

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Luan Teodoro Mundim

**Análise de Parâmetros Downlink de uma rede
5G Non-Standalone**

Uberlândia, Brasil

2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Luan Teodoro Mundim

**Análise de Parâmetros Downlink de uma rede 5G
Non-Standalone**

Monografia apresentada em dezembro de 2020 ao curso de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações, como requisito para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações, Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia

Orientador: Éderson Rosa da Silva

Universidade Federal de Uberlândia – UFU

Faculdade de Engenharia Elétrica

Bacharelado em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações

Uberlândia, Brasil

2020

Resumo

Seguindo o padrão das últimas gerações de redes móveis, o 5G está sendo construído de forma robusta para suportar usuários, sejam pessoas ou dispositivos IoT (*Internet of Things*), na casa das centenas de milhões. Entretanto, alguns desafios ainda devem ser superados. Neste contexto este trabalho apresenta algumas análises em uma rede 5G *Non-Standalone* e se esses valores condizem com o que estabelece a *Release 15*.

Palavras-chave: 5G, Non-standalone, 5G NR.

Abstract

Following the pattern of the latest generations of mobile networks, 5G is being robustly built to support users, whether people or IoT devices, in the hundreds of millions. However, some challenges still need to be overcome. In this context, this work presents some analyzes in a 5G Non-Standalone network and if these values are consistent with what Release 15 establishes.

Palavras-chave: 5G, Non-standalone, 5G NR.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Representação do esquema de reutilização de frequências, onde os hexágonos com as mesmas letras representam células com o mesmo conjunto de frequências e o conjunto das 7 células diferentes representam um <i>cluster</i> , aqui no caso o <i>cluster</i> é de tamanho 7 e o fator de reutilização de frequências então é $1/7$	15
Figura 2 – Exemplo de <i>cluster</i> com $N=19$ e $i=3$ e $j=2$:	17
Figura 3 – Estrutura de frame 5G:	24
Figura 4 – Espectro das ondas milimétricas	26
Figura 5 – Características de propagação de ondas milimétricas: a) perda de penetração em folhagem b)Atenuação pela chuva.	27
Figura 6 – Core 5G	30
Figura 7 – Interfaces da rede de acesso	31
Figura 8 – Beam-forming clássico com correlação de antena mútua alta a)configuração da antena; b)estrutura do feixe	33
Figura 9 – Beam-forming para o caso de correlação de antena mútua baixa	34
Figura 10 – Modulações do tipo a)QPSK, b)8PSK c)16QAM	35
Figura 11 – Distância entre os prédios em que foi realizado o teste	41
Figura 12 – Topologia da rede	42
Figura 13 – Huawei Mate20 x 5G	43
Figura 14 – Gráfico de MCS por largura de banda	44
Figura 15 – Gráfico de Latência	45
Figura 16 – Gráfico de Vazão por largura de banda	45
Figura 17 – Gráfico de BLER por Modulação	46
Figura 18 – Gráfico de vazão por Modulação	47

Lista de tabelas

Tabela 1 – Atenuação de alguns materiais	26
--	----

Lista de abreviaturas e siglas

1G	Primeira geração de redes móveis
2G	Segunda geração de redes móveis
3G	Terceira geração de redes móveis
3GPP	3rd Generation Partnership Project
3GPP2	3rd Generation Partnership Project 2
4G	Quarta geração de redes móveis
5G:NSA	5G Non-Standalone
5G:SA	5G Standalone
5G	Quinta geração de redes móveis
5GC	5G Core
5G NR	5G New Radio
AMF	Mobility Management Function
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
APT	Asia Pacific Telecommunity
AS	Access Stratum
BLER	Block Error Rate
CDMA/FDD	Code division multiple access/frequency division duplexing
CDMA2000	Code-Division Multiple Access 2000
CEPT/ECC	European Conference of Postal and Telecommunications Administration
CITEL	Inter-American Telecommunication Commission
CN	Core Network
CRC	Cyclic redundancy check
CRSs	Cell specific reference signals

CUPS	Control and User Plane Separation
EDGE	Enhanced Data rates for Global Evolution
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
EPC	Evolved Packet Core
EPC	Evolved Packet Core
FM	frequency modulation
FPLMTS	Future Public Land Mobile Systems
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communication
GSMA	GSM Association
HCMTS	High Capacity Mobile Telephone System
HSDPA	High-Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
IMT	International Mobile Telecommunications
IMT-2000	International Mobile Telecommunications-2000
IoT	Internet of Things
IPv6	IP version 6
ITU	International Telecommunication Union
ITU-R	ITU Radiocommunication Sector
LTE	Long Term Evolution
M2M	Machine-to-machine
Mbps	Mega bits per second
MCS	Modulation and Code Scheme
mMTC	Massive Machine-Type Communications
NAS	Non-Access Stratum
NLOS	Non-line-of-sight

OFDM	orthogonal frequency-division multiplexing
PoC	Proof of Concept
PRB	Physical Resource Blocks
QAM	Quadrature amplitude modulation
QPSK	Quadrature phase shift keying
RAN	Radio Access Network
RF	Radio frequency
RRM	Radio Resource Management
SMF	Session Management Function
SMS	Short Message Service
TDD	Time division DUplex
TDMA/FDD	Time division multiple access/frequency division duplexing
TD-SCDMA	Time Division Synchronous Code Division Multiple Access
UE	User Equipment
UPF	User Plane Function
URLLC	Ultra-reliable low-latency communication
WCDMA	Wide-Band Code-Division Multiple Access
WP5D	Working Party 5D

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
2	CONCEITOS BÁSICOS DE REDES MÓVEIS	12
2.1	Evolução das redes móveis	12
2.2	Reutilização de frequências	15
2.3	Interferência e capacidade do sistema	16
2.4	Interferência de co-canal e capacidade do sistema	16
2.5	Interferência de canal adjacente	18
2.6	Eficiência Espectral	19
2.7	Regulamentação	19
2.8	Atividades do ITU-R desde o 3G ao 5G	20
2.9	IMT-2000 E IMT- ADVANCED	20
2.10	IMT-2020	20
2.11	Bandas de Frequências	21
3	FUNDAMENTOS DO 5G NR	22
3.1	Frequências mais altas e flexibilidade espectral	22
3.2	Design Ultra-lean	22
3.3	Compatibilidade Avançada	23
3.4	Esquemas de transmissão, partes de largura de banda e estrutura de frame	23
3.5	Esquemas de duplexação	24
3.6	Suporte a baixa latência	25
3.7	Ondas milimétricas e centimétricas	25
3.8	Propagação no espaço livre, penetração e outras perdas	26
3.9	Efeito Doppler e multi-percurso	27
3.10	Características do canal	28
3.11	Perda de caminho em larga escala	28
3.12	Modelo de propagação no espaço livre	28
3.13	Introdução arquitetura rádio-core	29
3.14	Core 5G	29
3.15	Transmissão multi-antena	31
3.16	Beam-Forming	33
3.17	Modulações digitais	34
3.18	Block error ratio	35
3.19	Modulation and Code Scheme	35

3.20	Largura de banda	36
3.21	Throughput	37
4	METODOLOGIA	40
4.1	Introdução	40
4.2	PoC Algar	40
5	RESULTADOS	44
6	CONCLUSÃO	48
	REFERÊNCIAS	49

1 Introdução

As tecnologias envolvendo comunicações móveis têm se tornado essencial e mais importantes para a vida cotidiana das pessoas a cada geração que se passa. Cada vez mais e mais pessoas e dispositivos estão se tornando parte dessa tecnologia, o que tem exigido mais trabalho e esforço para serem alocados sem comprometer capacidade e qualidade da rede.

Esses são os grandes objetivos quando uma nova geração de comunicações móveis surge. Espera-se com o surgimento do 5G uma melhora significativa em diversos aspectos da rede como aumento de vazão e diminuição de latência que são os quesitos mais relevantes principalmente para o público alvo do 5G.

O objetivo desse trabalho é mostrar como esses objetivos teóricos estão se concretizando em projetos no Brasil e no mundo, em especial será discutido um projeto que aconteceu na empresa Algar Telecom juntamente com a Nokia na construção de uma *PoC* (*Proof of Concept*) aspectos que serão analisados.

Essa grande entrada de novos dispositivos sem comprometimento do comportamento da rede é um dos desafios que o 5G enfrenta. Muitos desses desafios são superados com tecnologias que estão naturalmente crescendo junto com as gerações de comunicações móveis, como é o caso de constelações cada vez maiores para modulação. Entretanto, outros desafios exigem soluções inovadoras e o mundo todo está a espera de tais soluções.

2 Conceitos Básicos de redes móveis

2.1 Evolução das redes móveis

As primeiras redes celulares surgiram com a proposta de uma única antena cobrir a maior área possível para atender uma maior quantidade de pessoas, porém essa proposta limita bastante a quantidade de chamadas que podem ocorrer simultaneamente. O sistema *Bell* que funcionava na década de 70 em Nova York, por exemplo, suportava apenas 12 chamadas simultâneas em uma área de cerca de 2600 km quadrados. Assim, surge o conceito de redes celulares que como o próprio nome diz, deriva da ideia de um sistema modular onde peças menores formam um sistema completo, assim como são formados os tecidos a partir de um conjunto de células em seres vivos.([RAPPAPORT et al., 1996](#))

1G

Devido à facilidade de uso, tecnologias *wireless* cresceram muito desde os anos 80 quando a telefonia fixa ainda dominava e surgiam os primeiros aparelhos celulares da primeira geração. Já na década de 70 os sistemas de comunicação analógicos chamados de HCMTS (*High Capacity Mobile Telephone System*) eram desenvolvidos nos laboratórios *Bell*. Usando largura de banda de 30 KHz (*Kiloheartz*) e modulação FM (*Frequency Modulation*), o 1G surgiu ainda no contexto de telefonia analógica funcionando com pequena largura de banda possuindo apenas chamadas de voz. Por ser uma tecnologia nova era cara, por isso ainda era muito restrita ([LEE, 2006](#)).

2G

Já nos anos 90 o 2G abriu as portas para a comunicação baseada em tecnologia digital que permitiu maior uso da largura de banda disponível na época. Com transmissões de dados que chegavam a velocidades de até 64Kbps (*Kilobits por segundo*) foi implementado o GSM (*Global System for Mobile Communication*) que usava modulação digital para aumentar a qualidade da chamada. Possuindo largura de banda de 30-200 KHz a segunda geração avançou um passo e trouxe o SMS (*Short Message Service*) que permite o envio de curtas mensagens de texto.

A segunda geração trouxe formatos de modulação digital e também técnicas de acesso múltiplo TDMA/FDD (*Time-division multiple access/frequency division duplex*) e CDMA/FDD (*Code-division multiple access/frequency division duplex*).O 2G não parou

de evoluir e foi implementando funcionalidades ao longo da década de 90. O acesso a internet já era possível graças ao GPRS (*General Packet Radio Service*) e EDGE (*Enhanced Data rates for Global Evolution*) fase do 2G que ficou conhecida como 2.5G (LEE, 2006).

3G

Ainda nos anos 90 a necessidade por acesso a internet foi crescendo de forma que foi necessário a criação de uma nova geração, e junto com o 3G surgiram o 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) e 3GPP2 (*3rd Generation Partnership Project 2*) que foram responsáveis pela criação das tecnologias 3G WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*), TD-SCDMA (*time division - synchronous code division multiple access*) e 3G CDMA 2000 respectivamente. O WCDMA foi melhorado e se criou o HSDPA (*High-Speed Downlink Packet Access*) para posteriormente se transformar no HSPA, alcançando velocidades de cerca de 2Mbps. O 3G se tornou popular graças a smartphones como Iphone da Apple e também de outras marcas com sistemas operacionais principalmente Android da Google (LEE, 2006).

4G

A necessidade por maiores larguras de bandas dentro da comunicação móvel só cresceu ao longo dos anos 2000, operadoras proporcionaram planos mais flexíveis enquanto aparelhos celulares se tornavam cada vez mais acessíveis. Com largura de banda muito grande e velocidade que poderiam chegar a Gbps o 4G usando tecnologia LTE (*Long Term Evolution*) proporciona para os usuários também telefonia IP, TV em HD, videoconferência para jogos, serviços de nuvem etc. A grande vantagem do 4G em relação às outras gerações foi a unificação de uma só tecnologia dentro dessa geração que é o LTE, sem a concorrência que existia nas outras gerações o desenvolvimento de softwares e produtos foi mais rápido, além da redução de custos tanto para consumidores como fabricantes (LEE, 2006).

5G

Ainda em processo de construção e estudo o 5G vem com a proposta de trazer uma largura de banda ainda maior e mais robusta para suportar as necessidades da sociedade que estão surgindo como: as redes elétricas inteligentes, ciber-medicina, transporte autônomo, realidade aumentada etc. Com recomendação do ITU (*International Telecommunication Union*) para lançamento da tecnologia por volta do ano de 2020 a quinta geração possui alguns desafios para serem superados como aumento da largura de banda, aumento muito grande das comunicações M2M (*Machine-to-Machine*) e possuir comunicações de baixa latência e de alta confiabilidade.

