3(3); %Elevação igual para estes pontos permite aplicar a
relação de triângulos retângulos
dist_p1p3 =
distance(txsite('Latitude',p3(1),'Longitude',p3(2)),txsite('Latitude',p1(1),'L
ongitude',p1(2)));

%ângulo entre vetor_p1p2 e vetorp3p2
Ang_b = 180 - 90 - rad2deg(atan(tan(25/dist_p1p3))); %Ângulo agudo do
triângulo retângulo p1, p2 e p3 com elevação de p2=p3

%Cálculo do Downtilt
D = (90 - Ang_b);

if isnan(D) %-> Correção dos resultados não coerentes.
    d_tilt(i) = 0;
else
    d_tilt(i) = D;
end
end

%Aplica os novos valores calculados
for i=1:length(txs_am3_Cor)
    txs_am3_Cor(1,i).AntennaAngle(2) = -d_tilt(i);
end
%OBS. Conforme dito anteriormente, o ângulo de -15° com ISD=200m e H=25m,
coincide
%implicitamente com o ponto médio entre células, desde que o cenário seja

```

```
%plano (Nem sempre real em termos práticos!)
```

### #SALVAMENTO DOS DADOS DOS MAPAS CCD

```
fr_CCD_DATAmap = sinr(txs_am3_Cor, 'freespace', ...
    'ReceiverGain', rxGain, ...
    'ReceiverAntennaHeight', rxAntennaHeight, ...
    'ReceiverNoisePower', rxNoisePower, ...
    'MaxRange', isd, ...
    'Resolution', isd/5);

ci_CCD_DATAmap = sinr(txs_am3_Cor, 'close-in', ...
    'ReceiverGain', rxGain, ...
    'ReceiverAntennaHeight', rxAntennaHeight, ...
    'ReceiverNoisePower', rxNoisePower, ...
    'MaxRange', isd, ...
    'Resolution', isd/5);

save("fr_CCD_DATAmap.mat", "fr_CCD_DATAmap")
save("ci_CCD_DATAmap.mat", "ci_CCD_DATAmap")
```

### %Visualização - "Freespace"

```
sinr(txs_am3_Cor, 'freespace', ...
    'ReceiverGain', rxGain, ...
    'ReceiverAntennaHeight', 1.5, ...
    'ReceiverNoisePower', rxNoisePower, ...
    'MaxRange', isd, ...
    'Resolution', isd/5)
```

### %Visualização - "Close-in"

```
sinr(txs_am3_Cor, 'close-in', ...
    'ReceiverGain', rxGain, ...
    'ReceiverAntennaHeight', 1.5, ...
    'ReceiverNoisePower', rxNoisePower, ...
    'MaxRange', isd, ...
    'Resolution', isd/5)
```

## 1.5 - Análise CCD "Freespace" e "Close in"

### 1.5.1 - Mapas SINR com arranjo de antenas de microfita 8x8 utilizando modelo "Freespace"

#### #Mapa SCD Freespace

```
f_sinr_medSCD = mean(fr_SCD_DATAmap.Data.SINR)
plot(fr_SCD_DATAmap.Data.SINR)
```

#### #Mapa SCD Close-in

```
c_sinr_medSCD = mean(ci_SCD_DATAmap.Data.SINR)
hold on
plot(ci_SCD_DATAmap.Data.SINR)
```

#### #Mapa CCD Freespace

```
f_sinr_medCCD = mean(fr_CCD_DATAmap.Data.SINR)
plot(fr_CCD_DATAmap.Data.SINR)
```

## #Mapa CCD Close-in

```
c_sinr_medCCD = mean(ci_CCD_DATAmap.Data.SINR)
hold on
plot(ci_CCD_DATAmap.Data.SINR)
```

## 1.6 SAVE

```
save("result_p1.mat","antenna_Model3","arrayAntenna","d_tilt","image_Ant3","patchElement","txs_am3_Cor","rx_Device")
```

## #UPLOADS

### 2.1

