

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

GETÚLIO MARTINS RESENDE

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE REDES 5G E LTE EM
DIFERENTES LOCALIDADES E FREQUÊNCIAS

UBERLÂNDIA

2023

GETÚLIO MARTINS RESENDE

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE REDES 5G E LTE EM
DIFERENTES LOCALIDADES E FREQUÊNCIAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Éderson Rosa da Silva

UBERLÂNDIA

2023

“Ideias e somente ideias podem iluminar a escuridão.”

Ludwig von Mises

Agradecimentos:

Agradeço ao meu orientador e professor Éderson, por todo o tempo despendido, carinho e atenção com as questões que eu trouxe durante os anos finais de minha graduação, desde me orientar neste trabalho a me orientar em minhas escolhas acadêmicas.

Aos meus professores de ensino superior, por me ensinarem temas que sempre sonhei estudar, aos meus professores de ensino médio pela base científica que me deram e aos professores de ensino fundamental e básico pela base sólida que me foi construída.

Aos meus pais Cristina e Getúlio por moverem montanhas por minha educação, mesmo em tempos difíceis, fazendo por mim tudo aquilo que sonharam em um dia ter, tudo isso a duras penas, debaixo de sol e chuva visando um nobre objetivo.

À minha avó Conceição pela disponibilidade, companhia e companheirismo durante esta caminhada que foi a graduação.

Aos meus amigos pelos diversos momentos felizes e por me ajudarem inúmeras vezes quando tive dificuldade.

Por fim aos profissionais que não são do ramo da educação, mas tiveram grande impacto em minha formação, desde os profissionais da limpeza, aos técnicos e aos profissionais da saúde que passaram por minha vida.

Resumo:

Com a recente implantação das redes 5G surge a necessidade de estudar melhores técnicas de implantação destas. Uma maneira é o uso de simuladores para estimar o comportamento de uma rede 5G em um determinado cenário. Este trabalho tem a iniciativa, portanto, de estudar o comportamento dessas redes, juntamente com a tecnologia LTE, em diferentes cenários para maximizar a experiência do usuário. Os resultados obtidos mostram o comportamento destas tecnologias com uma quantidade de 100 usuários, exibindo taxa de vazão, latência de pacote, relações sinal-interferência entre outras questões de interesse. Para isso, usou-se como base as frequências de 2,3 GHz e 3,5GHz, ambas *sub6-GHz*, que estarão entre as utilizadas no triângulo mineiro para comunicações móveis de quinta geração.

Palavras-chave: LTE, Redes 5G, Vienna 5G System Level Simulator.

Abstract:

With the recent implementation of the 5G networks a necessity to study better network implementation techniques take place. One way is to use simulators to estimate the behavior of an 5G network in a certain scenario. This final paper tries to study the behavior of those networks alongside with the LTE technology in different scenarios to maximize the user experience in those networks. The results obtained showed the behavior of those technologies with 100 users, showing user throughput, package latency, signal-interference ratio and many more objectives. All of that was simulated in 2,3 GHz and 3,5 GHz, both sub6-GHz used for the 5th generation mobile communication networks in the *triângulo mineiro* region.

Keywords: 5G Networks, LTE, Vienna 5G System Level Simulator.

Lista de figuras

Fig. 1: Ilustração de um sistema de telefonia celular	14
Fig. 2: Gráfico da adoção da telefonia celular no mundo.	15
Fig. 3: Gráfico da adoção da telefonia celular no mundo em tempos mais recentes.	16
Fig. 4: Gráfico da adoção da telefonia celular de acordo com a tecnologia	21
Fig. 5: Arquitetura de uma rede definida por software	23
Fig. 6: Arquitetura de uma rede 5G	24
Fig. 7: Constelação de 16 símbolos QAM	26
Fig. 8: Enfileiramento de dados sem e com fatiamento	27
Fig. 9: Parte da Universidade Técnica de Viena.	32
Fig. 10: Vista da Universidade Técnica de Viena no OpenStreetMap.....	33
Fig. 11: Parte do Campus Santa Mônica.	34
Fig. 12: Vista do Campus Santa Mônica no OpenStreetMap.	34
Fig. 13: Parque das Barrigudas e laboratórios da UFTM.....	35
Fig. 14: Vista do parque e dos laboratórios no OpenStreetMap.	36
Fig. 15: Vista da Universidade Técnica de Viena no simulador para a frequência 2,3GHz.....	40
Fig. 16: Função densidade de probabilidade cumulativa empírica de vazão por usuário em Viena para 2,3GHz.	41
Fig. 17: Função densidade de probabilidade cumulativa empírica de SINR e SNR por usuário em Viena para 2,3GHz para upload e download.	42
Fig. 18: Função densidade de probabilidade cumulativa empírica de SINR efetivo por usuário em Viena para 2,3GHz.....	43
Fig. 19: Relação BLER médio por Usuário em Viena em 2.3GHz.....	44
Fig. 20: Função densidade cumulativa empírica de latência dos pacotes em Viena em 2.3GHz.....	45
Fig. 21: Vista do Campus Santa Mônica no simulador para a frequência de 2,3GHz....	46
Fig. 22: Vista do parque no simulador para a frequência de 2,3GHz.	47
Fig. 23: Vista da Universidade Técnica de Viena no simulador para 3,5GHz.....	48
Fig. 24: Vista do Campus Santa Mônica no simulador para a frequência de 3,5GHz....	49
Fig. 25: Vista do parque no simulador para a frequência de 3,5GHz.	50
Fig. 26: Gráfico da velocidade de download, usando a técnica de bestCQI para as duas frequências no cenário Viena.	51
Fig. 27: Gráfico da velocidade de download, usando a técnica de Round Robin para as duas frequências no cenário Viena.	52

Fig. 28: Gráfico da velocidade de download, usando a técnica de bestCQI para as duas frequências no cenário Santa Mônica.	53
Fig. 29: Gráfico da velocidade de download, usando a técnica de Round Robin para as duas frequências no cenário Santa Mônica.	54
Fig. 30: Gráfico da velocidade de download, usando a técnica bestCQI para as duas frequências no cenário Parque.	55
Fig. 31: Gráfico da velocidade de download, usando a técnica de Round Robin para as duas frequências no cenário Parque.	56
Fig. 32: Gráfico da Relação Sinal-Interferência efetivo para as duas frequências no cenário Viena.	57
Fig. 33: Gráfico da Relação Sinal-Interferência efetivo para as duas frequências no cenário Santa Mônica.	58
Fig. 34: Gráfico da Relação Sinal-Interferência efetivo para as duas frequências no cenário Parque.	59
Fig. 35: Gráfico da latência média dos pacotes para as duas frequências no cenário Viena.	60
Fig. 36: Gráfico da latência média dos pacotes para as duas frequências no cenário Santa Mônica.	61
Fig. 37: Gráfico da latência média dos pacotes para as duas frequências no cenário Parque.	62

Lista de tabelas

Tab. 1: Região de interesse e interferência dos cenários.	29
Tab. 2: Parâmetros de transmissão dos cenários.	30
Tab. 3: Latitudes e Longitudes dos três cenários escolhidos.	31
Tab. 4: Limitações de latitudes e longitudes do cenário Viena.	32
Tab. 5: Limitações de latitudes e longitudes do cenário Santa Mônica.	33
Tab. 6: Limitações de latitudes e longitudes do cenário parque.	35
Tab. 7: Limitações e parâmetros das construções nos cenários.	38
Tab. 8: Quantidade de setores das estações base.	38
Tab. 9: Localização das estações base nos cenários.	38
Tab. 10: Quantidade de usuários nos cenários.	39
Tab. 11: Valores de velocidade de download, usando a técnica de bestCQI para as duas frequências no cenário Viena.	51
Tab. 12: Valores de velocidade de download, usando a técnica de Round Robin para as duas frequências no cenário Viena.	52
Tab. 13: Valores de velocidade de download, usando a técnica de bestCQI para as duas frequências no cenário Santa Mônica.	53
Tab. 14: Valores de velocidade de download, usando a técnica de Round Robin para as duas frequências no cenário Santa Mônica.	54
Tab. 15: Valores de velocidade de download, usando a técnica bestCQI para as duas frequências no cenário Parque.	55
Tab. 16: Valores de velocidade de download, usando a técnica de Round Robin para as duas frequências no cenário Parque.	56
Tab. 17: Valores da Relação Sinal-Interferência efetivo para as duas frequências no cenário Viena.	57
Tab. 18: Valores da Relação Sinal-Interferência efetivo para as duas frequências no cenário Santa Mônica.	58
Tab. 19: Valores da Relação Sinal-Interferência efetivo para as duas frequências no cenário Parque.	59
Tab. 20: Valores de latência média dos pacotes para as duas frequências no cenário Viena.	60
Tab. 21: Valores de latência média dos pacotes para as duas frequências no cenário Santa Mônica.	61
Tab. 22: Valores de latência média dos pacotes para as duas frequências no cenário Parque.	62

Lista de siglas e abreviaturas

1G	Primeira geração de telefonia móvel
2G	Segunda geração de telefonia móvel
3D	3 dimensões
3G	Terceira geração de telefonia móvel
3GPP	Third Generation Partnership Project
4G	Quarta geração de telefonia móvel
5G	Quinta geração de telefonia móvel
5GS	5G system
Anatel	Agência Nacional de Telecomunicações
API	Application Programming Interface
BLER	Block Error Ratio
CA	Carrier Aggregation
CDMA	Code-division Multiple Access
dB	DeciBel
D2D	Device-to-device
ECDF	Empirical Cumulative Density Function
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
eNB	Evolved Node B
EPC	Evolved packet core
E-UTRAN	Evolved UMTS terrestrial radio access network
FDD	Frequency Division Multiplexing
GHz	Giga Hertz
gNB	Next-Generation Node B
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
HSPA	High Speed Packet Access
IMS	IP multimedia subsystem
IoT	Internet of Things
ITU	International Telecommunication Union
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution Advanced
Mbits	MegaBits
MHz	Mega Hertz
MIMO	Multiple-Input and Multiple-Output

ms	Millissegundo
MSC	Mobile Switching Center
NG-RAN	Next-generation Radio Access Network
NR FR2	New Radio Frequency Band 2
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
PSTN	Public Switched Telephone Network
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
RR	Round Robin
SDN	Software-Defined Network
SINR	Signal-to-Interference Ratio
SL	Sidelink
SMS	Short Message Service
SNR	Signal-to-Noise Ratio
TDD	Time Division Multiplexing
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
V2X	Vehicle-to-everything
VoIP	Voice over IP
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WiFi	Wireless Fidelity