A quinta geração de redes móveis está trazendo a ideia já concebida de cidades cada vez mais conectadas uma das vertentes do 5G está bem associada a isso, devido ao uso de frequências na faixa de ondas milimétricas a quantidade de estações será muito maior do que ocorre atualmente. Com a proposta de conectar não só pessoas, mas também máquinas o número de conexões será muito alto, e para isso ocorrer, é necessário confiança e segurança bastante elevadas. Os três grandes serviços genéricos que derivam do 5G são:

Enhanced Mobile Broadband (eMBB): O aumento não só das velocidades das conexões em si, mas também o número de equipamentos ligados na rede tem crescido. De algum tempo pra cá deixaram de ser só computadores e celulares e, está em crescimento o número de *wearables* que são os dispositivos vestíveis. Tem ocorrido também o aumento do número de dispositivos inteligentes como geladeiras, TVs etc. Isso irá gerar um aumento gigantesco no tráfego de dados atual e para suportar todo esse futuro tráfego é preciso um aumento da largura de banda, não só na parte de transporte, mas na parte de acesso da rede móvel (DAHLMAN; PARKVALL; SKOLD, 2018).

Massive Machine-type Communications (mMTC): Trata da parte de conexões *machine-to-machine* e IoT (*Internet of Things*). Junto com o IPv6 que atualmente não é tão explorado o *Massive Machine-type Communications* poderá integrar bilhões de equipamentos para fazerem monitoramento ou análise de dados sem que dependa de interferência humana. Esses dispositivos podem ser casas inteligentes como já foi citado, monitoramento de saúde, monitoramento de fábricas e até monitoramento de fazendas, seja plantações ou cultivo de animais (DAHLMAN; PARKVALL; SKOLD, 2018).

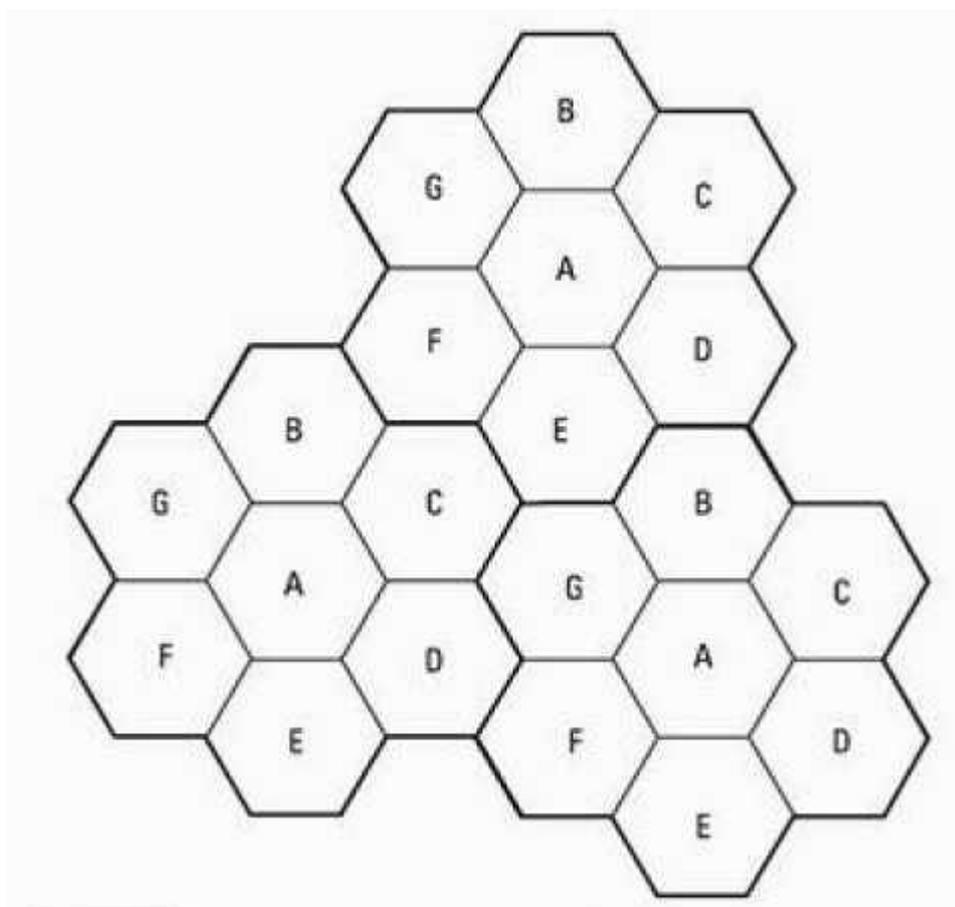
A proposta de mMTC juntamente da IoT tem como expectativa revolucionar o mundo através de uma imensa quantidade de objetos conectados entre si e na rede. Para se chegar em um resultado eficiente nessa linha de tendência, é preciso equipamentos de custo e consumo de energias baixos. O foco de aplicações IoT é casas inteligentes, como abertura de portão via internet, eletrodomésticos conectados na rede etc. Para para aplicações críticas como monitoramento de saúde, controle de tráfego de veículos etc, além do que já foi citado é necessário alta disponibilidade, alta confiança, alta segurança e baixas latência, que vai de encontro a segunda vertente do 5G o URLLC (DAHLMAN; PARKVALL; SKOLD, 2018).

Ultra-reliable and Low-latency Communications. (URLLC) Para aplicações IoT alguns requisitos são obrigatórios como: a alta confiança no sistema, ou seja, dificilmente ele irá falhar e a implantação deve ser feita para que seja proporcionada baixa latência, para que o tempo de resposta dos dispositivos seja a mais baixa possível. Alguns exemplos são carros conectados, que irão prever acidentes em tempo real, sistemas de monitoramento de saúde, que precisarão tomar decisões em pouquíssimo tempo e controle de fábricas e produções manufaturadas (DAHLMAN; PARKVALL; SKOLD, 2018).

2.2 Reutilização de frequências

Um sistema celular é composto por pequenos setores que formam um maior e quando isso ocorre, é possível usar a técnica de reutilização de frequências. A estação base é responsável por um determinado grupo de frequências que será utilizado dentro daquela célula específica. Nas células adjacentes o conjunto de frequências é diferente. A figura 1 mostra como é feito esse controle de frequências dentro do sistema, as letras que são iguais representam células que possuem mesmo conjunto de frequências.

Figura 1 – Representação do esquema de reutilização de frequências, onde os hexágonos com as mesmas letras representam células com o mesmo conjunto de frequências e o conjunto das 7 células diferentes representam um *cluster*, aqui no caso o *cluster* é de tamanho 7 e o fator de reutilização de frequências então é $1/7$.



Fonte: Retirado de *Wireless communications: principles and practice*, (RAPPAPORT et al., 1996)

A representação de uma célula é dada em forma de hexágono pois irá facilitar nos cálculos e as análises, porém em sistemas reais não é esse formato que ocorre, tendendo possuir um formato amorfo. Esse formato é chamado de pegada e é natural se pensar em um formato de célula para representação que seja circular, entretanto o formato circular quando usado para construir um *cluster* irá deixar espaços sem cobertura ou espaços

sobrepostos o que não é desejado em um sistema celular.

Supõe-se que em um sistema celular existam S canais *full duplex*, cada célula recebe um conjunto de k canais sendo ($k < S$). Esses S canais serão divididos em grupos, os grupos serão divididos entre as N células. Os grupos são diferentes e possuem o mesmo número de canais, assim o número de canais totais de rádio que o sistema possui pode ser dado como:

$$S = kN \quad (2.1)$$

As N células são os *clusters*, se existir M *clusters* a capacidade total do sistema é dada por:

$$C = MkN = MS \quad (2.2)$$

O fator N é chamado de tamanho de *cluster* e a capacidade do sistema é proporcional a N .

Como o formato das células é hexagonal o fator N é dado seguindo a seguinte fórmula:

$$N = i^2 + ij + j^2 \quad (2.3)$$

Onde i e j são inteiros positivos.

A figura 2 mostra um exemplo onde $i=3$ e $j=2$:

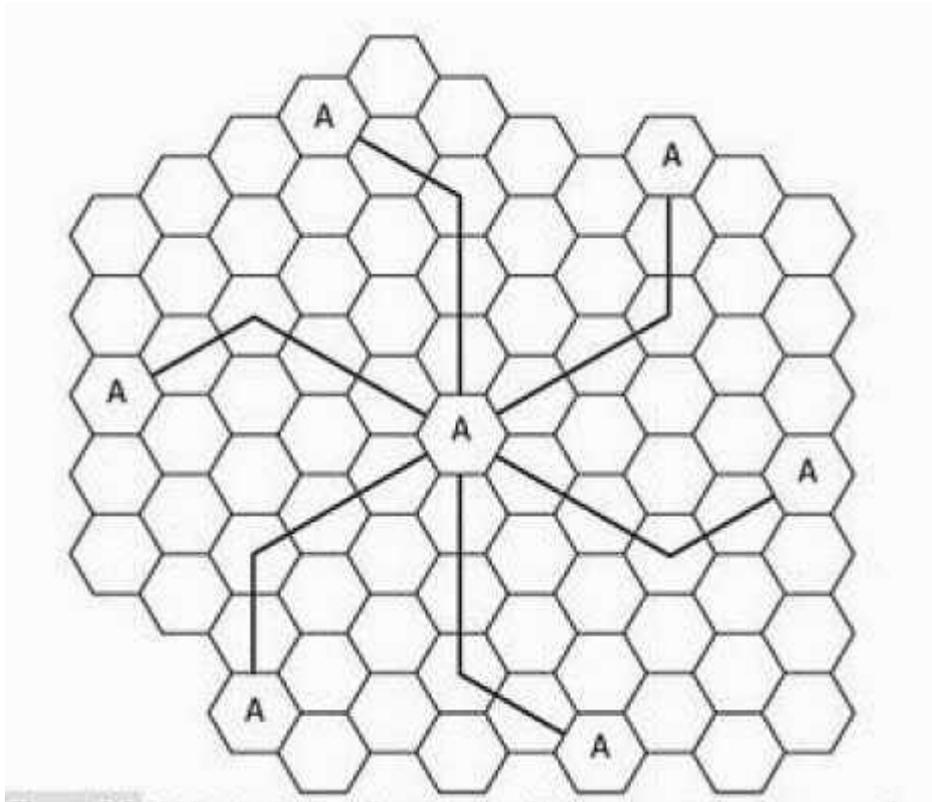
Para encontrar a célula com mesmo conjunto de frequências mais próxima basta deslocar i células na direção de qualquer cadeia de hexágonos, girar 60° no sentido anti-horário e andar mais j hexágonos, como mostrado na figura 2

2.3 Interferência e capacidade do sistema

A interferência é um grande limitador da capacidade dos sistemas celulares, ela pode ser causada por sistemas terceiros quando existe sinal de RF (*Radio Frequency*) na mesma frequência ou pode ser interferências do próprio sistema que são conhecidas como interferência de co-canal e interferência de canal adjacente.

2.4 Interferência de co-canal e capacidade do sistema

A interferência de co-canal é a interferência causada pelas células do sistema que possuem mesmo conjunto de frequências. A dificuldade de se combater a interferência

Figura 2 – Exemplo de *cluster* com $N=19$ e $i=3$ e $j=2$:

Fonte: Retirado de *Wireless communications: principles and practice*, (RAPPAPORT et al., 1996)

de co-canal é que não se pode aumentar a potência do sinal para aumentar a relação sinal/ruído visto que isso irá gerar interferência de co-canal nas células vizinhas. A forma de combater essa interferência é separando as células fisicamente.

Quando as células possuem o mesmo tamanho e a potência da ERB (*Estação Rádio Base*) é a mesma, a interferência de co-canal passa a depender da distância de separação das células (D) que é a distância entre os centros das células de co-canal vizinhas e do raio da célula (R). Assim, quanto maior a distância de separação das células maior será o isolamento, dividindo-se o D por R em modelos de células hexagonais, chega-se a uma constante, essa relação é chamada de *Razão de reutilização do co-canal*, que é o Q .

$$Q = \frac{D}{R} = \sqrt{3N} \quad (2.4)$$

Quanto maior o valor de Q maior será o isolamento da célula em relação a interferência de co-canal, porém menor será a capacidade do sistema.

Se I_0 for o número de células que causam interferência de co-canal então a relação sinal-ruído em uma célula é dado como:

$$\frac{S}{I} = \frac{S}{\sum_{i=1}^{i_0} I_i} \quad (2.5)$$

Onde S é a potência da ERB, I_i a potência de interferência que é causada pela estação base da i -ésima célula de interferência de co-canal. A equação 2.5 pode ser usada quando os valores de sinal das células de co-canal forem conhecidos.

A potência média de um sinal recebido é inversamente proporcional a distância e pode ser dado aproximadamente pela equação 2.6:

$$P_r = P_0 \left(\frac{d}{d_0} \right)^{-n} \quad (2.6)$$

Onde P_r é a potência média recebida, d a distância da antena transmissora, P_0 a potência recebida em um ponto de referência qualquer próximo a região da antena, d_0 a potência em uma distância próxima a antena transmissora e n o expoente de perda de caminho.

Seja um enlace direto em que o sinal é o da ERB e a interferência é causada pelas ERB's de co-canal. D_i é a distância da i -ésima ERB que causa interferência de co-canal, assim a potência recebida na estação estudada é proporcional a $(D_i)^{-n}$.

Assumindo que a potência de transmissão das ERB's são iguais e o n se mantém constante em toda a área de cobertura, a relação S/I pode ser aproximada como:

$$\frac{S}{I} = \frac{S}{\sum_{i=1}^{D_i} I_i} \quad (2.7)$$

A equação 2.7 pode ser simplificada em:

$$\frac{S}{I} = \frac{(D/R)^n}{i_0} = \frac{(\sqrt{3N})^n}{i_0} \quad (2.8)$$

Considerando somente a primeira camada de células interferentes e que todas estão separadas a uma distância D entre os centros.