```
load("fr_SCDMap.mat")
load("ci_SCDMap.mat")
load("fr_CCDMap.mat")
load("ci_CCDMap.mat")
```

### 2.2

```
load("analise.mat")
```

## 2 – ANÁLISES

### 2.1 - Análise Modelos SCD e CCD

```
%Média da cobertura em (dB)
med_frSCDMap = mean(fr_SCDMap.Data.SINR)
med_frCCDMap = mean(fr_CCDMap.Data.SINR)
med_ciSCDMap = mean(ci_SCDMap.Data.SINR)
med_ciCCDMap = mean(ci_CCDMap.Data.SINR)
```

### 2.2 - Análise em um percurso

#### 2.2.1 - Criação do percurso

```
%Pontos de percurso
pA = [-18.595547,-46.514955]; %Coordenadas do ponto A
pB = [-18.583937,-46.514910]; %Coordenadas do ponto B

%Distância entre os pontos
dist_AB =
distance(txsite("Latitude",pA(1),"Longitude",pA(2)),txsite("Latitude",pB(1),"Longitude",pB(2))); %Distância em Km

%Pontos do percurso
np = (dist_AB-mod(dist_AB,1))/2;
per_AB(1,:) = linspace(pA(1),pB(1),1000);
per_AB(2,:) = linspace(pA(2),pB(2),1000);

%Criação dos pontos de recepção
for i=1:length(per_AB)
rx_AB(i)=rxsite("AntennaHeight",1.5,"Latitude",per_AB(1,i),"Longitude",per_AB(2,i),"ReceiverSensitivity",-120);
end
```

### 2.2.2 - Análise "txs\_am3" (Arranjo de antenas 8x8) do modelo "Freespace" SCD e CCD

```
%SINR sem correção de DTilt
perfr_SINRdB0 = sinr(rx_AB,txs_am3,"freespace","ReceiverAntennaHeight",1.5);
%dB
perfr_SINR0 = 10.^(perfr_SINRdB0./10); % Linear

%SINR com correção de DTilt
perfr_SINRdB1 =
sinr(rx_AB,txs_am3_Corrigido,"freespace","ReceiverAntennaHeight",1.5); %dB
perfr_SINR1 = 10.^(perfr_SINRdB1./10); % Linear
```

#### %Visualização

```
figure
plot((1:1000).*(dist_AB/1000),perfr_SINRdB0,"r",(1:1000).*(dist_AB/1000),perfr_
_SINRdB1,"b")
title("SINR - 'freespace'")
legend("SCD - "+"Máx: "+max(perfr_SINRdB0) +"dB"+ " - Mín:
"+min(perfr_SINRdB0)+"dB", "CCD - "+"Máx: "+max(perfr_SINRdB1) +"dB"+ " - Mín:
"+min(perfr_SINRdB1)+"dB")
xlabel('Percurso (m)')
ylabel('SINR (dB)')
axis([0,dist_AB,1.5*min(perfr_SINRdB1),1.5*max(perfr_SINRdB1)])
grid on
```

### 2.2.3 - Análise "txs\_am3" (Arranjo de antenas 8x8) do modelo "Close-in" SCD e CCD

```
%SINR sem correção de DTilt
perci_SINRdB0 = sinr(rx_AB,txs_am3,"close-in","ReceiverAntennaHeight",1.5);
%dB
perci_SINR0 = 10.^(perci_SINRdB0./10); % Linear

%SINR com correção de DTilt
perci_SINRdB1 = sinr(rx_AB,txs_am3_Corrigido,"close-
in","ReceiverAntennaHeight",1.5); %dB
perci_SINR1 = 10.^(perci_SINRdB1./10); % Linear
```

#### %Visualização

```
figure
plot((1:1000).*(dist_AB/1000),perci_SINRdB0,"r",(1:1000).*(dist_AB/1000),perci_
_SINRdB1,"b")
title("SINR - 'Close-in'")
legend("SCD - "+"Máx: "+max(perci_SINRdB0) +"dB"+ " - Mín:
"+min(perci_SINRdB0)+"dB", "CCD - "+"Máx: "+max(perci_SINRdB1) +"dB"+ " - Mín:
"+min(perci_SINRdB1)+"dB")
xlabel('Percurso (m)')
ylabel('SINR (dB)')
axis([0,dist_AB,1.5*min(perci_SINRdB1),1.5*max(perci_SINRdB1)])
grid on
```

## 2.2.4 - Análise da capacidade do canal conforme Shannon

### #Freespace