Sumário

Capítulo 1 - Introdução	14
1.1 - Motivação	16
1.2 - Objetivos.....	17
1.3 – Organização do trabalho	17
Capítulo 2 – Referencial Teórico	19
2.1 – Padrão LTE	20
2.2 – Redes 5G.....	21
2.2.1 – Internet das Coisas	21
2.2.2 – Comunicação Vehicle-to-Everything	22
2.2.3 – Redes Definidas por Software	22
2.2.4 –Tecnologias para a Interface de Rádio.....	23
2.2.5 –Arquitetura do 5G	24
2.3 – Trabalhos Relacionados	24
2.4 – Considerações Finais relativas ao Simulador.....	25
2.4.1 – QAM (Modulação em Amplitude em Quadratura)	25
2.4.2 – Feedback	26
2.4.3 – Round Robin.....	26
2.4.4 – Best CQI	28
2.4.5 – Capacidades do Simulador	28
Capítulo 3 – Metodologia	29
3.1 - Parâmetros de simulação	29
3.1.1 - Região de interferência.....	29
3.1.2 – Parâmetros de transmissão.....	30
3.1.3 - Geolocalização do mapa.....	31
3.1.4 – Medidas de desempenho.....	36
3.1.5 – Considerações finais	37
Limitações físicas e parâmetros das construções.....	37
Parâmetros das estações bases LTE	38
Parâmetros das estações bases 5G	38
Posicionamento das estações base	38
Quantidade de usuários	39
Capítulo 4 – Resultados e Discussão	40
Comparação dos resultados para as duas frequências	50

Vazão por usuário no cenário Viena (bestCQI).....	51
Vazão por usuário no cenário Viena (Round Robin).....	52
Vazão por usuário no cenário Santa Mônica (bestCQI)	53
Vazão por usuário no cenário Santa Mônica (Round Robin)	54
Vazão por usuário no cenário parque (bestCQI).....	55
Vazão por usuário no cenário parque (Round Robin)	56
Razão Sinal-Interferência efetivo no cenário Viena	57
Razão Sinal-Interferência efetivo no cenário Santa Mônica.....	58
Razão Sinal-Interferência efetivo no cenário parque.....	59
Latência de pacote no cenário Viena	60
Latência de pacote no cenário Santa Mônica.....	61
Latência de pacote no cenário parque	62
Capítulo 5 – Conclusão	64
5.1 – Análise Geral	64
5.2 – Trabalhos futuros	64
Referências	66
Apêndices.....	68
Apêndice I – Programa original.....	68
Apêndice II – Programa adaptado – Cenário Viena – 2,3GHz.....	70
Apêndice III – Programa adaptado – Cenário Viena – 3,5GHz	73
Apêndice IV – Programa adaptado – Cenário Santa Mônica – 2,3GHz	75
Apêndice V – Programa adaptado – Cenário Santa Mônica – 3,5GHz.....	78
Apêndice VI – Programa adaptado – Cenário Parque – 2,3GHz	80
Apêndice VII – Programa adaptado – Cenário Parque – 3,5GHz	83

Capítulo 1 - Introdução

A princípio as comunicações móveis são sistemas duplex que conectam uma estação-base e um aparelho móvel utilizando ondas de rádio, ou seja, são sistemas onde o aparelho e a estação conseguem enviar e receber informações. Estes dispositivos, então, têm um número específico e são conectados na rede telefônica comutada pública (PSTN).

Na primeira geração de redes móveis, os aparelhos sem fio eram extremamente ineficientes e funcionavam apenas a algumas dezenas de metros da antena receptora, servindo principalmente em ambientes domésticos por conta disso. Toda esta limitação espacial do telefone sem fio fez com que se criasse um sistema de telefonia móvel de maior alcance e maior capacidade, surgindo então os sistemas de telefonia celular.

Apesar de parecer sinônimos, a telefonia móvel e telefonia celular não são iguais. Um sistema de telefonia móvel permite que o usuário use seu telefone sem as amarras de estar estacionário em um local, como ocorre com o telefone fixo, porém apesar ser móvel a telefonia não é celular. A telefonia celular é um sistema que faz uso do conceito de células para aumentar o alcance e para aproveitar uma fatia do espectro.

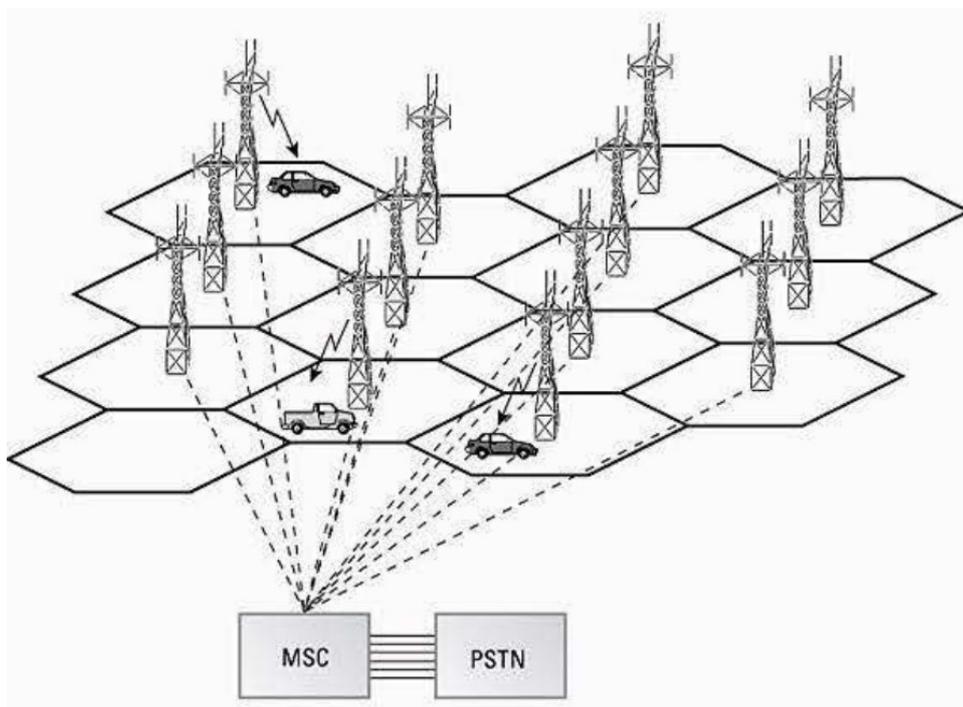


Fig. 1: Ilustração de um sistema de telefonia celular. **Fonte:** [12].

Na Fig. 1 tem-se uma ilustração de um sistema celular, demonstrando as células, que são, em efeito, a área de cobertura de uma estação-base, representadas pelos hexágonos, ilustrando os carros que são os usuários da telefonia celular, apresentando as linhas tracejadas que representam a ligação das estações-base na Central de Comutação Móvel (MSC) e por fim a PSTN. Nota-se, por meio da ilustração, que a telefonia celular é também telefonia móvel, mas não é possível afirmar que a telefonia móvel é celular.

Apesar do sentimento de obsolescência que surge ao se pensar na telefonia celular, sua adoção somente cresce ao passar dos anos, uma vez que esta não mais se limita a apenas ligações telefônicas, já que esta tecnologia evoluiu ao se ligar à internet e permitir a navegação na mesma, com troca de mensagens instantâneas por aplicativos, o uso de streaming de vídeo e músicas com atraso cada vez menor e permitindo as ligações telefônicas que agora ocorrem pela internet.

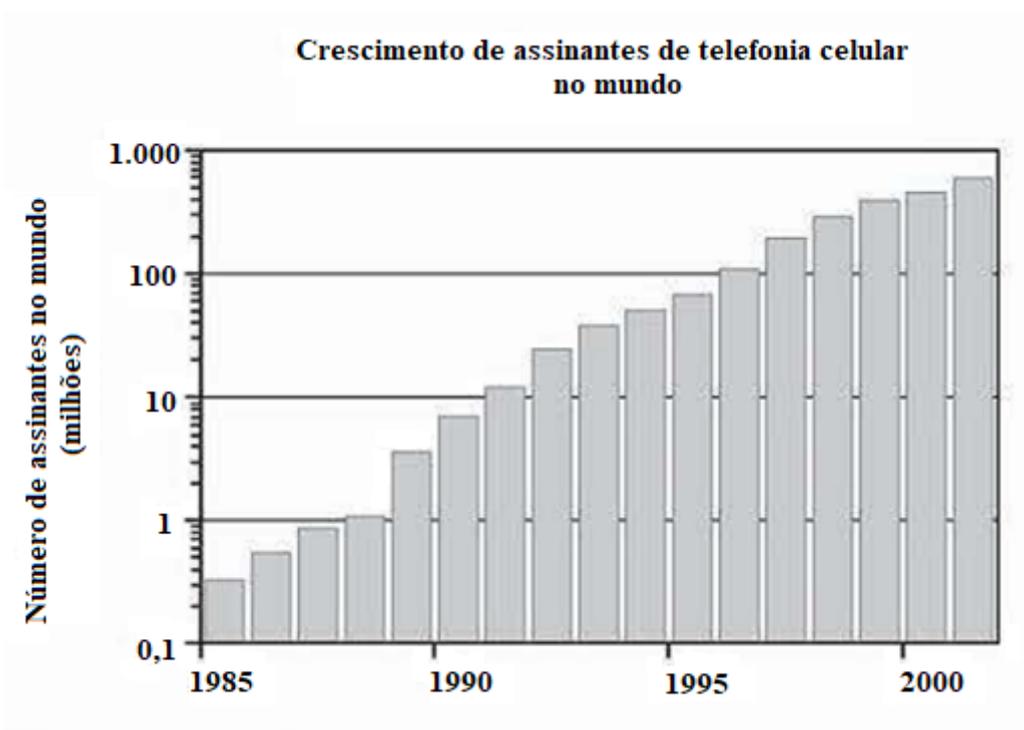


Fig. 2: Gráfico da adoção da telefonia celular no mundo. **Fonte:** [12].

A Fig. 2 apresenta a adoção da telefonia celular ao redor do mundo durante os períodos de 1985 a 2002, mostrando uma adoção crescente da tecnologia ao passar do tempo nos estágios mais iniciais da tecnologia, indicando um interesse dos consumidores no mundo todo a se usar a telefonia celular que, à época, se limitava a ligações telefônicas.

A Fig. 3 mostra um viés idêntico, porém com resultados mais próximos dos tempos atuais, que indica que a adoção das redes celulares está ainda em crescimento apesar de se aproximar de uma assíntota, seguindo uma curva logística, que pode ser facilmente explicada pela adoção destas redes celulares estarem se aproximando à quantidade de pessoas vivas na Terra, que indica sua popularidade e praticamente sua onisciência na vida contemporânea, onde todo mundo tem um plano de telefonia celular.