2.5 Interferência de canal adjacente

Quando existe interferência causada pelo próprio sistema por frequências adjacentes, a interferência é chamada de *interferência do canal adjacente*, teoricamente esse tipo de interferência não deveria existir, porém ele ocorre devido a imperfeições dos filtros que deixam potência indesejada vazar. Para minimizar esses efeitos é necessário filtros e atribuições de canais adequadas. A célula deve receber somente os canais necessários sendo canais não adjacentes para manter a maior distância entre os canais possível.

2.6 Eficiência Espectral

Eficiência espectral é a taxa de bits/s que podem ser transmitidos em uma determinada largura de banda. Em sistemas celulares a eficiência espectral por célula é o somatório de bits/s de cada usuário dividido pela largura de banda do sistema.

$$\xi = \frac{\sum_{i=1}^{N_u} R_{b,i}}{B} \quad (2.9)$$

Onde N_u é o número de usuários na célula, $R_{b,i}$ a taxa de bits do i -ésimo usuário.

2.7 Regulamentação

Existem diversas organizações que são responsáveis por criar especificações, padrões e regulamentações para um bom funcionamento para qualquer sistema. Em comunicações móveis não é diferente e podem ser divididas em três grupos: organizações de desenvolvimentos de padrões, corpos regulativos e administrativos e fóruns industriais.

Organizações de desenvolvimentos de padrões padronizam os sistemas de comunicações móveis a fim de garantir a existência de uma padronização para que a indústria possa lançar equipamentos interoperáveis. A maior parte dos equipamentos dentro da esfera de comunicações móveis possui padronização incluindo estações rádio base e dispositivos móveis. Existe também liberdade para fabricantes criarem suas próprias soluções, entretanto os protocolos de comunicações devem ser baseados em padrões detalhados.

Existem Organizações de desenvolvimentos de padrões que são regionais, mas devido a globalização essas organizações tendem a possuir mais de uma nacionalidade, como é o caso do 3GPP que possui organizações em 7 países.

Corpos regulativos e administrativos são organizações governamentais que estabelecem requerimentos legais para a venda e implantação de sistemas móveis e outros equipamentos de telecomunicações. O controle do uso e licenciamento de frequências de rádios é uma das tarefas mais importantes desse órgão. Outra tarefa é a colocação no mercado de equipamentos através da certificação regulatória garantindo que toda a estrutura de telecom usada esteja devidamente certificada.

A regulação de espectro é feita a nível nacional e a nível regional, sendo na Europa a CEPT/ECC (*European Conference of Postal and Telecommunications Administration*) nas Américas existe o CITELE (*Inter-American Telecommunication Commission*) e na Ásia o APT (*Asia-Pacific Telecommunity*) e em um nível global a ITU.

Essas entidades regulamentam os serviços que funcionam dentro do espectro, além de limitar transmissões que são indesejadas de certos transmissores e estabelecem requisitos padrões para equipamentos de forma indireta.

Fóruns Industriais são fóruns criados geralmente por operadoras para discutir especificações de certas tecnologias ou outros assuntos de interesse. Geralmente esses fóruns são liderados por operadoras, entretanto outras entidades podem participar desse tipo de fórum como o GSMA (*GSM Association*) que promove a discussão sobre tecnologias como o GSM, WCDMA e LTE.

2.8 Atividades do ITU-R desde o 3G ao 5G

O ITU-R é o segmento do ITU responsável pela parte de rádio garantindo que o uso do espectro de frequências seja feito de forma economicamente viável e eficiente.

O papel do ITU-R (*ITU Radiocommunication Sector*) é transformar as tecnologias que estão sendo discutidas por esses órgãos já citados e garantir que se tornem padrões mundiais. O ITU-R define o espectro para diferentes serviços de comunicação que também inclui os serviços móveis e parte do espectro é identificado pelo sistema IMT (*International Mobile Telecommunications*). Junto ao ITU-R, o WP5D (*Working Party 5D*) responsabiliza-se pelos sistemas de rádio do sistema IMT. O WP5D tem o papel de junto às organizações e corpos de padronização manter um conjunto de recomendações e *reports* para o IMT e não criar especificações técnicas.

2.9 IMT-2000 E IMT- ADVANCED

Em 1980 o ITU-R já começava a desenvolver soluções para o 3G que antes era chamado de FPLMTS (*Future Public Land Mobile Systems*) passou a ser chamar IMT-2000. Após isso o papel do ITU-R foi trabalhar o (IMT-Advanced) que eram os sistemas que iam além do IMT-2000 que coincide com o 4G.

Uma tecnologia candidata que surgiu para o *IMT-Advanced* foi a evolução do LTE que foi desenvolvida pelo 3GPP chamada de *LTE-Advanced*. Como o ITU-R trabalha com a harmonização de candidatos através de um consenso, as duas tecnologias candidatas que foram aprovadas para entrar no primeiro lançamento do *IMT-Advanced* foram o LTE e o *WirelessMAN-Advanced*.

2.10 IMT-2020

O IMT-2020 surge entre os períodos de 2012 e 2015 criado pelo ITU-R WP5D para definir os próximos passos para o lançamento dos componentes do IMT para além de 2020 que seria o chamado 5G. A recomendação provê os primeiros passos para o desenvolvimento do IMT e como ele pode servir a sociedade olhando também para o mercado, o usuário, tendências de mercado e implicações espectrais. Esse conjunto de tendências cria

certos cenários, estes cenários são *Enhanced Mobile Broadband* (eMBB), *Ultra-Reliable and Low Latency Communications* (URLLC), e *Massive Machine-Type Communications* (MTC).

No Brasil a regulamentação da rede móvel é feita pela ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações) através de resoluções publicadas em seu site.

2.11 Bandas de Frequências

Atualmente as bandas de frequências disponíveis para rede móvel que são licenciadas pela Anatel são as faixas de frequência de 2,3 GHz e 3,5 GHz. ([FREQUENCIAS...](#), 2019).

3 Fundamentos do 5G NR

O impacto da quinta geração na economia e também a forma como as telecomunicações se envolve com a sociedade vai ser muito maior que nas gerações anteriores, podendo criar uma sociedade altamente conectada, não só pessoas, mas máquinas interligadas junto com a internet das coisas.

O 5G possui duas configurações, o 5G SA *5G:SA Standalone* e 5G NSA (*5G Non-Standalone*). A versão SA utiliza somente um acesso de rádio que pode ser o *5G NR New Radio* ou o próprio LTE enquanto utiliza o core 5G, já o NSA combina o NR radio e o LTE radio simultaneamente utilizando ou o EPC (*EPC Evolved Packet*) ou o 5G Core. Nessa monografia o foco será o 5G.

Quando comparado ao LTE o 5G traz algumas modificações como:

- Uso de frequências mais altas o que resulta em um maior espectro para uso;
- Design *ultra-lean* o que melhora a performance energética e reduz a interferência;
- Compatibilidade avançada para preparar para o futuro;
- Rede de baixa latência para melhorar performance.

3.1 Frequências mais altas e flexibilidade espectral

Uma grande novidade do 5G que o diferencia das gerações anteriores é a possibilidade de uso de frequências extremamente altas na faixa de ondas milimétricas. Isso permite um uso de larguras de bandas maiores, mas junto surgem diversos desafios, como distância menor de propagação da antena o que conseqüentemente gera um aumento do número de estações para uma mesma cobertura e uso de potências limitadas devido ao aquecimento que se pode gerar nos seres vivos.

3.2 Design Ultra-lean

As gerações anteriores ao 5G possuem um pequeno problema que são transmissões frequentes de sinais de sinalização como *CRSs* (*cell specific reference signals*) que são necessários para garantir a cobertura celular e uma boa conexão com os usuários. Essas transmissões frequentes são comumente chamadas de sinais *Always on*, apesar de não ocuparem grande largura de banda esses sinais possuem dois impactos negativos, além

de impor um limite superior ao desempenho energético da rede causam interferência em outras células.

O princípio do design *ultra-lean* é minimizar as transmissões *always-on*, aumentar a performance energética da rede e alcançar maiores taxa de dados.

3.3 Compatibilidade Avançada

O objetivo dessa característica é garantir uma futura compatibilidade com novas tecnologias e novos serviços que podem surgir no futuro. Isso é algo difícil de se prever, mas baseado nas evoluções das outras gerações o 3GPP concordou em alguns princípios que podem ser adotados:

- Maximizar os recursos de tempo e frequência que podem ser flexibilizados no futuro para alocação;
- Minimizar transmissões *always on*;
- Restringir sinais e canais para funcionalidades da camada física dentro de um recurso de tempo ou frequência que seja alocável.

A ideia do último item é evitar criar recursos fixados para transmissão, para poder dessa forma flexibilizar esse recurso caso surja algo no futuro que deva ser implantado.

3.4 Esquemas de transmissão, partes de largura de banda e estrutura de frame

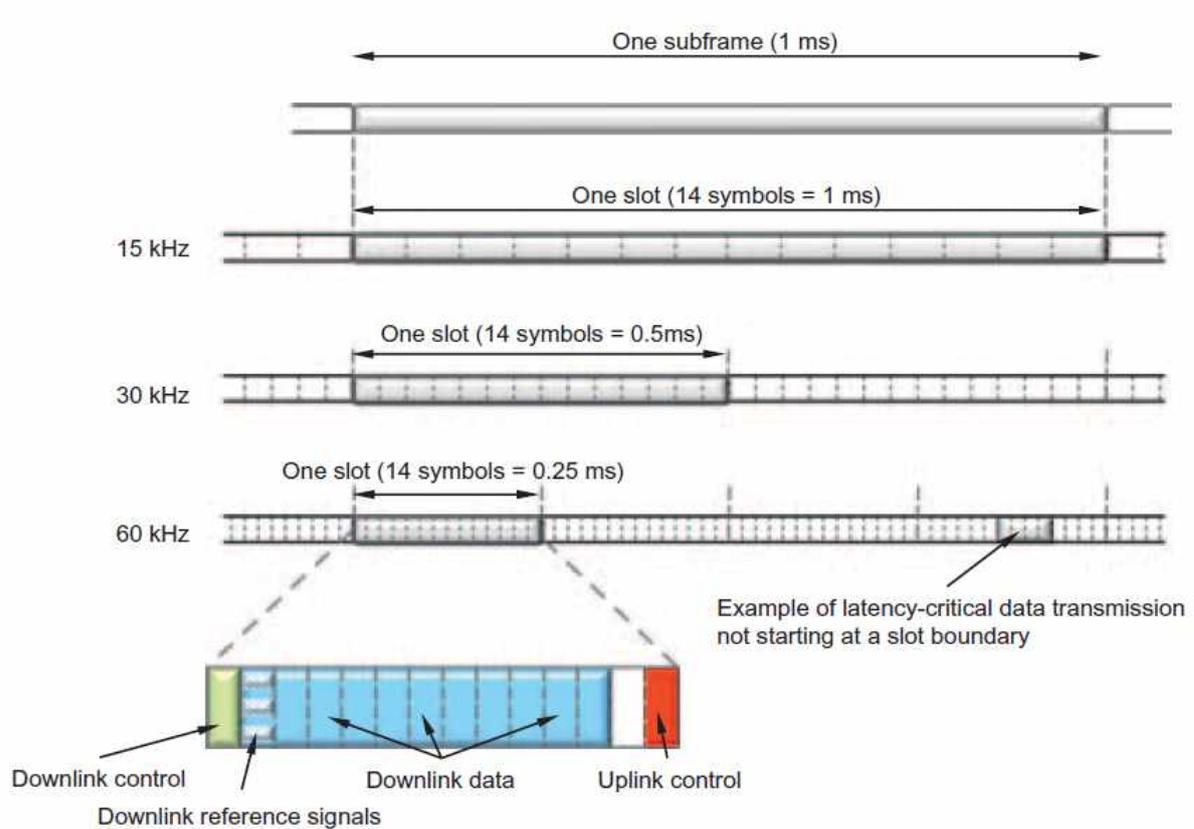
O 5G segue a mesma linha do 4G e possui como técnica de transmissão de dados a dispersão no tempo devido a sua robustez e facilidade para explorar o domínio tanto do tempo como da frequência. Já para o *uplink* o 5G usa o *non-DFT-precoded OFDM* devido a estrutura simplificada que pode ser implantada nos receptores em combinação com a multiplexação espacial, tipo de multiplexação que pode ser implantada tanto no *uplink* como no *downlink*.

Para suportar essas diferentes larguras de banda, o 5G utiliza uma modulação OFDM flexível e possui espaçamento de sub-portadoras que podem variar de 15KHz até 240KHz (DAHLMAN; PARKVALL; SKOLD, 2018).

Até 3300 subportadoras podem ser usadas com uma largura de banda máxima de 400 MHz, as larguras de banda podem ser 50/100/200/400 MHz, com espaçamento de subportadoras de 15/30/60/120 KHz, respectivamente. Se um dispositivo permite a recepção de várias subportadoras então a transmissão se adapta a isso.

A figura 3 mostra a estrutura de *frame* no domínio do tempo assumindo uma estrutura TDD

Figura 3 – Estrutura de frame 5G:



Fonte: Retirado de *5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology* (DAHLMAN; PARKVALL; SKOLD, 2018)

O *frame* de 10ms é dividido em 10 *sub-frames* de 1ms, cada *sub-frame* contém 14 símbolos OFDM (*Orthogonal frequency-division multiplexing*) que dependendo da largura da subportadora pode ter tempos diferentes.

3.5 Esquemas de duplexação

O esquema de duplexação é dado dependendo de quanto espectro está alocado. Para frequências abaixo de 3 GHz o esquema de duplexação geralmente é FDD (*frequency-division duplex*). Para frequências acima de 6 GHz até 52.6 GHz que é o limite para o *release 15*, a alocação de espectro demanda por TDD (*time-division duplex*).