```
%Cálculo das capacidades entre sem e com correção de Downtilt
capacity0_fr = round(bw*log2(1+perfr_SINR0)/1e6); %Unidade: (Mbps)
capacity1_fr = round(bw*log2(1+perfr_SINR1)/1e6); %Unidade: (Mbps)
```

### %Visualização

```
figure
plot((1:1000).*(dist_AB/1000),capacity0_fr,"r",(1:1000).*(dist_AB/1000),capaci
ty1_fr,"b")
title("C(Mbps) - 'Freespace'")
legend("SCD - "+"Máx: "+max(capacity0_fr) +"Mbps"+ " - Mín:
"+min(capacity0_fr)+"Mbps", "CCD - "+"Máx: "+max(capacity1_fr) +"Mbps"+ " -
Mín: "+min(capacity1_fr)+"Mbps")
xlabel('Percurso (m)')
ylabel('Capacidade (Mbps)')
axis([0,dist_AB,1.5*min(capacity1_fr),1.5*max(capacity1_fr)])
grid on
```

### #Close-in

```
%Cálculo das capacidades entre sem e com correção de Downtilt
capacity0_ci = round(bw*log2(1+perci_SINR0)/1e6); %Unidade: Mbps - Capacidade
do canal
capacity1_ci = round(bw*log2(1+perci_SINR1)/1e6); %Unidade: Mbps - Capacidade
do canal
```

### %Visualização

```
figure
plot((1:1000).*(dist_AB/1000),capacity0_ci,"r",(1:1000).*(dist_AB/1000),capaci
ty1_ci,"b")
title("C(Mbps) - 'Close-in'")
legend("SCD - "+"Máx: "+max(capacity0_ci) +"Mbps"+ " - Mín:
"+min(capacity0_ci)+"Mbps", "CCD - "+"Máx: "+max(capacity1_ci) +"Mbps"+ " -
Mín: "+min(capacity1_ci)+"Mbps")
xlabel('Percurso (m)')
ylabel('Capacidade (Mbps)')
axis([0,dist_AB,1.5*min(capacity1_fr),1.5*max(capacity1_ci)])
grid on
```

## 2.3 - Análise da BER

### 2.3.1 - Análise da BER para M ordem

```
%Definição do tipo e ordem das Modulações
```

```
M_name = ["QPSK", "16-QAM", "64-QAM", "256-QAM"];
```

```
M_ord = [4,16,64,256];
```

```
ber_lim = 10e-6; %Parâmetro de limitação para a BER
```

```
%% Cálculo da BER para o percurso utilizando todos os modelos de M-QAM
```

```
for i=1:length(M_ord)
```

```
    % Freespace - SCD
```

```
        EbNo_dB0(i,:) = perfr_SINRdB0 - log2(M_ord(i)); %Energia de
bit/Potência do ruído
```

```
        EbNo0(i,:) = 10.^(EbNo_dB0(i,:)./10);
```

```
        if i==1
```

```

        ber_frSCD(i,:) =
berawgn(EbNo_dB0(i,:), "PSK",4, 'nondiff'); %BER QPSK
    else
        ber_frSCD(i,:) = berawgn(EbNo_dB0(i,:), "QAM",M_ord(i));
%BER M-QAM
    end

    % Freespace - CCD
EbNo_dB1(i,:) = perfr_SINRdB1 - log2(M_ord(i)); %Energia de
bit/Potência do ruído
EbNo1(i,:) = 10.^(EbNo_dB1(i,:)/10);
    if i==1
        ber_frCCD(i,:) =
berawgn(EbNo_dB1(i,:), "PSK",4, 'nondiff'); %BER QPSK
    else
        ber_frCCD(i,:) = berawgn(EbNo_dB1(i,:), "QAM",M_ord(i));
%BER M-QAM
    end