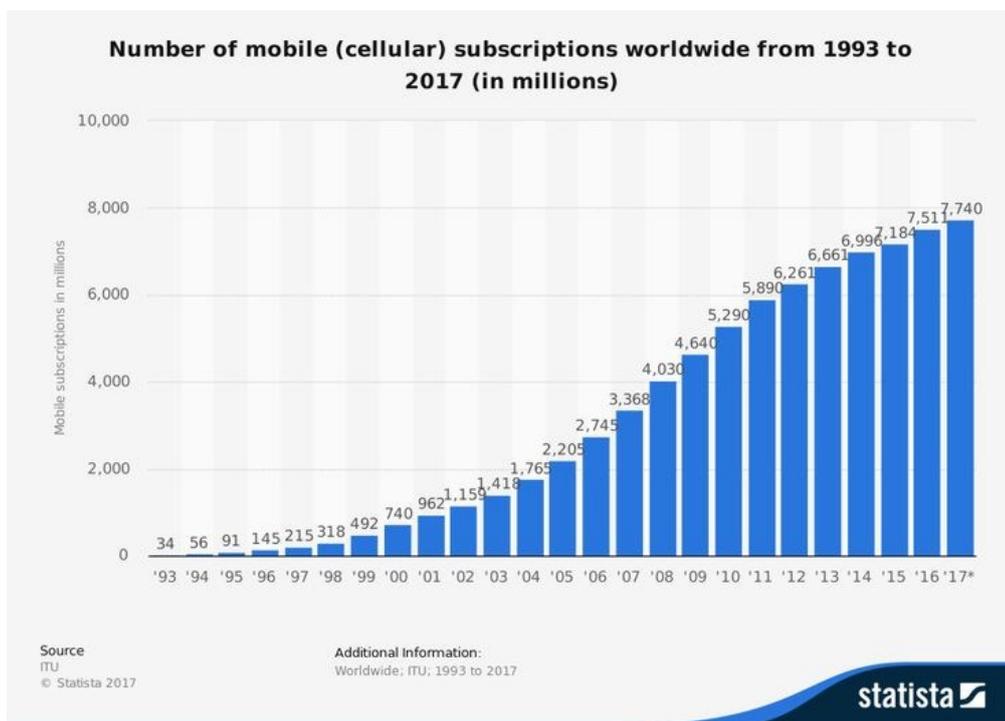


Fig. 3: Gráfico da adoção da telefonia celular no mundo em tempos mais recentes. **Fonte:** [1].

1.1 - Motivação

Tendo em vista o recente leilão das faixas de funcionamento do 5G no Brasil pela Anatel [3], nota-se a eminente implantação nacional desta tecnologia. Levando em conta a coexistência da tecnologia anterior, a LTE, surge uma necessidade de estimar o comportamento destas duas infraestruturas funcionando em conjunto em cenários realistas, onde empresas do ramo implementariam estas tecnologias para atender o usuário final. A utilização de simulação é uma boa opção para realização de testes em diferentes cenários e cargas de tráfego. Os resultados podem antecipar situações possíveis

de acontecer na rede e permitir uma melhor previsão de compartilhamento por parte das operadoras.

O simulador a se escolher deve permitir o estudo da performance da rede levando em conta os parâmetros de capacidade, latência, cobertura e eficiência da rede, de maneira a criar uma rápida prototipagem de uma rede 5G para um cenário específico, com uma localidade em mente e uma frequência desejada. Um ótimo candidato para simulador é o Vienna 5G System Level Simulator [6], que além destes recursos também tem um tempo de simulação relativamente curto e com diversas outras funcionalidades e facilidades. Mais detalhes sobre este serão apresentados em 2.4.4.

1.2 - Objetivos

Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento de uma rede 5G, aliada com LTE, em diferentes localidades e frequências assim, notando as diferenças apontadas em simulador de medidas de desempenhos, como a taxa de vazão dos usuários, latência etc. Levando em conta um local densamente populado e urbano com suas diversas construções, um local com poucas construções e poucos obstáculos em geral e um local intermediário, tudo isso sendo analisado em duas faixas de frequências a serem usadas na região do triângulo mineiro e levando em conta os escalonadores Round Robin e Best CQI que serão apresentados em 2.4.2 e 2.4.3.

1.3 – Organização do trabalho

O trabalho está organizado conforme descrito a seguir. No capítulo 2 tem-se o referencial teórico, com breve apresentação do padrão LTE, das redes 5G, e discussão a respeito de trabalhos relacionados e encerrando com considerações finais.

Em seguida, no Capítulo 3 são detalhados os parâmetros de simulação, as regiões de interferência dos cenários escolhidos, os parâmetros de transmissão, as geolocalizações dos mapas dos cenários, as medidas de desempenho e, por fim, as considerações finais.

Na sequência, no Capítulo 4, exibe-se os resultados das simulações realizadas e discussões deles. Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões finais e direcionamentos para trabalhos futuros.

Capítulo 2 – Referencial Teórico

O surgimento das comunicações móveis iniciou no começo da década de 80, tendo uma nova geração de sistemas de comunicações celulares surgindo a cada década, aproximadamente. Com estas gerações sendo apresentadas, há de surgir um consenso entre a indústria, que tipicamente a associa o nome da nova geração com o surgimento de uma nova arquitetura de rede e interface de rádio.

A primeira geração de telefonia móvel (1G) usava técnicas de modulação analógica muito similar aos rádios, o que fazia dele um sistema muito simples, porém de fácil acesso às conversas dos usuários. Outro ponto negativo desta tecnologia era o tamanho excessivo de uma célula, que permitia uma quantidade menor de usuários, reduzindo sua eficiência.

A primeira evolução surgiu com a introdução da segunda geração de telefonia móvel (2G), no início dos anos 90, sendo o primeiro sistema a usar a tecnologia digital, o que melhorou a eficiência espectral e permitiu a utilização de dispositivos móveis menores e mais baratos. Esta geração, bem como a anterior não tem apenas um padrão. No 2G há o *Global System for Mobile Communications* (GSM), que apesar de ter sido criado para apenas a aplicação de telefonia celular evoluiu para dar suporte a mensagens instantâneas (SMS) e para pacotes de dados por meio do *General Packet Radio Service* (GPRS) dando início à difusão do uso de dados móveis em telefonia celular, que promoveu uma maior popularização destas redes. Houve também outras evoluções dentro desta geração, a exemplo o *Enhanced Data Rates for GSM Evolution* (EDGE), com a modificação dos equipamentos de rádio que permitiram maior taxa de vazão em relação à tecnologia anterior.

Com o sucesso das redes 2G, a União Internacional de Telecomunicações (ITU) estabeleceu requisitos necessários para a próxima geração de telefonia móvel, a terceira geração (3G), em 1997. Assim, surgiu um padrão popular, o *Universal Mobile Telecommunication System* (UMTS) por meio do grupo *Third Generation Partnership Project* (3GPP). Este padrão usa o mesmo núcleo de rede do GSM, porém implementou uma nova rede de acesso de rádio. Há duas implementações de acesso desta tecnologia, a usada na maior parte do mundo é o *Wideband Code Division Multiple Access* (WCDMA), que se diferencia do *Code Division Multiple Access* (CDMA) pelo fato de usar maiores larguras de banda, que geram uma vazão por usuário maior. Mais uma vez a telefonia

móvel recebeu uma melhoria de meia vida através do padrão *high-speed packet access* (HSPA), que permitiu uma melhoria na performance de aplicações de dados em detrimento de variações a curto prazo da razão de dados recebidos [2].

2.1 – Padrão LTE

Long Term Evolution (LTE) é um padrão de tecnologia móvel que surgiu como evolução das tecnologias GSM/EDGE e UMTS/HSPA, sendo melhorada sua capacidade e velocidade usando interfaces de rádio e núcleo da rede diferentes. Esta rede de quarta geração (4G) tem sua rede de acesso baseada no *Orthogonal Frequency-division Multiple Access* (OFDMA) e sua largura de banda poder variar de 1,4 MHz a 20 MHz. Outra característica desta tecnologia é a possibilidade de usar um de dois padrões para alternar entre o upload e o download, sendo eles o *Time Division Duplexing* (TDD) que usa apenas uma frequência para a transmissão e a recepção de dados, porém durante um período se transmite e no restante se recebe os dados. A outra maneira é o uso do *Frequency Division Duplexing* (FDD), na qual usa-se uma frequência para a transmissão e outra para a recepção dos dados [4].

A quarta geração surfou na explosão do uso da tecnologia anterior, a HSPA, que teve sua implementação coincidente com a introdução do iPhone, da Apple, e do Android, da Google. Pela primeira vez a telefonia móvel cedeu o uso de comutação de circuitos, adotando completamente a comutação de pacotes, que abrange as ligações telefônicas por meio do *Voice over IP* (VoIP) que pode ocorrer não apenas pela operadora de telefonia móvel, mas também por aplicativos como o WhatsApp, por exemplo.

Este padrão de telefonia móvel também foi atualizado e melhorado, como ocorreu com gerações anteriores, a exemplo do *LTE-Advanced* (LTE-A), que introduziu a agregação de portadoras (CA), que aumenta a taxa de dados ao permitir a comunicação entre múltiplas células, onde a transmissão e recepção ocorrem em diferentes frequências.

Outra inovação a parte é a introdução da comunicação Dispositivo-a-dispositivo (D2D), que permite que dois usuários móveis possam comunicar diretamente entre si através da interface de rádio, sendo essa técnica denominada de *sidelink* (SL) [2].

2.2 – Redes 5G

As redes 5G são redes que foram criadas para substituir as redes LTE, tendo como um de seus diferenciais uma maior largura de banda. Como consequência da operação em frequências superiores em que são utilizadas larguras de banda maiores, há um aumento da degradação do sinal com a distância e obstáculos. Por outro lado, em situações adequadas consegue-se taxas de transmissão mais elevadas, variando de 50 a 1000 Mbits/s, dependendo da carga da estação base. Adiciona-se também a possibilidade de latências muito inferiores que podem ir de 8 a 12 ms. Além destas capacidades, uma melhoria desta tecnologia em detrimento das anteriores é o uso de múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO) melhorando a vazão dos usuários naquele setor.

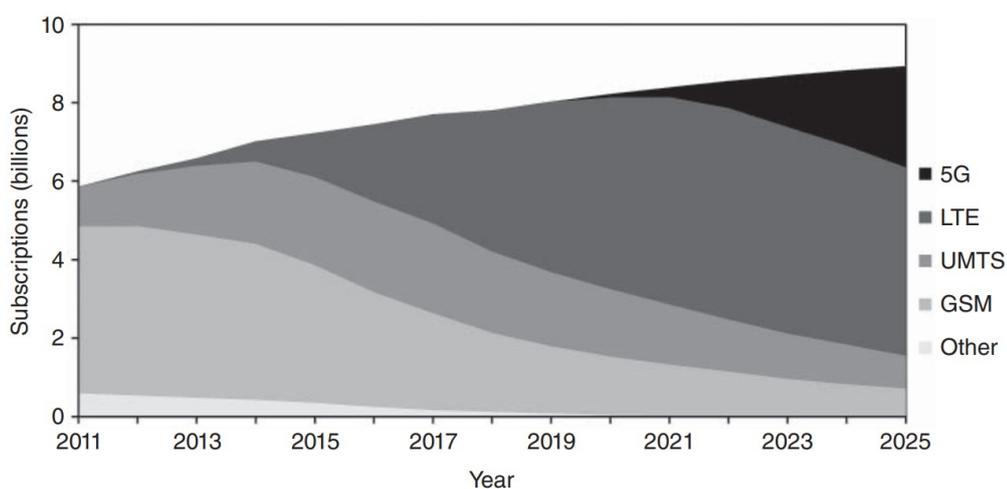


Fig. 4: Gráfico da adoção da telefonia celular de acordo com a tecnologia.
Fonte: [2].