A estrutura de *frame* básica do 5G permite tanto *duplexação full duplex* como *half duplex*.

TDD é mais usado para frequências mais altas, que não possuem grande área de cobertura devido a sua maior atenuação, por isso serão comuns áreas mais densas

com maior número de antenas e nesse tipo de implementação a variação de tráfego por célula é mais rápida quando comparada com células de maior cobertura (DAHLMAN; PARKVALL; SKOLD, 2018).

Para esses casos o TDD dinâmico pode ser usado devido a capacidade de alocar os recursos de forma dinâmica no domínio do tempo entre o *uplink* e *downlink*.

3.6 Suporte a baixa latência

O suporte a latência muito baixa é uma característica muito importante para os tipos de aplicações que visam o 5G. Um exemplo é o uso de *front-loaded* que seria colocar as informações de controle e sinalização no início do *time slot* para assim o dispositivo começar a processar a informação sem necessidade de *buffer* minimizando o tempo de decodificação. Essa possibilidade de transmissão em uma fração do *time slot* é chamada de *mini-slot*.(DAHLMAN; PARKVALL; SKOLD, 2018)

3.7 Ondas milimétricas e centimétricas

O comprimento de onda é dado pela distância entre dois pontos de mesmo padrão sucessivos em uma forma de onda e pode ser calculado como:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.1)$$

Onde c é a velocidade da luz no vácuo e f a frequência da onda.

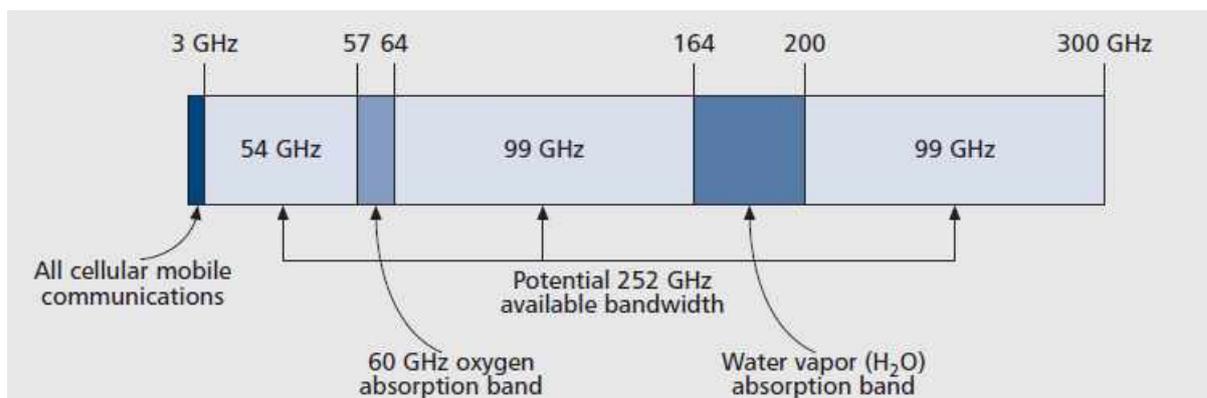
As ondas chamadas centimétricas são as ondas em que o comprimento de onda é na casa de centímetros e a mesma lógica se aplica para as ondas milimétricas. As ondas milimétrica então seriam as ondas de faixa de frequência entre 3GHz e 300GHz.

Comunicações móveis é uma tecnologia de extremo sucesso e desde a criação da sua primeira geração o número de usuários e aparelhos conectados só cresceu e isso não será diferente para o 5G que também possui uma grande expectativa de crescimento. (CISCO..., 2010)

Um das possibilidades para aumentar a eficiência espectral do 5G é explorar as ondas milimétrica, visto que o espectro das ondas centimétricas já está bastante ocupado. (PI; KHAN, 2011)

Com os espectro de 3GHz até 300GHz, uma faixa de 252GHz pode ser utilizado em comunicações móveis. Na figura 4 estão as faixas de frequências que possuem grande absorção do meio, sejam pelo oxigênio, ou pelo vapor D'água. Essas faixas são evitadas para comunicações móveis.

Figura 4 – Espectro das ondas milimétricas



Fonte: Retirado de *An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems*, (PI; KHAN, 2011)

Tabela 1 – Atenuação de alguns materiais

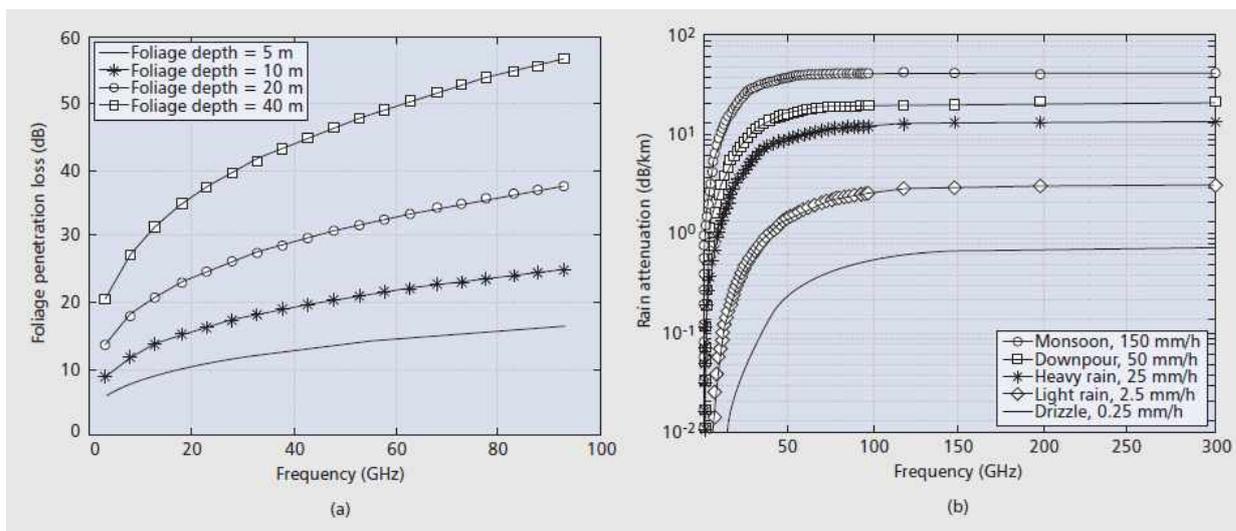
Material	Espessura (cm)	Atenuação (dB)		
		<3GHz	40GHz	60GHz
Drywall	2,5	5,4	-	-
Quadro branco	1,9	0,5	-	9,6
Vidro transparente	0,3/0,4	6,4	2,5	3,6
Vidro de malha	0,3	7,7	-	10,2
Madeira compensada	1,6	-	0,6	-
Madeira	0,7	5,4	3,5	-
Placa de gesso	1,5	-	2,9	-
Argamassa	10	-	160	-
Muro de tijolos	10	-	178	-
Concreto	10	17,7	175	-

Fonte: Modificado de *An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems*, (PI; KHAN, 2011)

3.8 Propagação no espaço livre, penetração e outras perdas

A perda de transmissão é associada principalmente a perda no espaço livre. Existe uma ideia errônea de que a perda de propagação no espaço livre depende da frequência e que quanto mais alta a frequência, maior será a perda. O motivo desse equívoco é que os livros sobre engenharia de rádio tratam da propagação entre antenas isotrópicas ou dipolo de meia onda, dipolo esse que a área de cobertura aumenta com o comprimento de onda, ou seja inversamente a frequência. Dessa forma, uma antena com uma abertura maior, possui maior ganho e conseqüentemente consegue absorver mais energia, porém para comprimentos de ondas menores, pode-se usar mais antenas na mesma área efetiva e dessa forma compensar a seu menor ganho. (PI; KHAN, 2011)

Figura 5 – Características de propagação de ondas milimétricas: a) perda de penetração em folhagem b) Atenuação pela chuva.



Fonte: Retirado de *An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems*, (PI; KHAN, 2011)

A perda por difração e reflexão depende do material do objeto e da sua superfície. Apesar de que esses dois fenômenos diminuem o alcance das ondas milimétricas, eles contribuem para a comunicação sem linha de visada NLOS (*non-line-of-sight*).

Diferente das ondas de frequência baixa, as ondas com altas frequências não possuem grande poder de penetração como mostrado na tabela 1, dessa forma o sinal terá dificuldade de penetrar prédios e casas.

A perda em folhagem também é significativa nas frequências de micro-ondas e foi desenvolvido uma fórmula para se calcular tal perda, de forma empírica (ANDERSON; RAPPAPORT, 2004).

Por fim pode-se observar na figura 5a) que quanto maior a frequência maior será a atenuação causada pela folhagem, da mesma forma na figura 5b) a atenuação pela chuva também aumenta com o aumento da frequência, isso porque o tamanho das gotas de chuva se aproxima do comprimento de onda das ondas milimétricas e ocorre perda por espalhamento (RECOMMENDATION, 2005).

3.9 Efeito Doppler e multi-percurso

O efeito Doppler é a percepção relativa do observador em relação a frequência de onda emitida, quando existe uma aproximação ou afastamento entre o observador e a fonte emissora. O deslocamento causado pelo efeito Doppler em uma faixa de frequência de 3 até 60 GHz com uma velocidade relativa entre fonte e observador de 3 até 350 Km/s

fica na faixa de 10Hz a 20KHz. Os valores de deslocamento das frequências no receptor é diferente devido aos ângulos de recepção serem diferentes e isso resulta no espalhamento de Doppler (POZAR, 2005).

3.10 Características do canal

3.11 Perda de caminho em larga escala

A perda do caminho em que a onda percorre do transmissor até o receptor é geralmente a parte mais difícil de se prever em um sistema de comunicações móveis, pois é composta de muitas variáveis, algumas dessas variáveis são: A distância percorrida pela onda, a linha de visada que pode ser direta ou não, além da velocidade relativa entre receptor e transmissor, que pode gerar espalhamento de Doppler como já foi citado.

Os mais tradicionais modelos de propagação focam na potência média recebida do sinal, que tenta prever a intensidade do sinal no receptor em uma determinada distância, levando em consideração reflexão, difração e dispersão do sinal.

Esse é o chamado modelo de propagação em larga escala, entretanto o sinal também pode sofrer pequenas mudanças de intensidade do sinal em distâncias de alguns comprimentos de onda.

3.12 Modelo de propagação no espaço livre

A potência recebida é dada por:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(\pi^2) d^2 L} \quad (3.2)$$

Onde: P_t é a potência da antena transmissora, G_t o ganho da antena transmissora, G_r o ganho da antena receptora, L o fator de perda não relacionado ao caminho sendo L maior ou igual a 1, recebendo valor de 1 quando não existe perda no hardware do sistema e λ o comprimento de onda em metros.

O ganho de uma antena é dado pela sua abertura efetiva:

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (3.3)$$

Sendo a área efetiva relacionado ao seu tamanho físico.

Uma antena ideal que irradia isotropicamente é normalmente usado como referência para o ganho de antenas reais e é dada por:

$$EIRP = P_t G_t \quad (3.4)$$

a EIPR (*Effective Isotropic Radiated*) é a potência irradiada máxima de um transmissor na direção de ganho máximo quando comparado com um radiador isotrópico.

A perda do caminho é dada pela diferença de potência recebida e a potência transmitida em dB.

3.13 Introdução arquitetura rádio-core

A arquitetura 5G é formada por duas partes, a primeira é a parte de Radio-Access Network (RAN) e a segunda pela parte do core de rede chamado de Core Network (CN). Na versão non-standalone do 5G ele é formado pela RAN conectada ao core do LTE o EPC.

3.14 Core 5G

O core do 5G é construído em cima de 3 vertentes que são (DAHLMAN; PARK-VALL; SKOLD, 2018):

- Arquitetura baseada em serviço
- Suporte a slicing network
- Separação do control-plane e user-plane

A primeira opção de arquitetura baseada em serviço foca exatamente nos serviços oferecidos pelo core de rede como autenticação, funções de cobrança, configuração de conexões fim-a-fim.

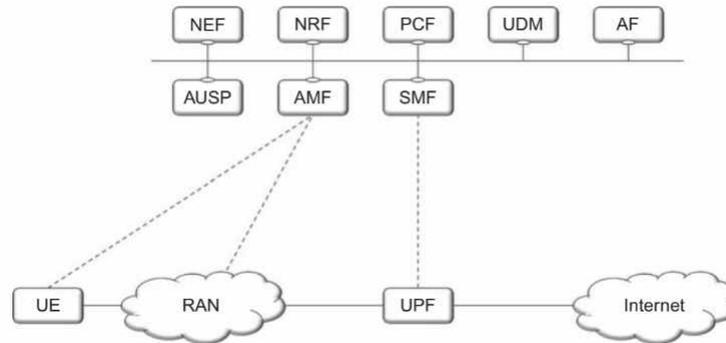
Slicing network trata-se do "fatiamento" da parte lógica da rede que é feito a partir das necessidades do cliente. Como exemplo, uma fatia poderia ter suporte a aplicações de banda-larga e mobilidade alta para ser usado em clientes celulares comuns, já outra fatia poderia ser configurada de forma a suportar clientes de mobilidade baixa, sensíveis a mudanças de latência para clientes com automação. Apesar de estarem rodando em cima dos mesmos elementos de rede, na visão do cliente esses serão serviços separados e independentes.