    % Close-in - SCD
EbNo_dB2(i,:) = perci_SINRdB0 - log2(M_ord(i)); %Energia de
bit/Potência do ruído
EbNo2(i,:) = 10.^(EbNo_dB2(i,:)/10);
    if i==1
        ber_ciSCD(i,:) =
berawgn(EbNo_dB2(i,:), "PSK",4, 'nondiff'); %BER
    else
        ber_ciSCD(i,:) = berawgn(EbNo_dB2(i,:), "QAM",M_ord(i));
%BER
    end

    % Close-in - CCD
EbNo_dB3(i,:) = perci_SINRdB1 - log2(M_ord(i)); %Energia de
bit/Potência do ruído
EbNo3(i,:) = 10.^(EbNo_dB3(i,:)/10);
    if i==1
        ber_ciCCD(i,:) =
berawgn(EbNo_dB3(i,:), "PSK",4, 'nondiff'); %BER
    else
        ber_ciCCD(i,:) = berawgn(EbNo_dB3(i,:), "QAM",M_ord(i));
%BER
    end

end

figure
semilogy((1:1000).*(dist_AB/1000), [ber_frSCD(1,:);ber_frSCD(2,:);ber_frSCD(3,:);
ber_frSCD(4,:)])
xlim([0 dist_AB])
title("BER - Freespace SCD")
ylabel("BER")
xlabel("Percurso (m)")
legend(M_name)
grid on

```



```

figure
semilogy((1:1000).*(dist_AB/1000),[ber_frCCD(1,:);ber_frCCD(2,:);ber_frCCD(3,:);ber_frCCD(4,:)])
xlim([0 dist_AB])
title("BER - Freespace CCD")
ylabel("BER")
xlabel("Percurso (m)")
legend(M_name)
grid on

figure
semilogy((1:1000).*(dist_AB/1000),[ber_ciSCD(1,:);ber_ciSCD(2,:);ber_ciSCD(3,:);ber_ciSCD(4,:)])
xlim([0 dist_AB])
title("BER - Close-in SCD")
ylabel("BER")
xlabel("Percurso (m)")
legend(M_name)
grid on

figure
semilogy((1:1000).*(dist_AB/1000),[ber_ciCCD(1,:);ber_ciCCD(2,:);ber_ciCCD(3,:);ber_ciCCD(4,:)])
xlim([0 dist_AB])
title("BER - Close-in CCD")
ylabel("BER")
xlabel("Percurso (m)")
legend(M_name)
grid on

```

### 2.3.2 - Escolha da Ordem de Modulação

#### #Freespace-SCD

```

%% Escolha da Modulação a ser utilizada no percurso Freespace-SCD
for i=1:length(ber_frSCD) %Varredura pelas colunas da matriz
    if min(ber_frSCD(:,i))<=ber_lim %Condição de encontrar Posição(1,c) <= 10^-6
        w = ber_frSCD(:,i)<=ber_lim;
        for ii=1:length(w) %Varredura do vetor w para escolha da modulação de ordem mais alta com BER<= 10^-6
            if w(ii) == 1
                bergraf_frSCD(1,i) = ii;%M_ord(ii);
                bergraf_frSCD(2,i) = ber_frSCD(ii,i);
            end
        end
    else
        bergraf_frSCD(1,i) = 1;%M_ord(1);
        bergraf_frSCD(2,i) = ber_frSCD(1,i);
    end
end
end

```

```

%%Escolha da Modulação a ser utilizada no percurso Freespace-CCD
for i=1:length(ber_frCCD) %Varredura pelas colunas da matriz

```