Com as melhorias decorrentes das evoluções da última geração, o 5G não só aumenta a adoção de telefonia celular, mas também substitui aos poucos as tecnologias anteriores, fazendo que mais usuários possam tomar vantagem destas melhorias tecnológicas ao passo que as tecnologias anteriores se tornam mais periféricas, como se observa na Fig. 4.

2.2.1 – Internet das Coisas

A Internet das Coisas (IoT) se torna cada vez mais popular e pode ser facilitada com a implementação das redes 5G. O IoT se refere a conexão entre máquinas sem haver um humano intermediando a comunicação, que hoje já é a maior parte do tráfego da

internet. Um exemplo é o rastreamento remoto, em que um dispositivo envia sua localização por meio da rede para outro computador que processará estes dados.

O mercado que usa esta tecnologia é crescente, com estimativas de 50 bilhões de dispositivos IoT ao redor do mundo no ano de 2020 [2]. Como característica os dispositivos móveis que fazem uso da tecnologia IoT devem ser relativamente baratos e consumir pouca energia elétrica para garantir uma longa duração da bateria.

Apesar de grande parte das aplicações IoT fazerem uso de outras tecnologias de comunicação, como o *Long Range Wide Area Network* (LoRaWAN), LTE, GPRS, entre outros, a utilização do 5G pode permitir a transferência de pacotes maiores, transmitindo à rede informações mais completas e complexas para aplicações futuras que necessitem de tal requisito.

2.2.2 – Comunicação Vehicle-to-Everything

A comunicação *Vehicle-to-everything* (V2X) é uma tecnologia na qual pacotes de informação trafegam de pedestres para veículos na estrada e finalmente à rede móvel, podendo usar o espectro não licenciado, como o WiFi para estas comunicações de pequena distância. Este conceito pode ser implementado com a tecnologia 5G, que permitirá maior capilaridade ao acesso à internet.

2.2.3 – Redes Definidas por Software

As Redes Definidas por Software (SDN) permitem criar funções centralizadas no plano de controle da rede, que permite um controle mais simples e integrado de toda a rede. Com esta centralização estas funções comunicam mais facilmente com as interfaces de aplicação de programação (API), onde servidores de terceiros autorizados podem influenciar ou controlar a operação da rede [2]. Ao se usar APIs os servidores de controle de terceiros estes computadores não têm qualquer detalhe da implementação física da rede, o que aumenta a confiança na rede, que se tornou possível na tecnologia 5G.

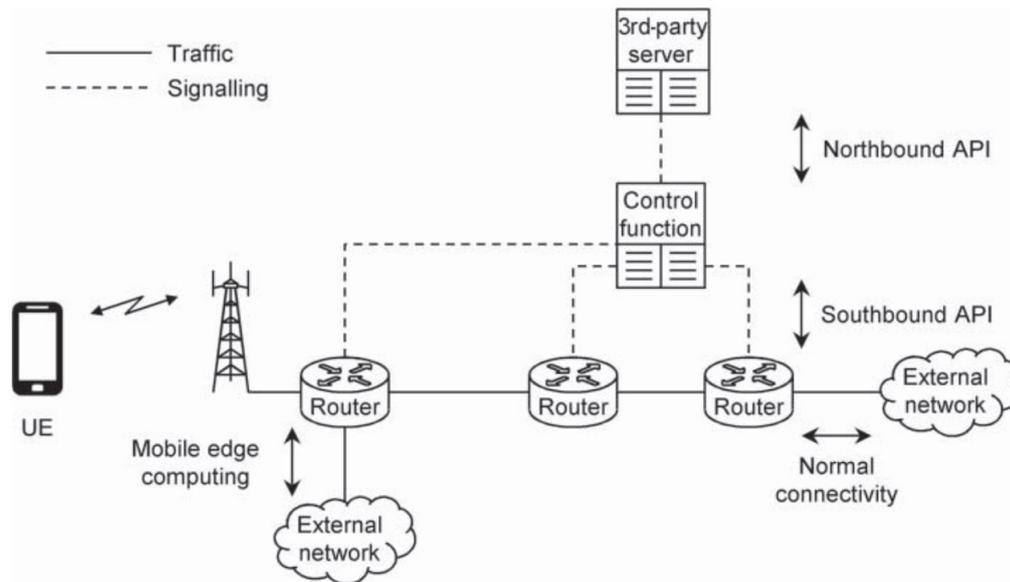


Fig. 5: Arquitetura de uma rede definida por software. **Fonte:** [2].

Na Fig. 5 vê-se um exemplo de rede definida por software, que permite a centralização da rede, controle mais simples e robusto e a capacidade de se conectar com servidores de terceiros por meio de APIs.

2.2.4 – Tecnologias para a Interface de Rádio

As tecnologias para interface de rádio 5G usam frequências maiores e largas de banda mais amplas que em tecnologias anteriores, podendo operar a 50GHz. Nestas frequências o comprimento de onda é da ordem de milímetros dando, assim, o nome de ondas milimétricas para estas ondas de rádio. Uma benesse do uso de tão alta frequência vem da possibilidade de usar larguras de banda superiores, aumentando significativamente a vazão para os usuários. Como ponto negativo este tipo de ondas atenua-se muito rapidamente e encontram dificuldade de propagação com obstáculos simples para outras frequências, como chuva, vidros etc.

Em adição, o 5G faz uso de técnicas de múltiplas antenas mais avançada em relação a geração anterior, aumentando significativamente a quantidade de estações base em todo o território onde deve se cobrir o sinal, o que aumenta a cobertura para os usuários e permite uma técnica chamada de *beamforming*, onde uma antena é controlada de maneira a permitir que a estação base consiga focar o sinal entregue ao usuário na direção que este se encontra. Isto também permite o uso de antenas *multiple-input*

multiple-output (MIMO) onde diversos usuários podem se comunicar enviando e recebendo dado ao mesmo tempo.

2.2.5 – Arquitetura do 5G

A arquitetura do 5G surge como avanço da arquitetura do LTE, adicionando componentes observados na Fig. 6, para suportar o SDN entre outras tecnologias.

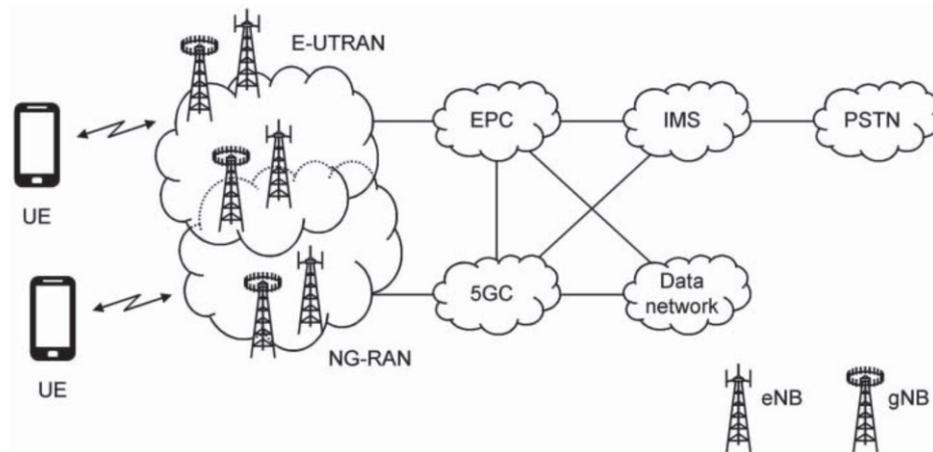


Fig. 6: Arquitetura de uma rede 5G. **Fonte:** [2].

A *next-generation radio access network* (NG-RAN) é a nova geração de acesso a rede via rádio. Uma estação base 5G é conhecida por *Next-Generation Node B* (gNB), que comunica com um usuário móvel usando o *New Radio* (NR), que permite a comunicação de múltiplas antenas em Ondas Milimétricas, esta é conectada ao núcleo 5G *system* (5GC). Já uma estação base LTE é chamada de *evolved Node B* (eNB), ligada a uma arquitetura *evolved UMTS terrestrial radio access network* (E-UTRAN) e ao núcleo *evolved packet core* (EPC). Ocorre uma interconexão ao *IP multimedia subsystem* (IMS), à rede de dados e ao PSTN. Outras arquiteturas também podem ser implementadas, de acordo com a maneira que a operadora achar necessário.

2.3 – Trabalhos Relacionados

Trabalhos similares foram implementados em todo o mundo, um exemplo é o artigo [7] que, em suma, propõe planejar uma rede de acordo com *Deep Learning*, fazendo medições do mundo real e modelando a propagação em modelos 3D de cidades. Com estas medições e previsões de propagação nestas localidades, é possível criar uma simulação mais concreta, permitindo maior assertividade nos resultados da simulação.

Mais um trabalho a se citar é o [8], que estuda localizar estações base de acordo com medidas de avanço de tempo para usuários finais, também fazendo uso deste simulador para alcançar este objetivo.

Outro trabalho a se citar é visto em [9], um *paper* a respeito de simulações 5G para a comunicação V2X, onde se defende uma comunicação entre usuários em veículos ocorrendo entre eles mesmo, tendo os usuários o trabalho de funcionar como repetidores dos sinais enviados e quando necessário fazer o uso de estações base para se conectarem à rede. Este trabalho apenas tangencia o simulador 5G de Viena, porém faz uso do simulador anterior, LTE-A de Viena, para gerar resultados levando em conta esta premissa.

Por fim, um trabalho relativamente similar a este é o observado em [10], um trabalho de conclusão de curso espanhol, a respeito de simulações para avaliar a implementação de recursos de *broadcast* de vídeo e comunicação celular em 5G. De maneira similar, o escalonador *Best Channel Quality Indicator* (BestCQI) também é avaliado nas simulações aqui representadas e comparado ao escalonador *Round Robin* (RR).

2.4 – Considerações finais relativas ao simulador

Outro conceito importante para o entendimento deste trabalho é o da modulação usada, em especial a modulação máxima permitida, que pode ser esclarecido em 2.4.1

2.4.1 - QAM (Modulação em Amplitude em Quadratura)

A Modulação em Amplitude em Quadratura é uma técnica de modulação que utiliza dois sinais em quadratura [5], ou seja, defasados em 90° , para transportar o dobro de informações com a mesma largura de banda. Em comunicações digitais, com amplitudes quantizadas é possível organizar símbolos (conjuntos de bits) em constelações como visto na Fig 7.