A separação de control-plane e user-plane também chamada de Control and User Plane Separation (*CUPS*) é importante para o 5G, pois ao se fazer essa separação isso retira a necessidade dos dois estarem fisicamente no mesmo local, existindo a possibilidade

de se colocar o user-plane mais próximo ao cliente podendo diminuir a latência em certas aplicações (CUPS, 2018)

A figura 6 mostra a arquitetura do core de rede 5G

Figura 6 – Core 5G



Fonte: Retirado de *5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology* (DAHLMAN; PARKVALL; SKOLD, 2018)

A função do user-plane é realizada pelo UPF (*User Plane Function*) que é um gateway entre o RAN e outra rede que pode ser, por exemplo, a internet e é responsável pelo roteamento de pacotes.

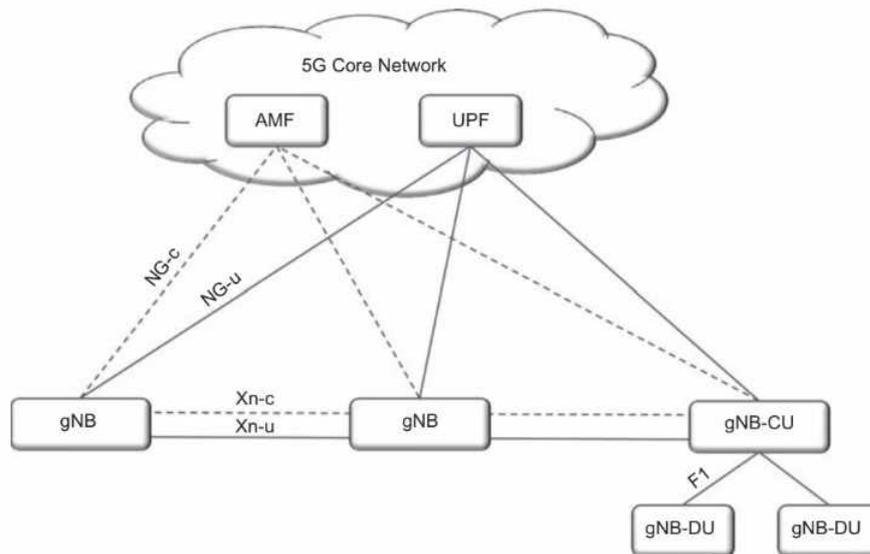
O *control-plane* possui diversas funções como o SMF (*Session Management Function*) que entre outras funções é responsável pela alocação de IP. O AMF (*Access and Mobility Management Function*) é responsável pelo controle de sinalização entre o core de rede e o dispositivo e para finalizar as funções do *control-plane* ainda restam segurança e autenticação. A funcionalidade de operação entre o AMF e o dispositivo do usuário é comumente chamado de NAS (*Non-Access Stratum*), que é diferente da operação de conexão entre o dispositivo do usuário e a rede de acesso que é chamado de AS (*Access Stratum*).

A gNB (NodeB da arquitetura 5G) é responsável por todas as funções que são relacionadas ao rádio como gerenciar os recursos do rádio, controle de admissão, estabelecimento de conexões, rotear dados do *user-plane* para UPF e do *control-plane* para AMF e gerenciamento do fluxo de QoS (*Quality of Service*) (DAHLMAN; PARKVALL; SKOLD, 2018).

Como pode ser observado pela figura 7 a gNB é conectada ao core do 5G pela interface UPF e pela AMF que são as principais conexões de *user-plane* e *control-plane* respectivamente. Uma gNB pode ser conectada a vários UPF ou AMF para distribuição de carga ou para redundância.

A interface Xn é usada para conectar as gNBs entre si, sua principal função é para suportar mobilidade em modo ativo e conectividade dupla, essa interface também pode

Figura 7 – Interfaces da rede de acesso



Fonte: Retirado de *5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology*, (DAHLMAN; PARKVALL; SKOLD, 2018)

ser usada para funções multicelular de *Radio Resource Management* (RRM) e também para minimizar a perda de pacotes quando ocorre *handover*.

Existe uma padronização para dividir as gNBs em duas partes com uma unidade central que será a (g-NB-CU) e uma distribuída chamada de (g-NB-DU) usando a interface F1, a interface entre a gNB ou g-NB-DU é a Uu.

Quando um dispositivo se conecta na rede via múltiplas células pode ocorrer agregação do *user-plane* para uma maior vazão de dados, ou a separação de *user-plane* e *control-plane* entre as células que é a chamada conectividade dupla *dual connectivity*.

3.15 Transmissão multi-antena

O uso de múltiplas antenas não é uma técnica nova, mas é essencial para o funcionamento do 5G em seu total potencial quando o quesito é o *throughput*, visto que pode ser feito o uso de frequências muito mais altas.

O uso de múltiplas antenas no transmissor pode ser feito para promover diversidade contra o desvanecimento devido ao fato das antenas estarem parcialmente não correlacionadas, separadas no espaço ou até polarizadas de forma diferente.

O uso de várias antenas no transmissor pode ser feito para aumentar a diretividade, nesse caso pode-se aumentar as taxas de dados atingidas no receptor ou a potência recebida além de reduzir a interferência aumentando a eficiência espectral.

Da mesma forma o uso de diversas antenas no receptor pode aumentar a diretividade de recepção, suprimindo a interferência de outras fontes.

E, por fim, a utilização de múltiplas antenas tanto no receptor como no transmissor permite o uso de multiplexação espacial que admite a transmissão de múltiplas camadas de dados usando o mesmos recursos de tempo ou frequência. (DAHLMAN; PARKVALL; SKOLD, 2018)

O uso de várias antenas no receptor e no transmissor pode melhorar a relação sinal-ruído que é proporcional ao número de antenas. No caso geral para N_T antenas de transmissão e N_R antenas de recepção o aumento da relação sinal-ruído pode ser dada por $N_T \times N_R$ e o aumento da relação sinal-ruído aumenta a vazão de dados que pode ser limitada pela largura de banda.

Para se entender essa saturação, pode-se considerar a expressão básica para a capacidade do canal de forma normalizada, dada pela equação 3.5

$$\frac{C}{BW} = \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right) \quad (3.5)$$

Onde S/N é a relação sinal-ruído, C/BW a relação de capacidade por largura de banda.

E por meio do *beam-forming* a relação sinal-ruído pode ser feita pra crescer proporcionalmente ao produto de N_T e N_R . Em geral $\log_2(1+x)$ é aproximadamente x se x for pequeno, ou seja, para condições em que a relação sinal-ruído é pequena a capacidade cresce aproximadamente proporcional a relação sinal-ruído, entretanto para casos em que o x for grande, $\log_2(1+x)$ é aproximadamente igual a $\log_2(x)$ sendo dessa forma, a capacidade cresce proporcional a relação sinal-ruído de forma logarítmica.

Porém com o uso de múltiplas antenas é possível criar uma condição em que é possível se obter um número N_L de canais paralelos sendo N_L dado pela equação 3.6

$$N_L = \min(N_T, N_R) \quad (3.6)$$

Cada canal será N_L multiplicado pela menor relação sinal-ruído, a potência do sinal é "dividida" entre os canais, dessa forma a capacidade será:

$$\frac{C}{BW} = \log_2\left(1 + \frac{S}{N} \cdot \frac{N_R}{N_L}\right) \quad (3.7)$$

Assim, tem-se N_L canais paralelos cuja capacidade é dada pela equação 3.7.

Sendo assim, sob certa condição, a capacidade do canal cresce linearmente com o número de antenas.

A multiplexação espacial também é chamada de MIMO *Multiple-Input/Multiple-Output*.

Para mais informações sobre o funcionamento de multiplexação espacial consultar (DAHLMAN; PARKVALL; SKOLD, 2013)

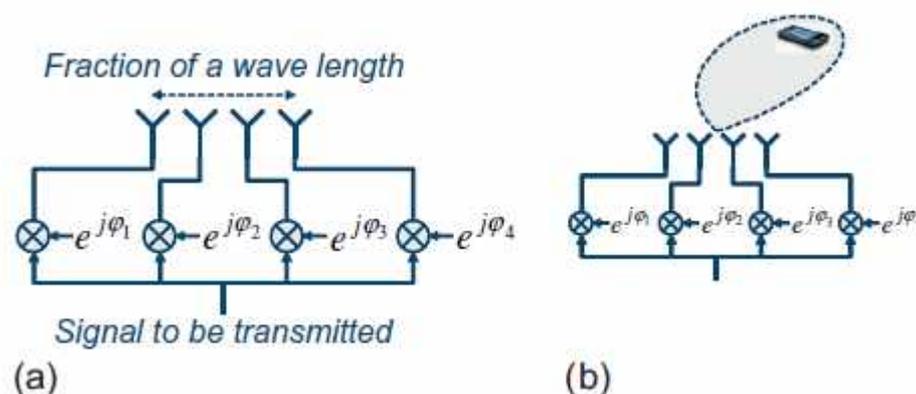
3.16 Beam-Forming

O uso de múltiplas antenas, além das melhorias que já foram citadas no seção 3.15 também é responsável pelo *beam-forming* que é uma técnica para aumentar a relação sinal-ruído no receptor direcionando os feixes das antenas. De forma geral o *beam-forming* pode aumentar a força do sinal em um fator de N_T que é o número de antenas no transmissor.

Existem dois casos para uso de múltiplas antenas para *beam-forming*, quando existe uma correlação mútua de antena baixa e uma correlação mútua de antena alta. No caso da alta correlação mútua de antena a distância entre as antenas é pequena, cerca de frações de comprimento de onda, como mostrado na figura 8a. O feixe pode ser direcionado aplicando diferentes deslocamentos de fase no sinal transmitido em cada antena como mostrado na figura 8b.

Essa configuração com diferentes deslocamentos de fases aplicados a antenas altamente correlacionadas é comumente chamado de clássico *beam-forming*, devido a alta correlação entre as diferentes antenas transmissoras. Essa configuração clássica de *beam-forming* não fornece nenhum tipo de diversidade contra o desvanecimentos do canal, somente oferece o aumento da relação sinal-ruído.

Figura 8 – Beam-forming clássico com correlação de antena mútua alta a) configuração da antena; b) estrutura do feixe

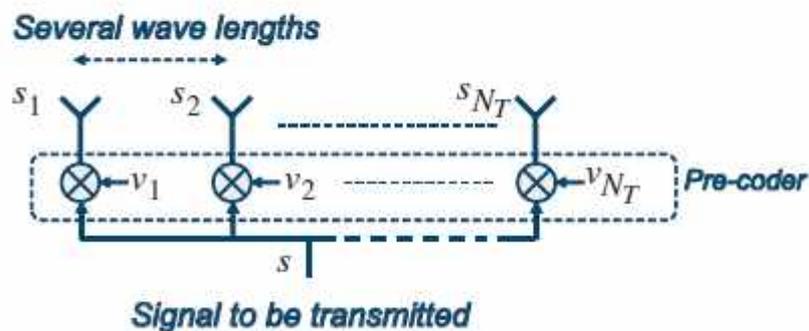


Fonte: Retirado de *5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology*, (DAHLMAN; PARKVALL; SKOLD, 2013)

No caso de baixa correlação mútua de antena, ela ocorre quando a separação das

antenas é grande como mostrado na figura 9 ou polarizações em direções diferentes em cada antena. Nessa configuração o princípio básico de *beam-forming* é o mesmo mostrado na figura 8 no sentido de que o sinal que vai ser transmitido em cada antena é multiplicado por um fator complexo. Entretanto ao contrário do *beam-forming* clássico o fator das antenas em geral é um valor complexo e tanto a fase como a amplitude do sinal a ser transmitido pode ser ajustado, nessa configuração de baixa correlação de antena mútua tanto a fase quanto o ganho instantâneo de cada canal em cada antena pode ser diferente. (DAHLMAN; PARKVALL; SKOLD, 2013)

Figura 9 – Beam-forming para o caso de correlação de antena mútua baixa



Fonte: Retirado de *5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology*, (DAHLMAN; PARKVALL; SKOLD, 2013)

3.17 Modulações digitais

Modulação é um processo que é feito para se transmitir uma mensagem que geralmente está em uma frequência baixa, chamado de sinal em banda base. Quando o sinal é modulado ele é passado para uma frequência bem acima da frequência de banda base, a modulação é feita quando a informação desse sinal em banda base, ou seja, os bits que são enviados correspondem a variação de fase, frequência ou amplitude do sinal modulado.

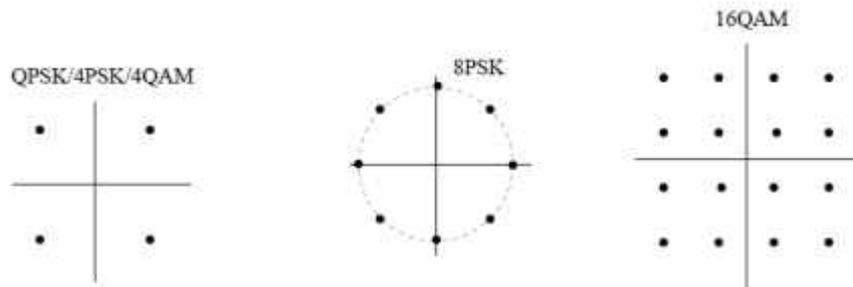
A demodulação é o processo inverso onde o sinal modulado é convertido para banda base para ser recebido pelo receptor.

Esses processos podem ser feitos tanto de forma analógica ou digital, aqui nesse trabalho trata-se apenas da digital, a saber, da modulação QAM (*Quadrature amplitude modulation*) M-ária. Para mais informações sobre outros tipos de modulações e demodulações consultar (RAPPAPORT et al., 1996)

A modulação M-ária é feita de forma que se varie não só a fase como é feito em modulações do tipo QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), mas também a amplitude formando uma constelação (RAPPAPORT et al., 1996), como mostrado na figura 10.

De forma geral o sinal QAM pode ser dado conforme a fórmula 3.8.