```

    if min(ber_frCCD(:,i))<=ber_lim %Condição de encontrar Posição(1,c) <=
10^-6
        w = ber_frCCD(:,i)<=ber_lim;
        for ii=1:length(w) %Varredura do vetor w para escolha da modulação de
ordem mais alta com BER<= 10^-6
            if w(ii) == 1
                bergraf_frCCD(1,i) = ii; %M_ord(ii);
                bergraf_frCCD(2,i) = ber_frCCD(ii,i);
            end
        end
    else
        bergraf_frCCD(1,i) = 1; %M_ord(1);
        bergraf_frCCD(2,i) = ber_frCCD(1,i);
    end
end
end

```

### #Close-in

```

%% Escolha da Modulação a ser utilizada no percurso Close-in - SCD
for i=1:length(ber_ciSCD) %Varredura pelas colunas da matriz
    if min(ber_ciSCD(:,i))<=ber_lim %Condição de encontrar Posição(1,c) <=
10^-6
        w = ber_ciSCD(:,i)<=ber_lim;
        for ii=1:length(w) %Varredura do verto w para escolha da modulação de
ordem mais alta com BER<= 10^-6
            if w(ii) == 1
                bergraf_ciSCD(1,i) = ii;%M_ord(ii);
                bergraf_ciSCD(2,i) = ber_ciSCD(ii,i);
            end
        end
    else
        bergraf_ciSCD(1,i) = 1;%M_ord(1);
        bergraf_ciSCD(2,i) = ber_ciSCD(1,i);
    end
end
end

%Escolha da Modulação a ser utilizada no percurso Close-in - CCD
for i=1:length(ber_ciCCD) %Varredura pelas colunas da matriz
    if min(ber_ciCCD(:,i))<=ber_lim %Condição de encontrar Posição(1,c) <=
10^-6
        w = ber_ciCCD(:,i)<=ber_lim;
        for ii=1:length(w) %Varredura do vetor w para escolha da modulação de
ordem mais alta com BER<= 10^-6
            if w(ii) == 1
                bergraf_ciCCD(1,i) = ii; %M_ord(ii);
                bergraf_ciCCD(2,i) = ber_ciCCD(ii,i); %BER correspondente à
modulação
            end
        end
    else
        bergraf_ciCCD(1,i) = 1; %M_ord(1);
        bergraf_ciCCD(2,i) = ber_ciCCD(1,i);
    end
end
end
end

```

**#Visualização - Freespace**

```

figure
yyaxis left
semilogy((1:1000).*(dist_AB/1000),bergraf_frSCD(2,:), 'k-
',(1:1000).*(dist_AB/1000),bergraf_frCCD(2,:), 'c-')
ylabel('BER')
grid on
xlim([0 dist_AB])
hold on
yyaxis right
plot((1:1000).*(dist_AB/1000),bergraf_frSCD(1,:), 'ro-
',(1:1000).*(dist_AB/1000),bergraf_frCCD(1,:), 'b*-')
set(gca, 'YTick',[1,2,3,4,5], 'YTickLabel',{'QPSK' '16-QAM' '64-QAM' '256-QAM'
''})
title("Freespace - Análise do percurso")
legend("BER SCD ", "BER CCD", "Modulação SCD", "Modulação CCD")
xlabel('Percurso (m)')
ylabel('Modulação')
grid on
hold off

```

**#Visualização - Close-in**

```

figure
yyaxis left
semilogy((1:1000).*(dist_AB/1000),bergraf_ciSCD(2,:), 'k-
',(1:1000).*(dist_AB/1000),bergraf_ciCCD(2,:), 'c-')
ylabel('BER')
grid on
xlim([0 dist_AB])
hold on
yyaxis right
plot((1:1000).*(dist_AB/1000),bergraf_ciSCD(1,:), 'ro-
',(1:1000).*(dist_AB/1000),bergraf_ciCCD(1,:), 'b*-')
set(gca, 'YTick',[1,2,3,4,5], 'YTickLabel',{'QPSK' '16-QAM' '64-QAM' '256-QAM'
''})
title("Close-in - Análise do percurso")
legend("BER SCD ", "BER CCD", "Modulação SCD", "Modulação CCD")
xlabel('Percurso (m)')
ylabel('Modulação')
grid on
hold off

```

**2.4 - Análise da Constelação****Levantar dados para análise posterior****#FR-SCD**