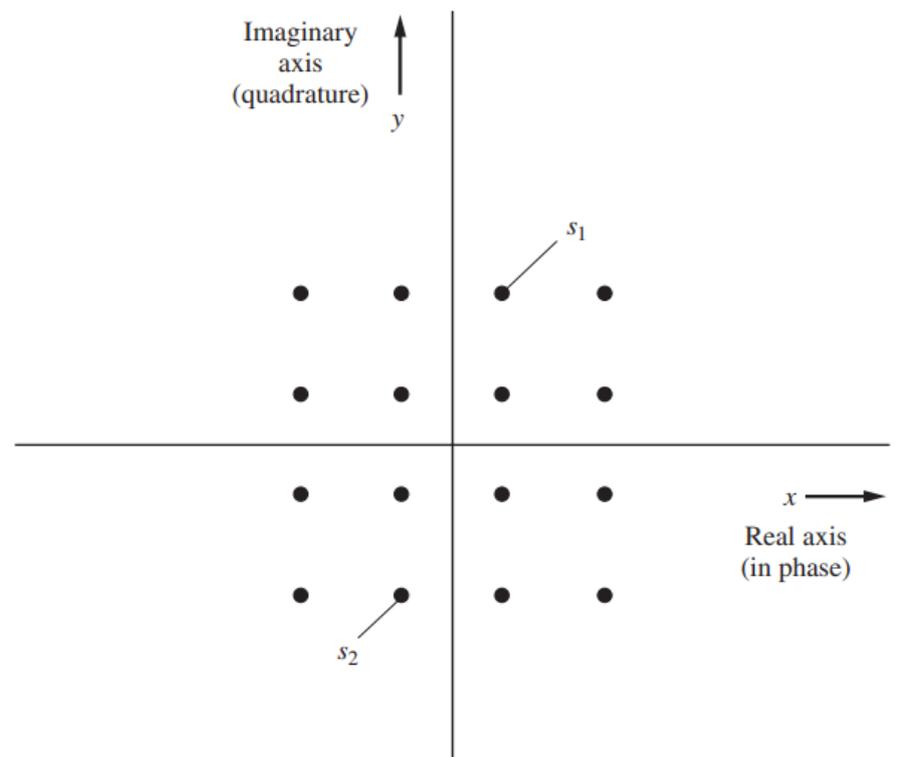


Fig. 7: Constelação de 16 símbolos QAM. **Fonte:** [5].

Nota-se na Fig. 7 a presença de 16 pontos, representando 16 símbolos possíveis para esse esquema de modulação, chamado de QAM-16, onde há a combinação de 4 valores possíveis no eixo real e 4 no eixo imaginário. Outra característica para este tipo de modulação é que o número que acompanha o QAM é sempre o quadrado da quantidade de níveis em um único eixo, um exemplo seria o QAM-1024, com 32 níveis possíveis.

2.4.2 - Feedback

Feedback é uma classe do simulador usada para que o escalonador utilizado tenha a informação das condições do canal. Algumas destas informações são o Indicador de Rank, o Indicador de Qualidade do Canal e o Indicador de Matriz de pré-codificação. Outra função desta classe é a de enviar ACKnowledged (ACK) e Non-ACKnowledged (NACK) sobre a transmissão para o escalonador [6].

2.4.3 – Round Robin

O simulador implementa apenas dois escalonadores [6], sendo eles o Round Robin e o Best CQI. O RR é um algoritmo de escalonamento para dividir cargas de trabalho concorrentes em diversas partes e coloca estas partes em ordem [13]. A primeira a ser

processada deve ser a primeira fatia do primeiro trabalho, em seguida a primeira fatia do segundo trabalho, após a primeira fatia do terceiro trabalho e assim por diante até ter sido processada a primeira fatia do último trabalho, quando o escalonador iniciará o processamento da segunda fatia do primeiro trabalho, em seguida a segunda fatia do primeiro trabalho e assim por diante até que o último pedaço seja processado.

No contexto de comunicações móveis o escalonador RR permite a criação de filas de dados a serem processados e enviados pela estação base. Desta maneira o escalonador recebe diferentes dados que concorrem pela transmissão e fatia estes dados em pedaços que são colocados em ordem para o envio, de maneira similar ao apresentado no parágrafo anterior.

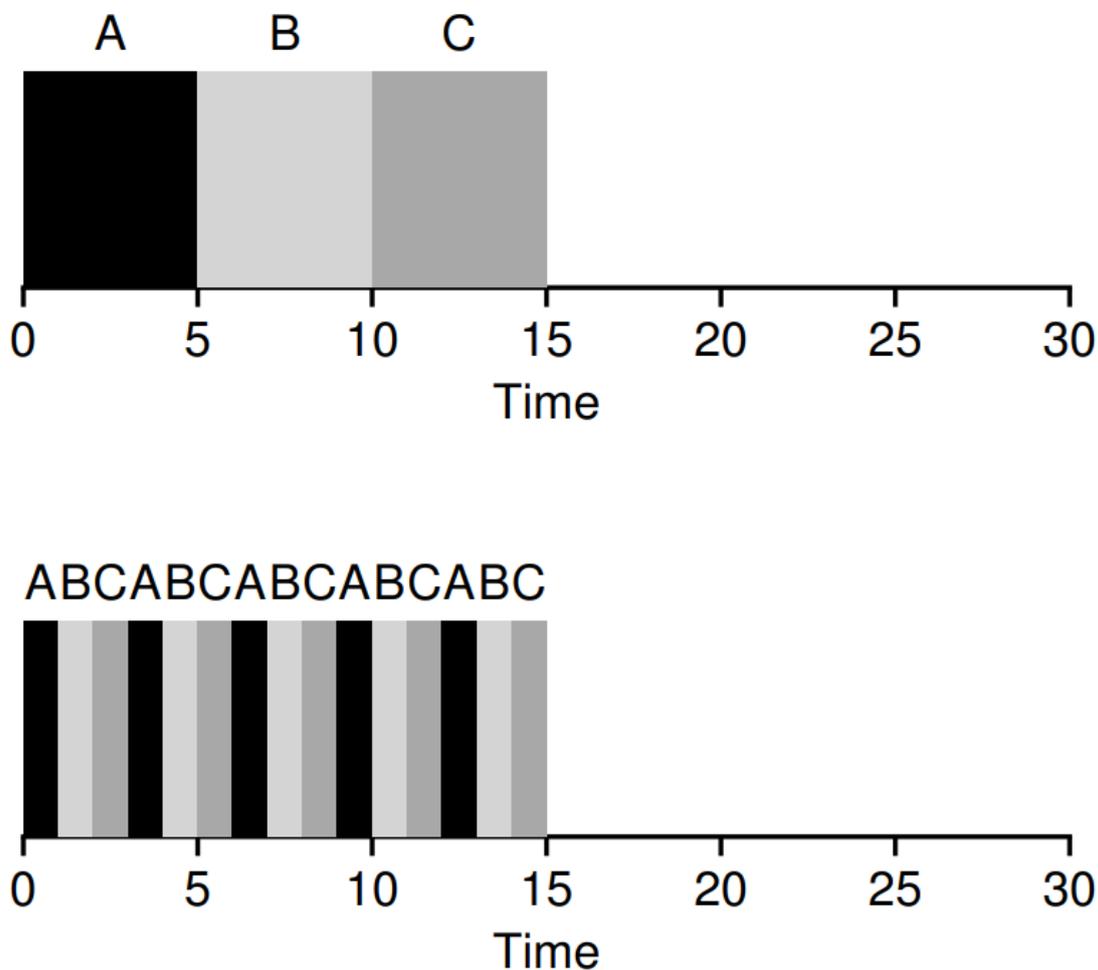


Fig. 8: Ilustração do enfileiramento dos dados sem e com o fatiamento. **Fonte:** Adaptado de [13]

Na Fig. 8 tem-se uma comparação de uma fila sem e com a técnica do fatiamento, onde é possível notar que, apesar de uma duração temporal de transmissão idêntica para

ambos os casos, os dados B e C começam ser transmitidos em 1 e 2 segundos ao invés de 5 e 10 segundos, sucessivamente. Esta técnica permite uma menor espera em fila para a transmissão, que se mostra uma técnica ainda mais vantajosa com uma quantidade maior de dados concorrentes a serem transmitidos.

2.4.4 – Best CQI

O escalonador Best CQI é definido de maneira breve pelos documentos do simulador, onde o usuário com o maior valor de Indicador de Qualidade do Canal tem alocado o bloco de recurso com informação obtida da classe feedback [6].

2.4.5 – Capacidades do simulador

O simulador em questão é muito robusto e contém diversos recursos, tornando-o um simulador ideal para os objetivos deste trabalho, visto que este é muito veloz em suas simulações, preocupa-se com um resultado preciso e acurado e é de fácil configuração. O primeiro recurso a se destacar é sua retro compatibilidade em relação ao padrão anterior de comunicações móveis, o LTE-A, embarcando o seu antecessor, o LTE-A SL Simulator.

Adiciona-se sua implementação eficiente, que visa minimizar o tempo de simulação, sendo trabalhada a redução do *overhead* de simulação. Otimizou-se também a interferência agregada, de maneira que os resultados não apresentassem erros nas bordas das regiões de interesse. Desta otimização toma-se nota da geração à priori de todas as variáveis possíveis antes do loop da simulação, de maneira que cada pedaço da simulação seja separado uma das outras, permitindo que o simulador rode estes pedaços em paralelo em um processador de múltiplos núcleos, gerando maior velocidade na simulação.

Outra característica interessante do simulador, mesmo que não utilizada neste trabalho, é a sua capacidade de receber resultados do Vienna 5G LL Simulator, o simulador dos mesmos criadores que se encarrega a simular o nível de enlace do 5G, que permite o usuário a testar como se comportaria a rede ao levar em conta diferentes esquemas de modulação ou de codificação.

Capítulo 3 -Metodologia

3.1 - Parâmetros de simulação

3.1.1 - Região de interferência:

O parâmetro da região de interferência é o responsável por definir o espaço geográfico no qual o simulador levará em conta as construções presentes naquela geolocalização de interesse. Desta maneira é possível, dentro de um volume definido no simulador, estimar as interferências e atenuações que pode haver no sinal tanto da transmissão LTE quanto da transmissão 5G.

Na sessão do código em que há esta delimitação, o usuário do simulador informa qual deve ser a extensão de abrangência nas coordenadas x, y e z. Ainda que este sistema de coordenadas não seja esférico, que seria mais fidedigno ao formato de nosso planeta, para pequenas regiões, como é o caso dessa simulação, de poucos quarteirões, a coordenada x se relaciona à longitude, a coordenada y se relaciona à latitude e a coordenada z se relaciona à altura no nível do mar. Este sistema de coordenadas portanto, utilizando para atender escalas humanas, onde a direção x é a direção Leste-Oeste, a direção y é a direção Norte-Sul e a direção z define a altura em relação ao solo.

Para todas as três regiões simuladas e as duas frequências centrais aplicadas neste trabalho os parâmetros usados foram aqueles definidos por *default* no programa original (apêndice I), conforme Tab. 1:

Região de interesse e interferência	
Extensão em x	400 m
Extensão em y	300 m
Extensão em z	50 m

Tab. 1: Região de interesse e interferência dos cenários. **Fonte:** Autor.