Figura 10 – Modulações do tipo a)QPSK, b)8PSK c)16QAM



Fonte: Retirado de *Introduction to Communication Systems* (MADHOW, 2014)

$$S_i(t) = \sqrt{\frac{2E_{\min}}{T_s}} a_i \cos(2\pi f_c t) + \sqrt{\frac{2E_{\min}}{T_s}} b_i \sin(2\pi f_c t) \quad (3.8)$$

$$0 \leq t \leq T \quad i = 1, 2, \dots, M$$

Onde E_{\min} é a energia do sinal com a amplitude mais baixa e a_i e b_i um par de inteiros independentes escolhidos de acordo com o local do ponto do sinal.

De forma geral a eficiência de largura de banda e potência dos sinais M-ários cresce conforme a tamanho de sua constelação. (RAPPAPORT et al., 1996).

3.18 Block error ratio

O *Block Error Ratio (Bler)* é definido pelo 3GPP TS 34.121, F.6.1.1, que diz que o bler é a taxa de número de blocos errôneos pelo número total de blocos enviados. O bloco é considerado errôneo pelo CRC *cyclic redundancy check*.

3.19 Modulation and Code Scheme

O MCS (*Modulation and Code Scheme*) é usado para determinar a taxa de dados de uma conexão sem fio. (IEEE802.11, 2009). São usados parâmetros como tamanho do canal, número de fluxos espaciais, métodos de codificação, técnicas de modulação e intervalo de guarda para determinar a taxa teórica em que o canal irá enviar. No caso do 5G NR o 3GPP especificou esses valores através das tabelas 1,2 e 3 a seguir.

Tabela 1 de índice MCS para PDSCH

MCS Index I_{mcs}	Modulation Order Q_m	Target code Rate $R \times [1024]$	Spectral efficiency
0	2	120	0.2344
1	2	157	0.3066
2	2	193	0.3770
3	2	251	0.4902
4	2	308	0.6016
5	2	379	0.7402
6	2	449	0.8770
7	2	526	1.0273
8	2	602	1.1758
9	2	679	1.3262
10	4	340	1.3281
11	4	378	1.4766
12	4	434	1.6953
13	4	490	1.9141
14	4	553	2.1602
15	4	616	2.4063
16	4	658	2.5703
17	6	438	2.5664
18	6	466	2.7305
19	6	517	3.0293
20	6	567	3.3223
21	6	616	3.6094
22	6	666	3.9023
23	6	719	4.2129
24	6	772	4.5234
25	6	822	4.8164
26	6	873	5.1152
27	6	910	5.3320
28	6	948	5.5547
29	2	reserved	
30	4	reserved	
31	6	reserved	

Fonte: Retirado de ETSI TS 138 214 V15.2.0 (2018-07) (3GPP)

3.20 Largura de banda

A largura de banda no 5G NR é flexível dependendo da aplicação em que for implantado. A largura de banda fundamental de uma portadora 5G NR é chamada de $BW_{channel}$ e é um parâmetro fundamental para se definir muitos dos requisitos no 5G NR. De forma a limitar a complexidade de implementação para o 5G NR foram definidas larguras de bandas de 5 a 400 MHz. A largura de banda de uma portadora é relacionada a utilização do espectro que é a fração da largura de banda do canal ocupado pelo PRB *Physical Resource Blocks*. (DAHLMAN; PARKVALL; SKOLD, 2018).

Para evitar interferências é necessário ter uma banda de guarda nas extremidades de cada canal, a banda de guarda para uma largura de banda de um canal é dada pela equação 3.9

$$W_{Guard} = \frac{BW_{Channel} - N_{RB} * 12 * \Delta f - \Delta f}{2} \quad (3.9)$$

Tabela 2 de índice MCS para PDSCH

MCS Index I_{MCS}	Modulation Order Q_m	Target code Rate $R \times [1024]$	Spectral efficiency
0	2	120	0.2344
1	2	193	0.3770
2	2	308	0.6016
3	2	449	0.8770
4	2	602	1.1758
5	4	378	1.4766
6	4	434	1.6953
7	4	490	1.9141
8	4	553	2.1602
9	4	616	2.4063
10	4	658	2.5703
11	6	466	2.7305
12	6	517	3.0293
13	6	567	3.3223
14	6	616	3.6094
15	6	666	3.9023
16	6	719	4.2129
17	6	772	4.5234
18	6	822	4.8164
19	6	873	5.1152
20	8	682.5	5.3320
21	8	711	5.5547
22	8	754	5.8906
23	8	797	6.2266
24	8	841	6.5703
25	8	885	6.9141
26	8	916.5	7.1602
27	8	948	7.4063
28	2	reserved	
29	4	reserved	
30	6	reserved	
31	8	reserved	

Fonte: Retirado de ETSI TS 138 214 V15.2.0 (2018-07) (3GPP)

Sendo N_{RB} o número máximo de blocos de recursos possíveis e Δ_f o espaçamento de subportadoras.

3.21 Throughput

O *throughput* ou vazão como é chamado em português é a taxa em que o sistema consegue enviar os dados. A taxa de dados que chega no UE depende de diversos fatores e pode ser calculada como:

$$Tx = 10^{-6} \cdot \sum_{j=1}^J \left(v_{Layers}^{(j)} \cdot Q_m^{(j)} \cdot f^{(j)} \cdot R_{max} \cdot \frac{N_{PRB}^{BW(j),\mu} \cdot 12}{T_s^\mu} \cdot (1 - OH^{(j)}) \right) \quad (3.10)$$

Onde: Tx é a taxa de dados (Mbps);

Tabela 3 de índice MCS para PDSCH

MCS Index I_{MCS}	Modulation Order Q_m	Target code Rate $R \times [1024]$	Spectral efficiency
0	2	30	0.0586
1	2	40	0.0781
2	2	50	0.0977
3	2	64	0.1250
4	2	78	0.1523
5	2	99	0.1934
6	2	120	0.2344
7	2	157	0.3066
8	2	193	0.3770
9	2	251	0.4902
10	2	308	0.6016
11	2	379	0.7402
12	2	449	0.8770
13	2	526	1.0273
14	2	602	1.1758
15	4	340	1.3281
16	4	378	1.4766
17	4	434	1.6953
18	4	490	1.9141
19	4	553	2.1602
20	4	616	2.4063
21	6	438	2.5664
22	6	466	2.7305
23	6	517	3.0293
24	6	567	3.3223
25	6	616	3.6094
26	6	666	3.9023
27	6	719	4.2129
28	6	772	4.5234
29	2	reserved	
30	4	reserved	
31	6	reserved	

Fonte: Retirado de ETSI TS 138 214 V15.2.0 (2018-07) (3GPP)

J é o número de portadoras;

$$R_{max} = 948/2014;$$

$v_{Layers}^{(j)}$: o número máximo de camadas;

$Q_m^{(j)}$: o número da ordem da modulação, sendo 2-QPSK, 4-16QAM, 6-64QAM, 8-256QAM;

$f^{(j)}$: O fator de desvanecimento, podendo ser 1, 0,8, 0,75 e 0,4;

μ : numerologia descrito em (3GPP, 2017a)

$$T_s^\mu = \frac{10^{-3}}{14 \cdot 2^\mu}$$

$N_{PRB}^{BW(j),\mu}$: é a alocação máxima de RB na largura de banda $BW^{(j)}$;

$OH^{(j)}$: é o cabeçalho e recebe os valores de 0,14 FR1 DL, 0,18 FR2 DL, 0,08 FR1 UL e 0,10 FR2 UL sendo FR1: 450 até 6000 MHz e FR2: 24250 até 52600MHz. (3GPP, 2017b).

4 Metodologia

4.1 Introdução

As primeiras *releases* já permitiram que fossem realizados testes sobre a rede 5G, mesmo que testes com uma rede no formato *non-standalone*. Os resultados práticos foram condizentes com as análises teóricas e características como baixa latência, e alto *throughput* (SOÓS et al., 2020). Esses testes são importantes para mostrar em casos fora de laboratório que é possível chegar em resultados reais. Pode-se acompanhar pelo site da Ookla (OOKLA, 2020) os diversos locais pelo mundo onde já se tem 5G, seja ele comercialmente disponível, com disponibilidade limitada ou em fase de *Pré-Release*.

4.2 PoC Algar

Essa *Poc* (*Proof of Concept*) não foi a primeira a ser feito dentro da Algar Telecom em parceria com uma empresa de telecomunicações. Em 2019 houve outra *Poc* realizada com parceria entre a Algar Telecom e a Huawei que também foi conteúdo para outro trabalho de conclusão de curso elaborado pelo Lucas Gonçalves Pereira (PEREIRA, 2019).

Dentro da Algar Telecom foi realizado então uma PoC do 5G NR. Os testes foram realizados considerando apenas alguns parâmetros do 5G, como *throughput*, latência, BLER etc. Os resultados desses testes são usados como base para análise do desempenho do 5G realizada neste trabalho. Todos os testes e procedimentos foram realizados dentro da Algar Telecom junto com a Nokia e Anatel para concretização de uma PoC do 5G.

O core de rede foi instalado em um prédio da Algar, enquanto a parte de acesso foi instalada em outro prédio em um laboratório de testes. No prédio onde estava o core de rede foi instalado o emulador de EPC e a switch, enquanto no outro prédio onde ficou a parte de acesso estavam a *AirScale* e a antena em si. O sistema foi implantado usando a frequência de 3.5 GHz licenciado para testes junto da Anatel.

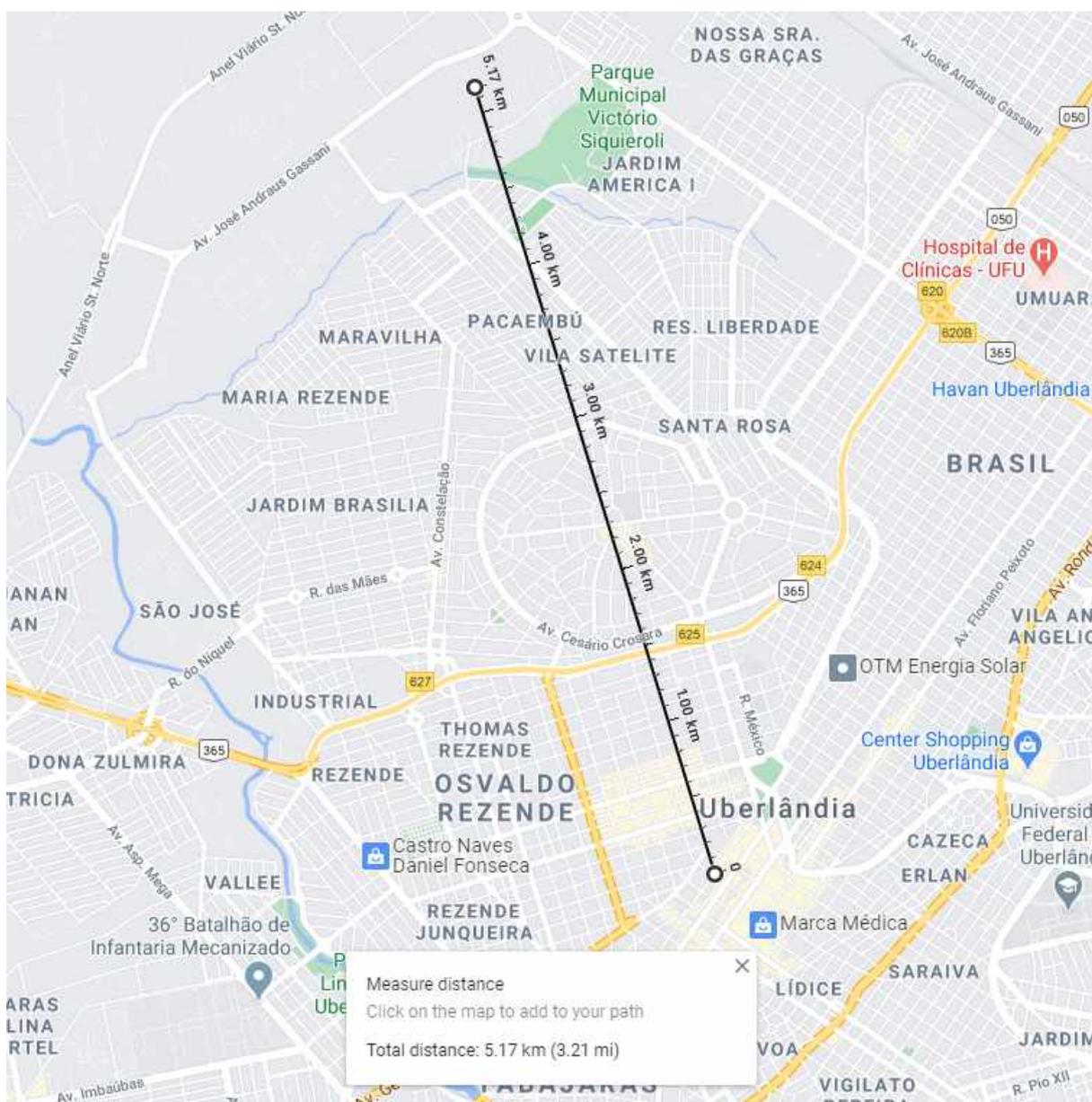
A distância dos prédio em linha reta: 5.17Km (figura 11), a ligação entre os equipamentos foi feito por um cabo de fibra óptica dedicado de 10Gbps.

O simulador EPC simulava o core EPC para o teste, enquanto a *AirScale* é o modulo próprio de RF da Nokia que estava ligado a antena conforme figura 12.

Para obtenção dos dados foi usado um smartphone Huawei Mate 20 X 5G, conforme figura 13, com o aplicativo *Speedtest* instalado.