```
%Modulação e BER máxima
```

```

var = find(bergraf_frSCD(1,:) == max(bergraf_frSCD(1,:)));
modfrSCD_Max = [max(bergraf_frSCD(1,:)),min(bergraf_frSCD(2,var))];
p(1) = find(bergraf_frSCD(2,:)==min(bergraf_frSCD(2,var)))

```

```
%Modulação e BER mínima
```

```
var = find(bergraf_frSCD(1,:) == min(bergraf_frSCD(1,:)));
modfrSCD_Min = [min(bergraf_frSCD(1,:)),max(bergraf_frSCD(2,var))];
p(2) = find(bergraf_frSCD(2,:) == max(bergraf_frSCD(2,var)))
```

#### #FR-CCD

**%Modulação e BER máxima**

```
var = find(bergraf_frCCD(1,:) == max(bergraf_frCCD(1,:)));
modfrCCD_Max = [max(bergraf_frCCD(1,:)),min(bergraf_frCCD(2,var))];
p(3) = find(bergraf_frCCD(2,:) == min(bergraf_frCCD(2,var)));
```

**%Modulação e BER mínima**

```
var = find(bergraf_frCCD(1,:) == min(bergraf_frCCD(1,:)));
modfrCCD_Min = [min(bergraf_frCCD(1,:)),max(bergraf_frCCD(2,var))];
p(4) = find(bergraf_frCCD(2,:) == max(bergraf_frCCD(2,var)))
```

#### #CI-SCD

**%Modulação e BER máxima**

```
var = find(bergraf_ciSCD(1,:) == max(bergraf_ciSCD(1,:)));
modciSCD_Max = [max(bergraf_ciSCD(1,:)),min(bergraf_ciSCD(2,var))];
p(5) = find(bergraf_ciSCD(2,:) == min(bergraf_ciSCD(2,var)));
```

**%Modulação e BER mínima**

```
var = find(bergraf_ciSCD(1,:) == min(bergraf_ciSCD(1,:)));
modciSCD_Min = [min(bergraf_ciSCD(1,:)),max(bergraf_ciSCD(2,var))];
p(6) = find(bergraf_ciSCD(2,:) == max(bergraf_ciSCD(2,var)));
```

#### #CI-CCD

**%Modulação e BER máxima**

```
var = find(bergraf_ciCCD(1,:) == max(bergraf_ciCCD(1,:)));
modciCCD_Max = [max(bergraf_ciCCD(1,:)),min(bergraf_ciCCD(2,var))];
p(7) = find(bergraf_ciCCD(2,:) == min(bergraf_ciCCD(2,var)))
```

**%Modulação e BER mínima**

```
var = find(bergraf_ciCCD(1,:) == min(bergraf_ciCCD(1,:)));
modciCCD_Min = [min(bergraf_ciCCD(1,:)),max(bergraf_ciCCD(2,var))];
p(8) = find(bergraf_ciCCD(2,:) == max(bergraf_ciCCD(2,var)));
```

### 2.4.1 - Constelação

#### **%FR-SCD Min**

**%Mínimo (QPSK)**

```
M=4;
data = randi([0 M-1],5000,1);
txSig = pskmod(data,M,pi/M);
rxSig = awgn(txSig,(perfr_SINRdB0(p(2))));
scatterplot(rxSig)
```

#### **%FR-SCD Max**

**%Mínimo (QPSK)**

```
M=4;
data = randi([0 M-1],5000,1);
txSig = pskmod(data,M,pi/M);
rxSig = awgn(txSig,(perfr_SINRdB0(p(1))));
```

```
scatterplot(rxSig)
```

### **%FR-CCD Min**

```
%Mínimo (QPSK)
```

```
M=4;
data = randi([0 M-1],5000,1);
txSig = pskmod(data,M,pi/M);
rxSig = awgn(txSig,(perfr_SINRdB1(p(4))));
scatterplot(rxSig)
```

### **%FR-CCD Max**