Pode -se observar nas linhas de código a seguir os ajustes realizados.

```
% define the region of interest and interfeernce region
params.regionOfInterest.xSpan = 400;
params.regionOfInterest.ySpan = 300;
```

```
params.regionOfInterest.zSpan = 50;
```

3.1.2 - Parâmetros de transmissão:

Os parâmetros de transmissão se encarregam de referenciar os valores de frequência central, de largura de banda e esquema de modulação máximo. A frequência central é o parâmetro que define a frequência da portadora central da transmissão de dados daquela rede móvel. A largura de banda é o parâmetro que define a largura do espectro eletromagnético que será ocupado pela transmissão de dados em relação a frequência central usada. Por fim, o esquema de modulação máximo determina qual é o esquema de modulação de maior eficiência espectral utilizada na simulação.

Os dois primeiros parâmetros citados são os escolhidos para a variação visando comparar os resultados. Desta maneira foram usadas duas frequências centrais como medida de comparação. As duas frequências centrais analisadas têm larguras de bandas associadas a elas, conforme mostrado na Tab. 2.

Considerando o “Leilão do 5G” organizado pela Anatel [3], nota-se que a operadora Algar Telecom, na região do Triângulo Mineiro, arrematou as frequências de 2,3GHz com largura de banda de 40MHz, 3,5GHz com largura de banda de 80MHz e 26GHz com 5 blocos de largura de banda de 200MHz [3]. Com isso em mente as simulações, para as três localidades, seguirão os seguintes parâmetros:

Parâmetros de transmissão		
Frequência central	Largura de banda	Esquema máximo de modulação
2,3 GHz	40 MHz	1024QAM
3,5 GHz	80 MHz	

Tab. 2: Parâmetros de transmissão dos cenários. **Fonte:** Autor.

Para as simulações com frequência central de 2,3GHz, tem-se as seguintes linhas de código:

```
% transmission parameters
params.carrierDL.centerFrequencyGHz = 2.3; %2.3GHz
params.transmissionParameters.DL.bandwidthHz = 40e6; %40MHz
params.transmissionParameters.DL.cqiParameterType =
parameters.setting.CqiParameterType.Cqi1024QAM;
```

Em contrapartida, para as simulações com frequência central de 3,5GHz, tem-se as seguintes linhas de código:

```
% transmission parameters
params.carrierDL.centerFrequencyGHz = 3.5; %3.5GHz
params.transmissionParameters.DL.bandwidthHz = 80e6; %80MHz
params.transmissionParameters.DL.cqiParameterType =
parameters.setting.CqiParameterType.Cqi1024QAM;
```

Por fim pontua-se que o esquema máximo de modulação usado foi o de 1024QAM.

3.1.3 - Geolocalização do mapa:

O simulador utilizado nesse trabalho permite realizar a simulação levando em conta uma localização geográfica real, com o auxílio do site OpenStreetMap, que é capaz de reconhecer construções e mostrá-las no mapa, auxiliando no cálculo das interferências e atenuações.

Os locais escolhidos para as simulações seguiram a lógica de comparar um local com grande densidade de edifícios, um local com menor densidade de edifícios e outro com menos obstáculos, como um parque, cujas localidades são mostradas na Tab. 3.

	Latitude	Longitude
Universidade Técnica de Viena	48,19645875°	16,37041°
Campus Santa Mônica	-18,91843505°	-48,2574°
Parque Tecnológico de Uberaba	-19,71742295°	-47,9601°

Tab. 3: Latitudes e Longitudes dos três cenários escolhidos. **Fonte:** Autor.

A primeira localização escolhida, com grande densidade de edifícios, manteve a localização geográfica da configuração original do simulador, sendo ela uma fração da Universidade Técnica de Viena, na Áustria, de onde surgiu o simulador utilizado neste trabalho, o Vienna 5G System Level Simulator [6]. As limitações geográficas da localização são apresentadas na Tab. 4 e ilustradas nas Fig. 9 e 10.

	Limites geográficos (Viena)	
	Inferior	Superior
Latitude	48,19559°	48,19733°
Longitude	16,36902°	16,37181°

Tab. 4: Limitações de latitudes e longitudes do cenário Viena. **Fonte:** Autor.

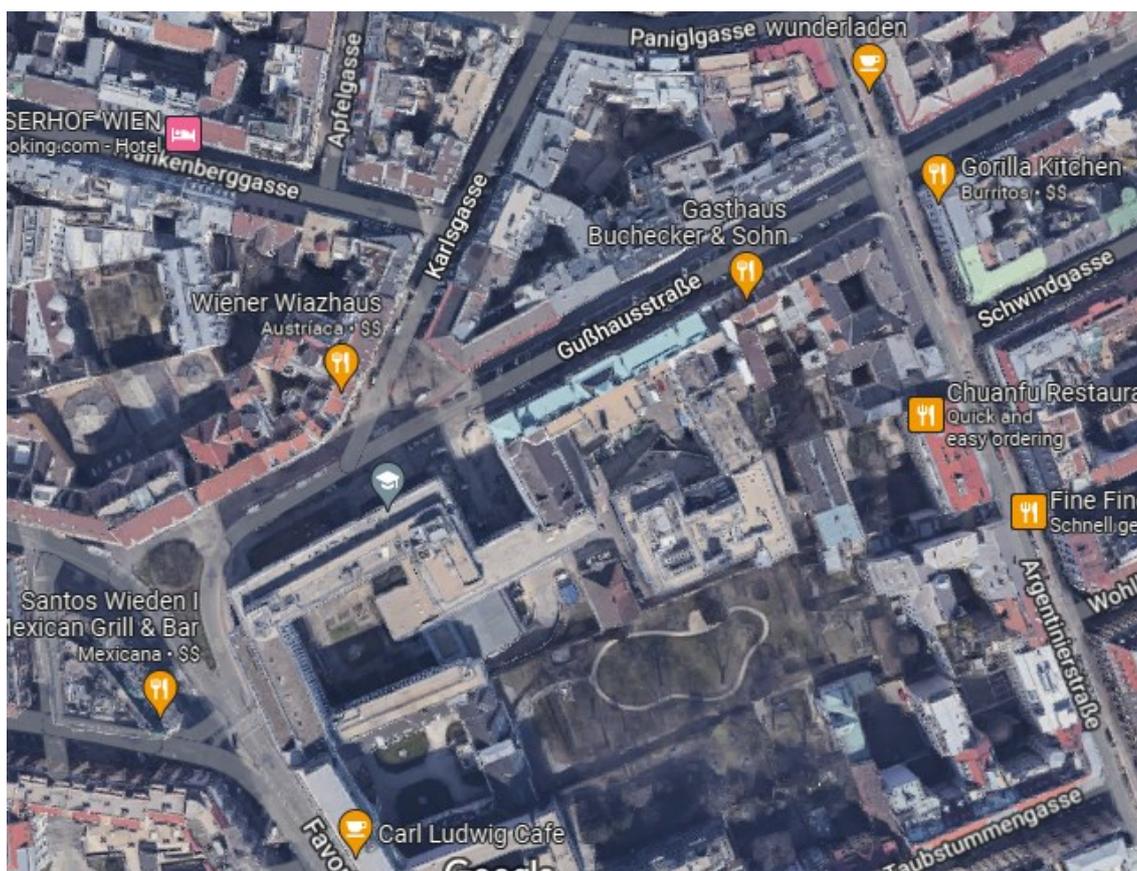


Fig. 9: Parte da Universidade Técnica de Viena, região central e altamente urbanizada da capital austríaca. **Fonte:** Google Maps.

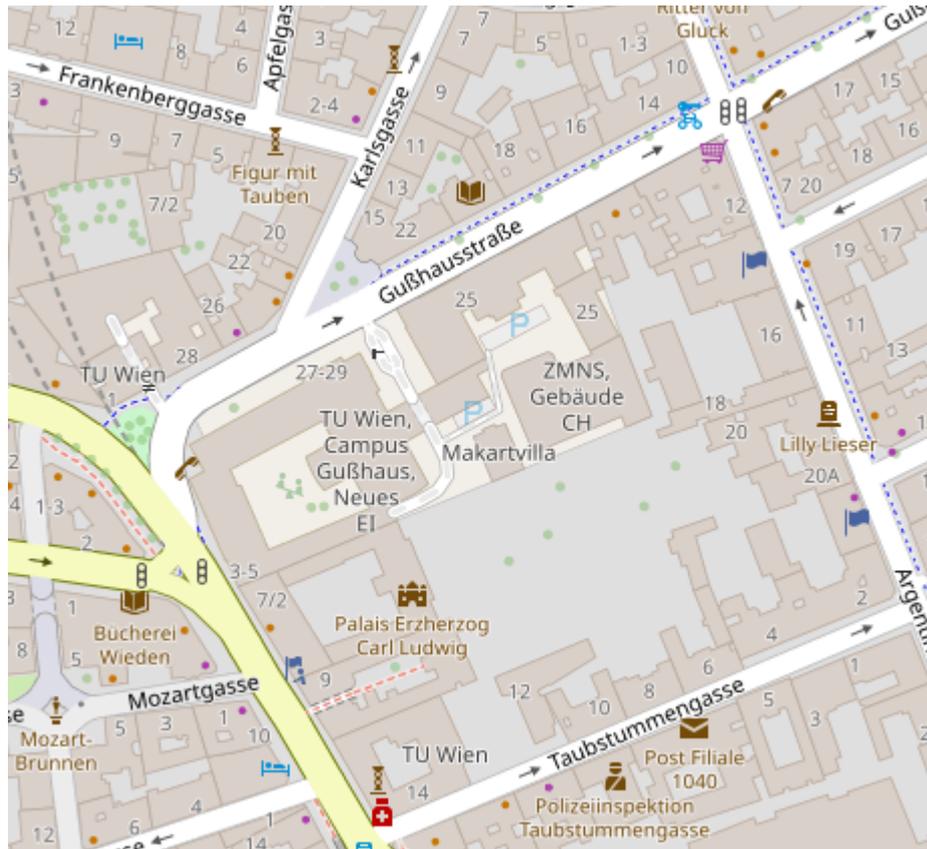


Fig. 10: Vista desta mesma região no OpenStreetMap. **Fonte:** OpenStreetMap.

A segunda localização escolhida, com menor densidade de edifícios, foi uma fração do Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, em torno do Centro de Convivência, uma região movimentada do Campus. As limitações geográficas da localização são apresentadas na Tab. 5 e ilustradas nas Fig. 11 e 12.

Limites geográficos (Santa Mônica)		
	Inferior	Superior
Latitude	-18,9193°	-18,9176°
Longitude	-48,2588°	-48,256°

Tab. 5: Limitações de latitudes e longitudes do cenário Santa Mônica. **Fonte:** Autor.