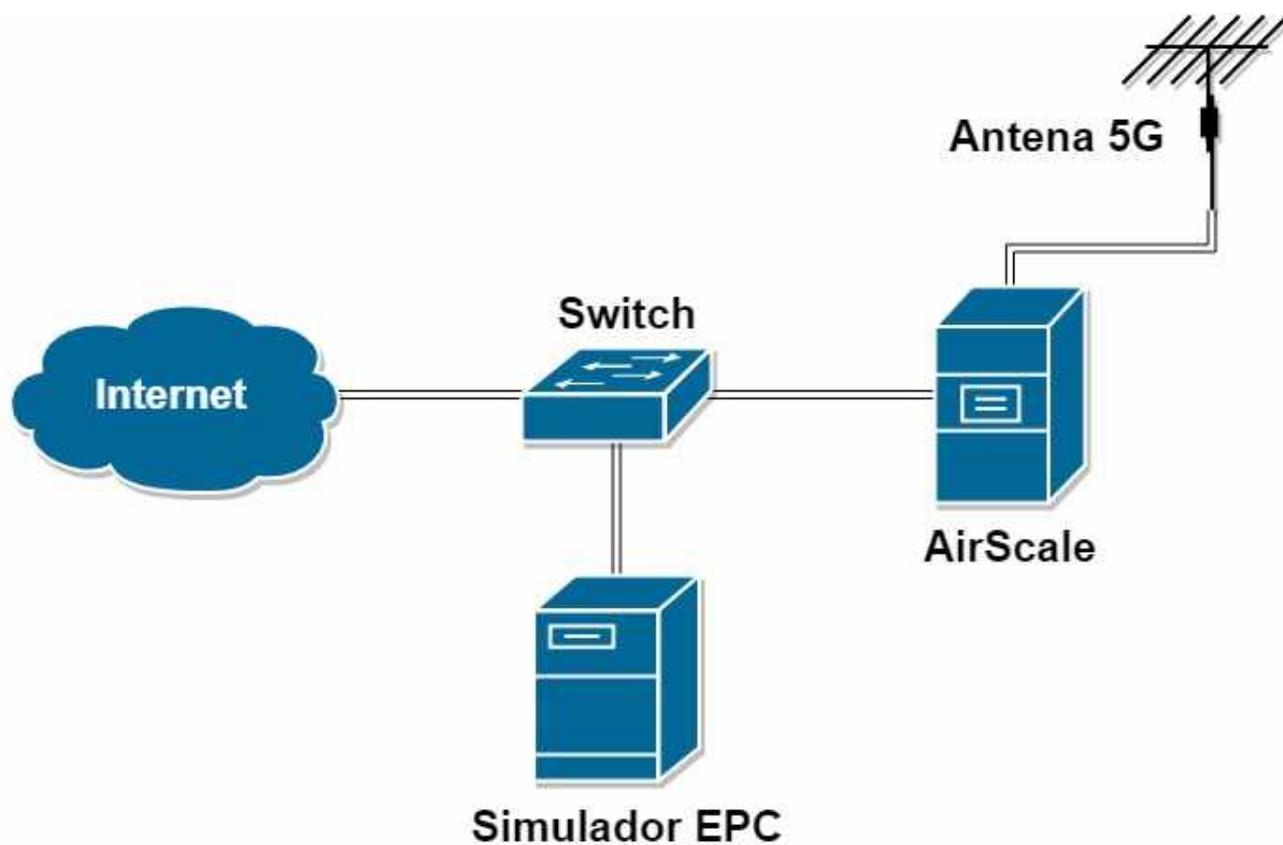
O UE foi fixado a uma distância de 6 metros da antena com visada direta e foram

Figura 11 – Distância entre os prédios em que foi realizado o teste



Fonte: Google Maps

Figura 12 – Topologia da rede



Fonte: Autor

coletados os dados de performance que serão discutidos a seguir.

Figura 13 – Huawei Mate20 x 5G

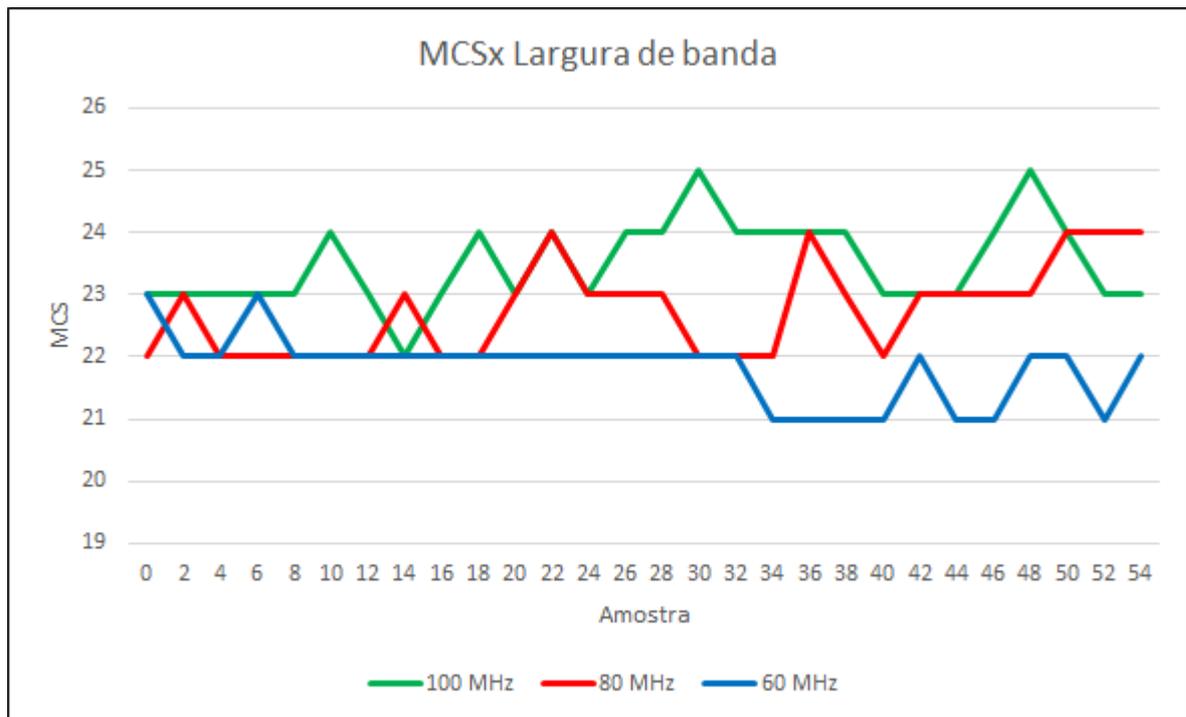


Fonte: <https://consumer.huawei.com/en/phones/mate20-x-5g/>

5 Resultados

Os dados foram coletados e plotados de forma que fosse mais fácil de observar a influência de cada quesito que foi analisado dentro do 5G. Os resultados são apresentados a seguir

Figura 14 – Gráfico de MCS por largura de banda



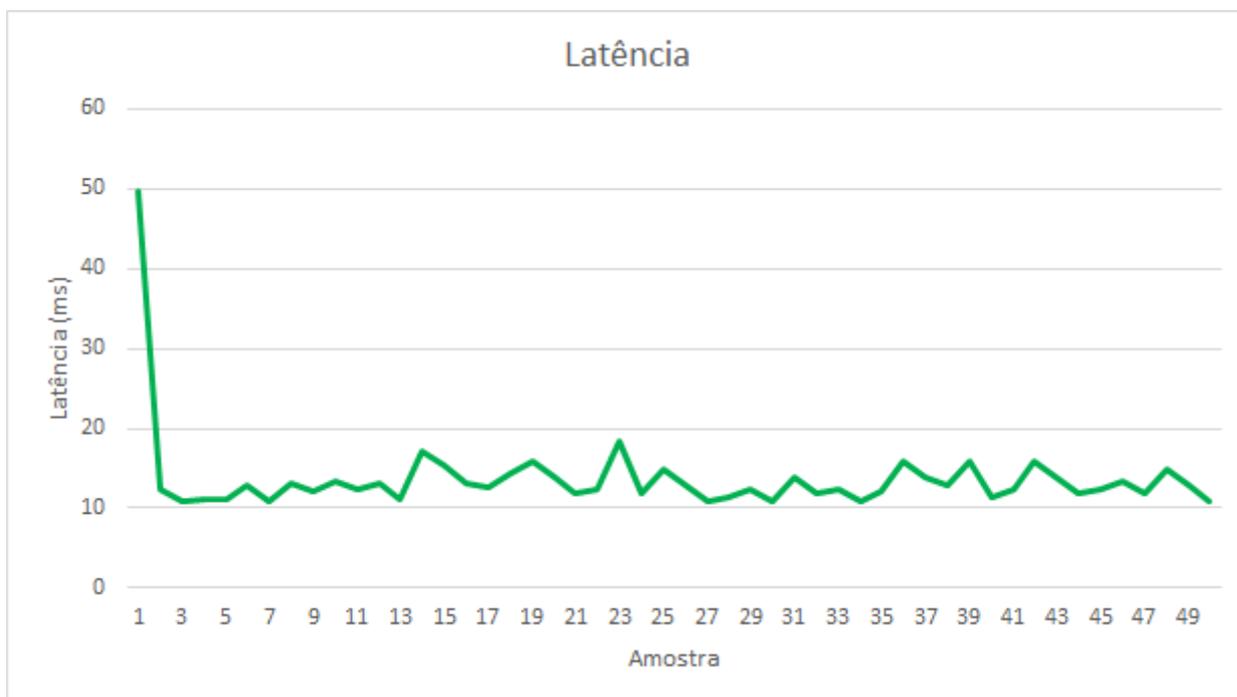
Fonte: Autor

Observa-se pelo gráfico da figura 14 que quanto maior a largura de banda, a tendência é de se ter maiores os valores de MCS. O que era esperado de acontecer de acordo com o que foi mostrado na seção 3.19.

Já no gráfico da figura 15 a latência tem uma média de 13,6 ms chegando em mínima de 10,9 ms. Em uma rede LTE bem otimizada essa latência se aproxima de 10ms (DAHLMAN; PARKVALL; SKOLD, 2018), a ideia do 5G inicialmente é ter uma latência em torno de 1ms em sua melhor performance. Esse valor não foi obtido aqui devido a fatores como o core de rede que foi o EPC simulado, e *features* como mostrado na seção 3.6 que só estarão presentes na versão URLLC do 5G que não foi o caso durante os testes.

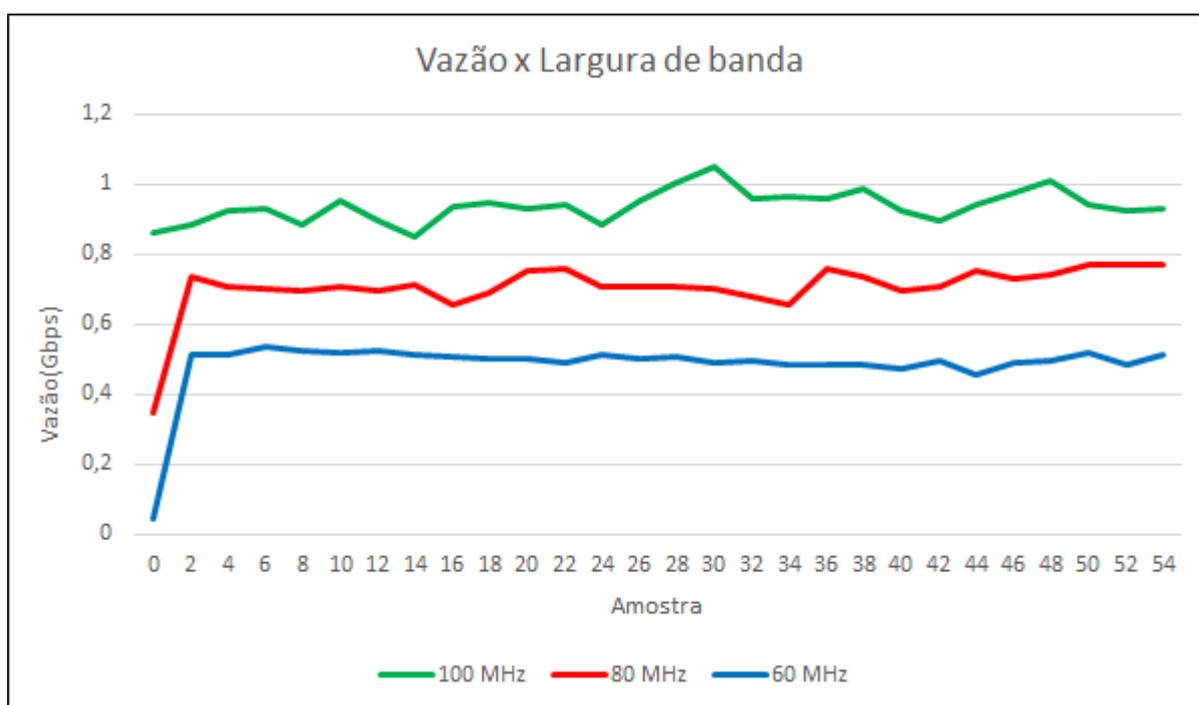
É nítido perceber a diferença que a largura de banda faz na vazão no gráfico da figura 16. Quanto maior a largura de banda, maior a quantidade de sub-portadoras e dessa forma maior a vazão de dados que pode ser obtida como mostrado na seção 3.4. Os testes foram feitos na frequência de 3.5GHz, que é uma frequência relativamente baixa se