```
figure
M = 256;
k = log2(M);
Win = 17.5;
xu = randi([0 M-1],5000,1); %% Criação de um sinal aleatório % Definição do
sinal modulado
yu = qammod(xu,M); % Definição do sinal modulado recebido contaminado por
ruído
ynoisyu = awgn(yu,max(perfr_SINRdB1(p(3))), 'measured'); % Definição dos
parâmetros para a análise da constelação do sinal modulado
cptsu = qammod(0:M-1,M);
constDiag01 =
comm.ConstellationDiagram('ReferenceConstellation',cptsu,'XLimits',[-Win
Win],'YLimits',[-Win Win]); % Análise da constelação
scatterplot(ynoisyu)
```

### **%CI-SCD Min**

```
%Mínimo (QPSK)
```

```
M=4;
data = randi([0 M-1],5000,1);
txSig = pskmod(data,M,pi/M);
rxSig = awgn(txSig,(perci_SINRdB0(p(6))));
```

### **#Visualização**

```
Win = 7;
constDiag01 =
comm.ConstellationDiagram('ReferenceConstellation',cptsu,'XLimits',[-Win
Win],'YLimits',[-Win Win]); % Análise da constelação
constDiag01(rxSig)
```

### **#CI-SCD Max**

```
figure
M = 16;
k = log2(M);
Win = 4;
xu = randi([0 M-1],5000,1); %% Criação de um sinal aleatório % Definição do
sinal modulado
yu = qammod(xu,M); % Definição do sinal modulado recebido contaminado por
ruído
ynoisyu = awgn(yu,max(perci_SINRdB0(p(5))), 'measured'); % Definição dos
parâmetros para a análise da constelação do sinal modulado
cptsu = qammod(0:M-1,M);
```

```

constDiag01 =
comm.ConstellationDiagram('ReferenceConstellation',cptsu,'XLimits',[-Win
Win],'YLimits',[-Win Win]); % Análise da constelação
constDiag01(ynoisyu)

```

### %CI-CCD Min

%Mínimo (QPSK)

```

M=4;
data = randi([0 M-1],5000,1);
txSig = pskmod(data,M,pi/M);
rxSig = awgn(txSig,(perci_SINRdB1(p(8))));
Win = 7;
constDiag01 =
comm.ConstellationDiagram('ReferenceConstellation',cptsu,'XLimits',[-Win
Win],'YLimits',[-Win Win]); % Análise da constelação
constDiag01(rxSig)

```

### %CI-CCD Max

figure

```

M = 256;
k = log2(M);
Win = 17.5;
xu = randi([0 M-1],1000,1); %% Criação de um sinal aleatório % Definição do
sinal modulado
yu = qammod(xu,M); % Definição do sinal modulado recebido contaminado por
ruído
ynoisyu = awgn(yu,max(perci_SINRdB1(p(7))), 'measured'); % Definição dos
parâmetros para a análise da constelação do sinal modulado
cptsu = qammod(0:M-1,M);
constDiag01 =
comm.ConstellationDiagram('ReferenceConstellation',cptsu,'XLimits',[-Win
Win],'YLimits',[-Win Win]); % Análise da constelação
constDiag01(ynoisyu)

```

## 2.5 - Análise taxa de dados de pico

### Parametrizações

```

j_carrier = 1;
Vlayer = 1; %Número de camadas MIMO
Qm = 8; %Corresponde à k bits das ordens de modulação |2,4,6,8
f = 0.75; %Fator de escala |FDD:1 e TDD:0.76
R_max = 948/1024; %Fator de codificação máximo (LDPC)
Nprb = 106; %Para
Ts = (10e-3)/(14*1); %u=0, Numerologia (Duração do símbolo OFDM)
OH = 0.14; %Corresponde a FR2 DL
k_bits = [2,4,6,8];

```

Cálculo

```

% clear D;
% for j=1:j_carrier
D = Vlayer*Qm*f*R_max*((Nprb*12)/Ts)*(1-OH);
% end
DL = (10e-6)*sum(D)

```