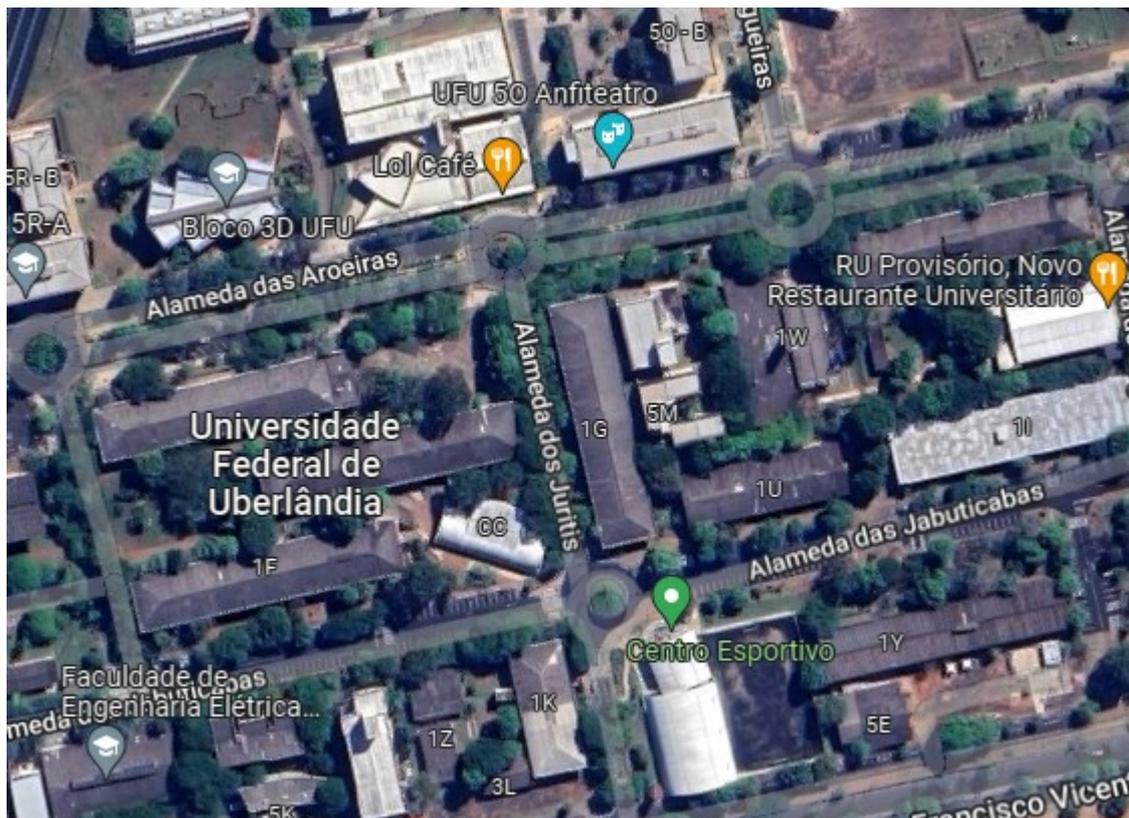


Fig. 11: Parte do Campus Santa Mônica, munida de construções, mas também arborizada. **Fonte:** Google Maps.



Fig. 12: Vista desta fração do Campus no OpenStreetMap. **Fonte:** OpenStreetMap.

A terceira e última localização escolhida foi de um parque municipal de Uberaba, Minas Gerais, chamado Parque das Barrigudas, juntamente com a Unidade 1 do Campus

da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, onde abriga laboratórios do Instituto de Ciências Tecnológicas e Exatas. As limitações geográficas da localização são apresentadas na Tab. 6 e ilustradas nas Fig. 13 e 14.

	Limites geográficos (parque)	
	Inferior	Superior
Latitude	-19,7183°	-19,7166°
Longitude	-47,9615°	-47,9587°

Tab. 6: Limitações de latitudes e longitudes do cenário parque. **Fonte:** Autor.



Fig. 13: Parque das Barrigudas e laboratórios da UFTM. **Fonte:** Google Maps.

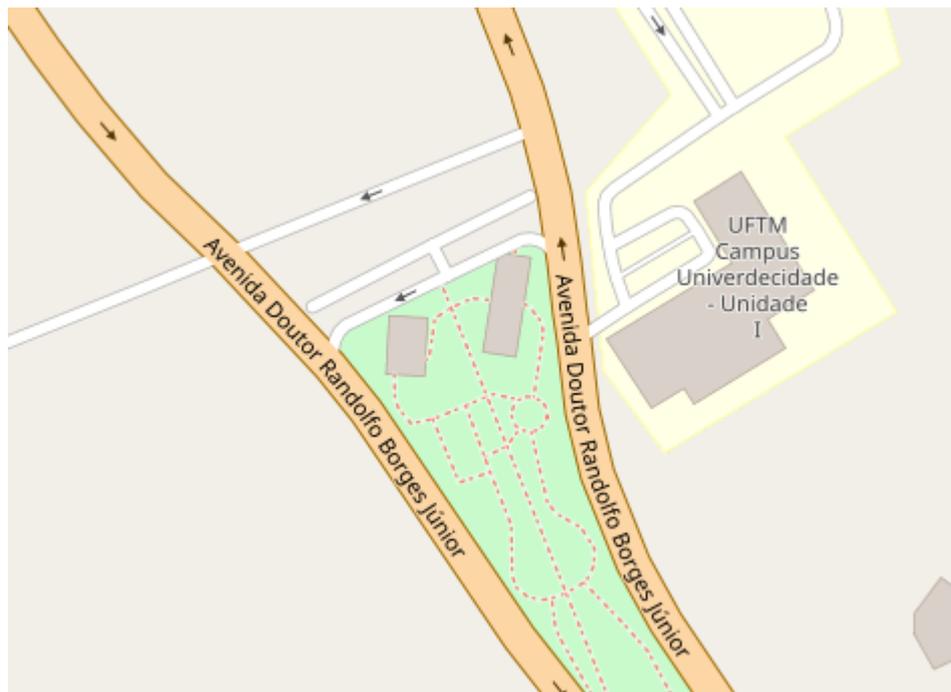


Fig. 14: Vista do parque e dos laboratórios no OpenStreetMap. **Fonte:** OpenStreetMap.

3.1.4 – Medidas de desempenho

Vazão

Vazão é um parâmetro nas telecomunicações que indica a quantidade de dados que um usuário consegue transmitir ou receber por segundo. Costumeiramente a Vazão é um parâmetro que é medido em bits por segundo, quantificando a capacidade de um usuário de fazer uma troca de bits com outro equipamento da rede em uma unidade de tempo. Geralmente esse valor é acompanhado por prefixos como kilo, Mega ou Giga.

Latência

Latência é um fenômeno que identifica o tempo levado para que alguma informação vá de um ponto a outro da rede, sendo quantificado em segundos e geralmente munido do prefixo milli. Atrasos que ocorrem em uma rede, são quantificados pela latência. Um exemplo é o atraso de processamento, devido ao tempo necessário para analisar cabeçalhos e dar a rota para um pacote, outro exemplo é o atraso de fila que ocorre quando outros pacotes já estão no aguardo para irem ao próximo ponto da rede, há também o atraso de transmissão que é devido ao tempo de transmissão de um pacote por conta da vazão de um enlace, há por fim o atraso de propagação que é responsável pelo

tempo em que um pacote trafega em um enlace por conta da velocidade de propagação daquele meio [7].

SINR (Razão Sinal-Interferência)

SINR é uma ferramenta matemática para a medição da relação entre a potência de um sinal desejado e um sinal não desejado que reside na mesma banda. Este sinal indesejado causa a interferência co-canal, proveniente de células vizinhas [12]. Esta relação pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\frac{S}{I} = \frac{S}{\sum_{i=1}^{i_0} I_i}$$

S é a potência do sinal desejada, I_i representa a potência de interferência da célula i -ésima de co-canal. A razão Sinal-Interferência é representada por S/I.

BLER (Razão erro de bloco)

BLER é a razão entre blocos transmitidos de forma incorreta em relação à quantidade de blocos transmitidos. Um bloco transmitido de forma incorreta, um bloco errôneo, é definido como um bloco de transporte no qual o *Cyclic Redundancy Check* (CRC) está errado [11].

3.1.5 – Considerações finais

Limitações físicas e parâmetros das construções:

Apesar do uso dos mapas do OpenStreetMap nos permitir a visualização de construções, ele não consegue estimar a altura de cada uma delas. Para isso o simulador utiliza uma técnica de criar alturas de construções aleatórias que são amostradas de uma distribuição uniforme ligada aos valores de altura máximo e mínimo das construções. Estas alturas foram mantidas em seus valores originais, sendo eles:

- Altura máxima das construções de 25 m;
- Altura mínima das construções de 10 m.

Outro parâmetro que permaneceu inalterado foi o da atenuação do sinal que passa por paredes, que se totaliza 10dB por parede, conforme Tab. 7:

Limitações físicas e parâmetros das construções	
Altura máxima das construções	25 m
Altura mínima das construções	10 m
Perda do sinal ao atravessar parede	10 dB

Tab. 7: Limitações e parâmetros das construções nos cenários. **Fonte:** Autor.

Parâmetros das estações bases LTE:

Os parâmetros das estações base LTE são definidos brevemente no simulador. Ambas as estações base fazem uso de 3 setores.

Parâmetros das estações bases 5G:

De maneira similar, as estações base 5G também fazem o uso de 3 setores para servir seus usuários, conforme Tab. 8.

Quantidade de setores por estação base	
Estações LTE	3 setores
Estações 5G	3 setores

Tab. 8: Quantidade de setores das estações base. **Fonte:** Autor.

Posicionamento das estações base:

Assim como ocorreu nos limites de interferência, o posicionamento das estações base também fazem uso das coordenadas $[x; y]$, admitindo valores negativos para x no sentido Oeste e positivos no sentido Leste e com valores negativos para y no sentido Sul e positivos no sentido Norte, conforme Tab. 9.

	Localização das estações base	
	Na direção x [m]	Na direção y [m]
Estação 1	-139,815	-18,1125
Estação 2	70	92,355

Tab. 9: Localização das estações base nos cenários. **Fonte:** Autor.

Novamente manteve-se as posições *Default* das estações bases em relação ao centro, nos três mapas, para manter uma comparação mais fiel possível, sem enviesar alguma das simulações.

Este ajuste pode ser observado nas linhas de código seguintes.

```
% First Base Station
BS1 = parameters.basestation.PredefinedPositions;
BS1.positions = [-139.815; -18.1125]; % [x;y] coordinate in the OSM
city
```

Novamente, pode-se observar isto nas linhas de código a seguir

```
% Second Base Station
BS2 = parameters.basestation.PredefinedPositions;
BS2.positions = [70; 92.355]; % [x;y] coordinate in the OSM city
```

Quantidade de usuários:

A quantidade de usuários em todas as simulações é fixa, com 50 usuários usando LTE e outros 50 usuários usando o 5G, totalizando 100 usuários em cada cenário, conforme Tab. 10.

	Nº de usuários
Usuários LTE	50
Usuários 5G	50
Total	100

Tab. 10: Quantidade de usuários nos cenários. **Fonte:** Autor.