Figura 15 – Gráfico de Latência



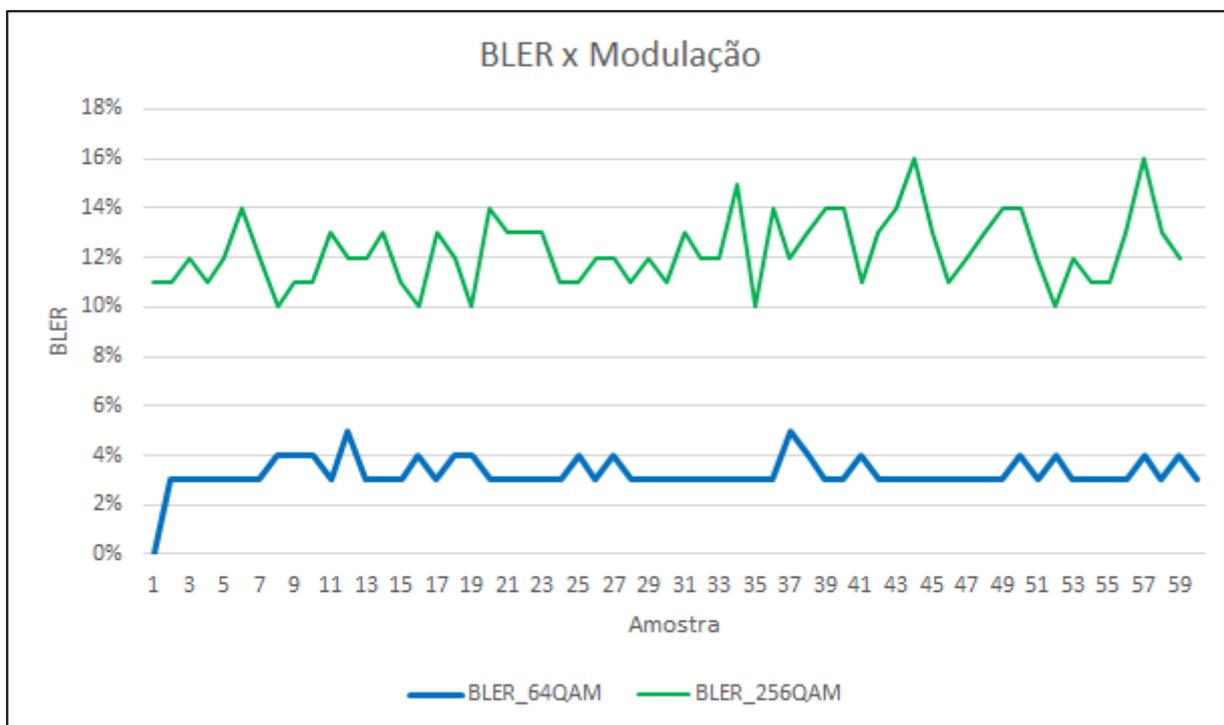
Fonte: Autor

Figura 16 – Gráfico de Vazão por largura de banda



Fonte: Autor

Figura 17 – Gráfico de BLER por Modulação



Fonte: Autor

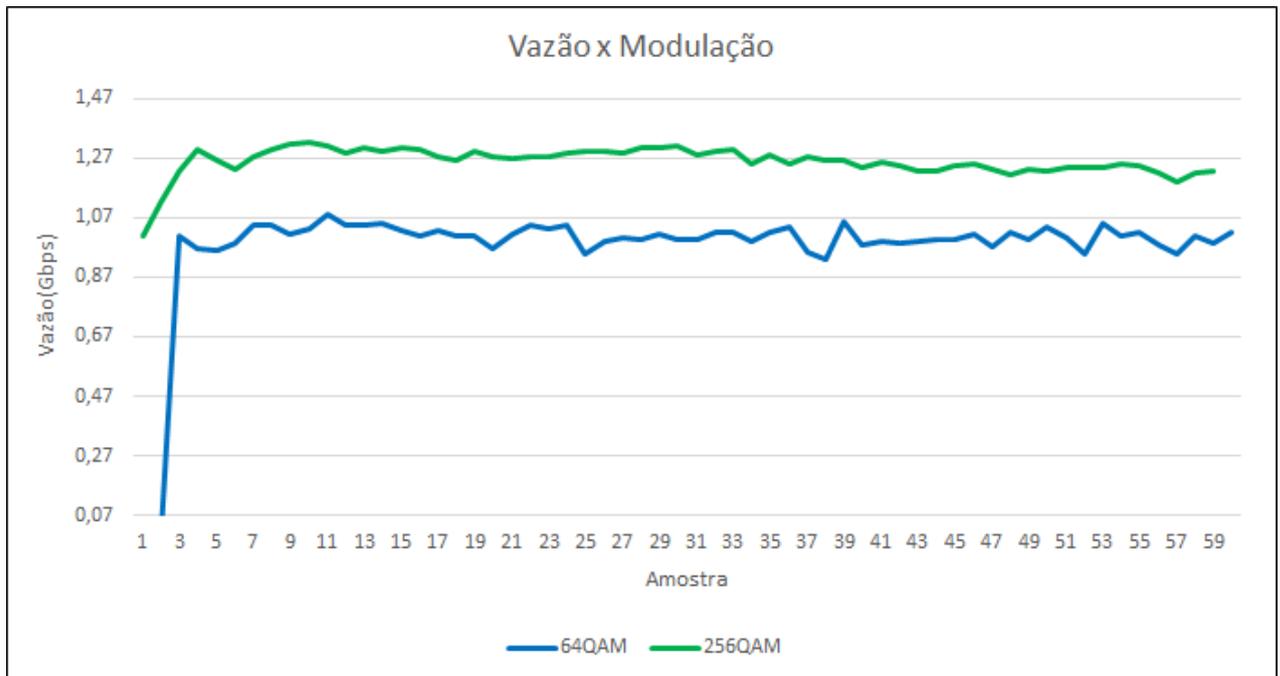
comparada com os frequências que o 5G pretende implementar e quando tais faixas de frequências mais altas forem implementadas, taxas de dados também muito maiores, na casa das dezenas de Gbps poderão ser alcançadas como mostrado na seção 3.7.

De forma semelhante ao índice de MCS por modulação, funciona o gráfico de BLER por modulação na figura 17, quanto maior o nível de modulação, maior o BLER, isso ocorre pois maiores índices de modulação exigem maior relação sinal ruído para uma melhor performance (ELNASHAR; EL-SAIDNY, 2018). Fatores que podem influenciar na relação sinal-ruído e degradar a qualidade do sinal são interferência, perdas por propagação e obstáculos que dificultam a penetração do sinal como mostrado na seção 3.8.

Já no gráfico da figura 18 é também nítido a diferença que o nível de modulação faz na vazão, sendo a vazão proporcional ao aumento do índice de modulação como descrito na seção 3.21, tendo aumento médio de cerca de 20% da vazão da modulação 256QAM em relação a 64QAM. Por fim utilizando valores de largura de banda de 100MHz, modulação 256QAM e *Scaling Factor* em 0,60 chega-se a uma vazão de 1,4Gbps que é bem próximo dos resultados dos testes.

O 5G NR se mostra bastante eficiente nos quesitos em que foi analisado neste estudo. Os resultados foram coerentes com a teoria e o 5G NR pode ser implementado como uma primeira versão para suprir demandas de tráfego e é exatamente o que já ocorre pelo mundo. A multinacional britânica *Vodafone* já possui cobertura 5G em 114 locali-

Figura 18 – Gráfico de vazão por Modulação



Fonte: Autor

dades pela Europa ([VODAFONE, 2020](#)), a norte americana *T-Mobile* possui cobertura em localidades nos 50 estados norte americano ([T-MOBILE, 2020](#)) e na Coreia do sul o número de usuários de 5G já ultrapassa os 6 milhões ([AGENCY, 2020](#)).

Os resultados foram bem semelhantes em comparação com o outro teste que aconteceu na Algar Telecom ([PEREIRA, 2019](#)) principalmente em relação a vazão, porém se fizermos um paralelo com a latência os testes aqui descritos se mostram inferiores, isso se deve principalmente ao fato de os *setups* terem sido diferentes como distância entre UE e Antena, ambiente físico de simulação que foram em locais diferentes e hardware emulado.

6 Conclusão

A quinta geração de comunicações móveis traz soluções para diversos problemas em diversas áreas de aplicações, esse trabalho apresenta uma amostra da evolução natural do 5G que é o eMBB e se mostrou bastante eficaz com as características que foram implantadas para testes, tão eficaz que já está ativa em diversos países do mundo ([AGENCY, 2020](#)), ([T-MOBILE, 2020](#)), ([VODAFONE, 2020](#)) e no Brasil ([CLARO, 2020](#)).

Os resultados obtidos nos testes do PoC foram de encontro com as propostas teórica acerca do 5G NSA. Todos os parâmetros, de latência, vazão e BLER se mostraram eficientes nas experimentações realizadas e condizentes com o que o 5G propõe.

Entretanto o trabalho ainda não está finalizado e ainda existem desafios para serem superados, principalmente na parte de IoT onde o número de dispositivos é altíssimo além de precisar de alta disponibilidade da rede, baixo consumo de energético, alta confiabilidade etc, ([AKPAKWU BRUNO J. SILVA, 2017](#)). É impossível prever o futuro, mas estamos sempre tentando fazê-lo ser menos inesperado.

Referências

3GPP. *NR; Physical channels and modulation*. [S.l.], 2017. Version 15.2.0. Disponível em: <<https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=>> Citado na página 38.

3GPP. *NR; User Equipment (UE) radio access capabilities*. [S.l.], 2017. Version 15.2.0. Disponível em: <<https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=>> Citado na página 39.

AGENCY yonhap news. *Korea 5G subscribers*. 2020. Acessado em 2020. Disponível em: <<https://en.yna.co.kr/view/AEN20200601006000320>>. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 48.

AKPAKWU BRUNO J. SILVA, A. M. A.-M. G. A. A survey on 5g networks for the internet of things: Communication technologies and challenges. *IEEE Standard for Information technology*, November 2017. Citado na página 48.

ANDERSON, C. R.; RAPPAPORT, T. S. In-building wideband partition loss measurements at 2.5 and 60 ghz. *IEEE transactions on wireless communications*, IEEE, v. 3, n. 3, p. 922–928, 2004. Citado na página 27.

CISCO Visual Networking Forecast and Methodology. 2010. Whitepaper_{c11} – 481360. Citado na página 25.

CLARO. *Cobertura 5G da Claro*. 2020. Acessado em 2020. Disponível em: <<https://www.claro.com.br/internet/5g>>. Citado na página 48.

CUPS. 2018. <<https://www.sdxcentral.com/articles/news/why-cups-is-a-critical-tool-in-the-5g-toolbox/2018/10/>>. Acessado: 2020-02-11. Citado na página 30.

DAHLMAN, E.; PARKVALL, S.; SKOLD, J. *4G: LTE/LTE-advanced for mobile broadband*. [S.l.]: Academic press, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.

DAHLMAN, E.; PARKVALL, S.; SKOLD, J. *5G NR: The next generation wireless access technology*. [S.l.]: Academic Press, 2018. Citado 10 vezes nas páginas 14, 23, 24, 25, 29, 30, 31, 32, 36 e 44.

ELNASHAR, A.; EL-SAIDNY, M. A. *Practical Guide to LTE-A, VoLTE and IoT: Paving the way towards 5G*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2018. Citado na página 46.

FREQUENCIAS 5G Anatel. 2019. <<https://www.anatel.gov.br/institucional/noticias-destaque/2278-aprovada-destinacao-de-faixas-de-frequencias-de-2-3-ghz-e-3-5-ghz>>. Acessado: 2019-11-23. Citado na página 21.

IEEE802.11. Part 11: Wireless lan medium access control (mac)and physical layer (phy) specifications amendment 5: Enhancements for higher throughput. *IEEE Standard for Information technology*, 2009. Citado na página 35.

LEE, W. C. *wireless and cellular telecommunication*. [S.l.]: McGraw-Hill, 2006. v. 3. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 13.

MADHOW, U. *Introduction to Communication Systems*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2014. Citado na página 35.

OOKLA. *OOKLA 5G MAP*. 2020. Acessado em 2020. Disponível em: <<https://www.speedtest.net/ookla-5g-map>>. Citado na página 40.

PEREIRA, L. *ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE THROUGHPUT E DE LATÊNCIA EM UMA REDE 5G NON STAND ALONE*. 2019. UFU. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 47.

PI, Z.; KHAN, F. An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems. *IEEE communications magazine*, IEEE, v. 49, n. 6, p. 101–107, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 25, 26 e 27.

POZAR, D. M. *Microwave engineering. Inc., Hoboken*, John Wiley Sons, v. 3, 2005. Citado na página 28.

RAPPAPORT, T. S. et al. *Wireless communications: principles and practice*. [S.l.]: Prentice hall PTR New Jersey, 1996. v. 2. Citado 5 vezes nas páginas 12, 15, 17, 34 e 35.

RECOMMENDATION, I. 838-3. specific attenuation model for rain for use in prediction methods. *ITU-R Recommendations, P Series Fascicle, ITU, Geneva, Switzerland*, 2005. Citado na página 27.

SOÓS, G. et al. Practical 5g kpi measurement results on a non-standalone architecture. 2020. Citado na página 40.

T-MOBILE. *T-mobile 5g coverage map*. 2020. Acessado em 2020. Disponível em: <<https://www.t-mobile.com/coverage/5g-coverage-map>>. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 48.

VODAFONE. *Vodafone 5g coverage*. 2020. Acessado em 2020. Disponível em: <<https://www.vodafone.co.uk/network/5g/why-vodafone>>. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 48.