```

n = (DL*1e6)/20e6

clear D;
for i=1:length(bergraf_frSCD)
    for j=1:j_carrier
        D(j,i) = Vlayer*k_bits(bergraf_frSCD(1,i))*f*R_max*((Nprb*12)/Ts)*(1-
OH);
    end
    DL_frSCD(i) = (10e-6)*sum(D(:,i));
end

clear D;
for i=1:length(bergraf_frCCD)
    for j=1:j_carrier
        D(j,i) = Vlayer*k_bits(bergraf_frCCD(1,i))*f*R_max*((Nprb*12)/Ts)*(1-
OH);
    end
    DL_frCCD(i) = (10e-6)*sum(D(:,i));
end

clear D;
for i=1:length(bergraf_ciSCD)
    for j=1:j_carrier
        D(j,i) = Vlayer*k_bits(bergraf_ciSCD(1,i))*f*R_max*((Nprb*12)/Ts)*(1-
OH);
    end
    DL_ciSCD(i) = (10e-6)*sum(D(:,i));
end

clear D;
for i=1:length(bergraf_ciCCD)
    for j=1:j_carrier
        D(j,i) = Vlayer*k_bits(bergraf_ciCCD(1,i))*f*R_max*((Nprb*12)/Ts)*(1-
OH);
    end
    DL_ciCCD(i) = (10e-6)*sum(D(:,i));
end

%Downlink FR
figure
plot((1:1000).*(dist_AB/1000),DL_frSCD,'r*-')
hold on
plot((1:1000).*(dist_AB/1000),DL_frCCD,'b*-')
title("Taxa de dados de Downlink")
ylabel("Taxa de dados (Mbps)")
xlabel("Percurso (m)")
xlim([0 dist_AB])
legend("FR-SCD","FR-CCD")
grid on
hold off

%Downlink CI
figure
plot((1:1000).*(dist_AB/1000),DL_ciSCD,'r*-')

```

```

hold on
plot((1:1000).*(dist_AB/1000),DL_ciCCD,'b*-')
title("Taxa de dados de Downlink")
ylabel("Taxa de dados (Mbps)")
xlabel("Percurso (m)")
xlim([0 dist_AB])
legend("CI-SCD", "CI-CCD")
grid on
hold off

```

## 2.5.2 - Análise FR-CCD e CI-CCD

```

j_carrier = 4;
Vlayer = 4; %Número de camadas MIMO
Qm = 8; %Corresponde à k bits das ordens de modulação |2,4,6,8
f = 0.75; %Fator de escala |FDD:1 e TDD:0.76
R_max = 948/1024; %Fator de codificação máximo (LDPC)
Nprb = 106; %Para
Ts = (10e-3)/(14*1); %u=0, Numerologia (Duração do símbolo OFDM)
OH = 0.14; %Corresponde a FR2 DL
k_bits = [2,4,6,8];

clear D;
for i=1:length(bergraf_frCCD)
    for j=1:j_carrier
        D(j,i) = Vlayer*k_bits(bergraf_frCCD(1,i))*f*R_max*((Nprb*12)/Ts)*(1-
OH);
    end
    DLf_frCCD(i) = (10e-6)*sum(D(:,i));
end

clear D;
for i=1:length(bergraf_ciCCD)
    for j=1:j_carrier
        D(j,i) = Vlayer*k_bits(bergraf_ciCCD(1,i))*f*R_max*((Nprb*12)/Ts)*(1-
OH);
    end
    DLf_ciCCD(i) = (10e-6)*sum(D(:,i));
end

min(DLf_frCCD)
min(DLf_ciCCD)
max(DLf_frCCD)
max(DLf_ciCCD)
mean(DLf_frCCD)
mean(DLf_ciCCD)

figure
plot((1:1000).*(dist_AB/1000),DLf_frCCD,'r*-')
hold on
plot((1:1000).*(dist_AB/1000),DLf_ciCCD,'b*-')
title("Taxa de dados de pico DL")
ylabel("Taxa de dados (Mbps)")
xlabel("Percurso (m)")

```



```
xlim([0 dist_AB])  
legend("FR-CCD", "CI-CCD")  
grid on  
hold off
```