Por fim observa-se um viés de isonomia nesta pesquisa, uma vez que todos os parâmetros são definidos sem a finalidade de prejudicar ou ajudar um certo cenário. Pontua-se, por exemplo, a região de interferência, que é igual para as três localidades, bem como os parâmetros de transmissão, os parâmetros das construções e a quantidade de usuários.

Capítulo 4 - Resultados e Discussão

Ao realizar as simulações obtêm-se gráficos com resultados diversos sendo eles o mapa da região simulada, latência, vazão por usuário, entre outros. Ao longo do início deste Capítulo é possível notar estes resultados para os parâmetros que foram escolhidos. Como foram usadas três localidades e duas frequências, gráficos que forem similares serão mostrados apenas uma única vez, como é o caso do mapa do Cenário Viena que apenas muda as posições dos usuários. Isto se deve pelo fato de abreviar e de que esta seção servirá apenas para ilustrar os resultados obtidos pelas simulações únicas dos cenários a serem estudados.

Viena 2.3GHz:

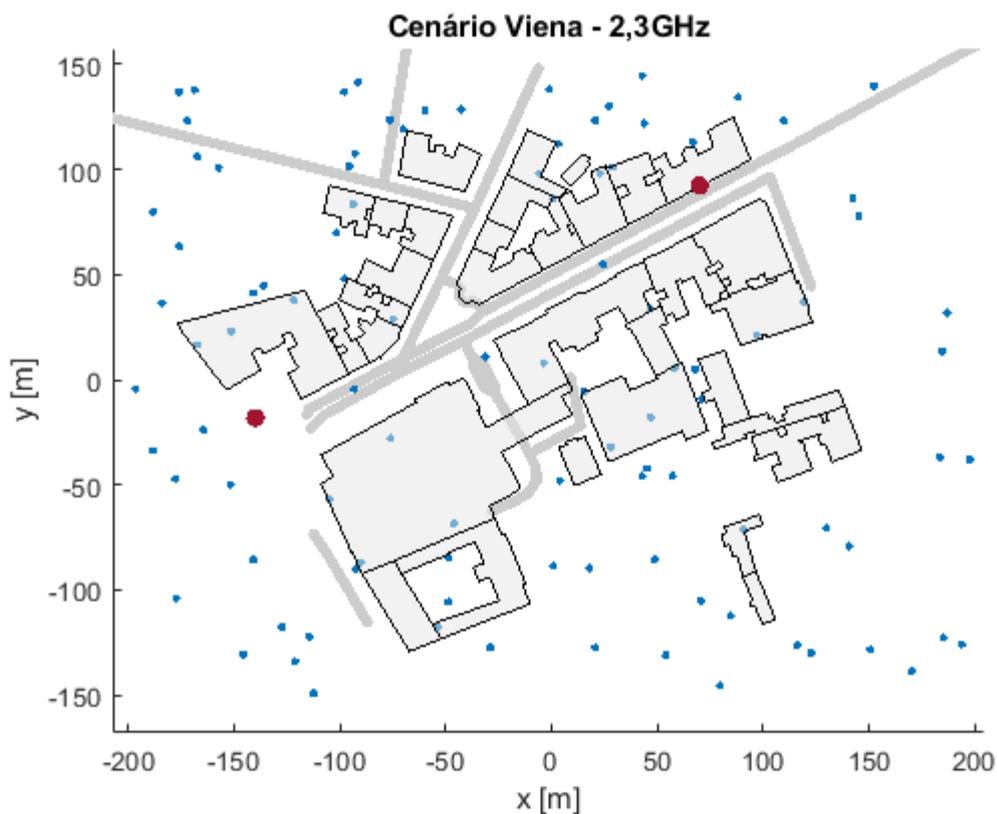


Fig. 15: Vista da Universidade Técnica de Viena no simulador para a frequência 2,3GHz. Os pontos azuis representam os usuários e os pontos vermelhos as estações bases. **Fonte:** Autor.

Na Fig. 15 temos a vista superior da Universidade Técnica de Viena proveniente do simulador, que faz uso do site OpenStreetMap, apresentando as construções e ruas da localidade. Nota-se também pontos coloridos neste mapa que, em vermelho, simbolizam

as estações base utilizadas provenientes dos sinais LTE e 5G recebidos pelos usuários e em azul há os 100 usuários distribuídos na região de interesse da simulação.

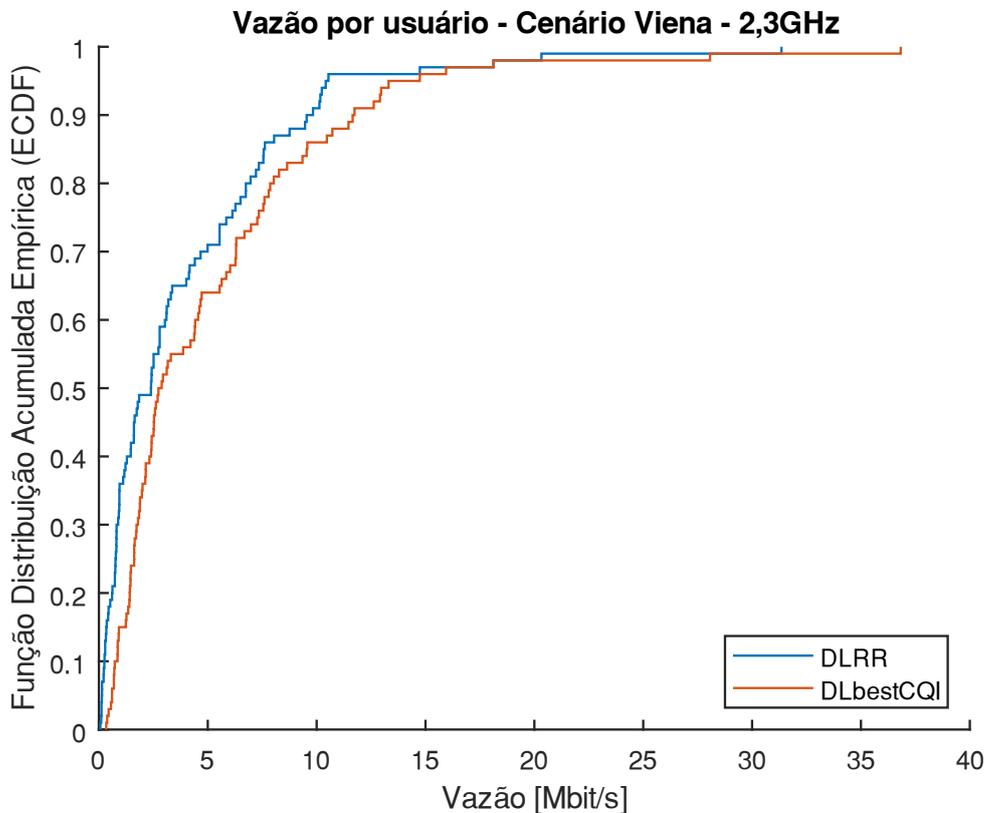


Fig. 16: Função densidade de probabilidade cumulativa empírica de vazão por usuário em Viena para 2,3GHz. **Fonte:** Autor.

O primeiro gráfico apresentado na simulação é ilustrado na Fig. 16, que apresenta uma função densidade de probabilidade cumulativa que é obtida de maneira empírica, ou seja, ao se registrar os valores resultam da simulação. Esta figura indica a vazão em Megabits por segundo (Mbit/s) em relação à distribuição dos usuários.

Este gráfico também fornece uma comparação entre os dois escalonadores que são comparados por padrão pelo simulador, como é o caso o escalonador Round Robin e o escalonador Best CQI, ambos comparados apenas em suas vazões de Downlink (DL), ou seja, a vazão no sentido estação base para usuário.

Cinco gráficos adicionais similares foram criados, um para esta localidade na frequência 3,5 GHz, dois para o Cenário Santa Mônica, um em 2,3 GHz outro em 3,5 GHz e, por fim, mais dois para o Cenário Parque, um e 2,3 GHz e outro em 3,5GHz.

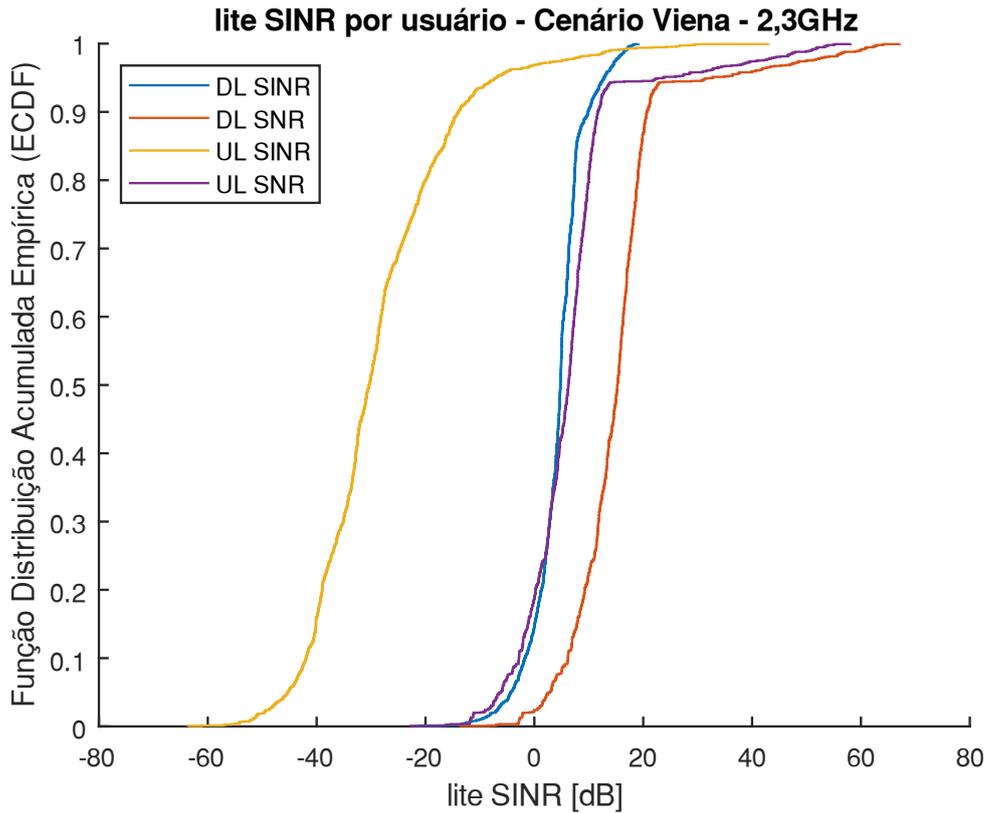


Fig. 17: Função densidade de probabilidade cumulativa empírica de SINR e SNR por usuário em Viena para 2,3GHz para upload e download. **Fonte:** Autor.

O gráfico gerado em seguida é ilustrado pela Fig. 17, que apresenta quatro funções densidade de probabilidade cumulativa que também foram adquiridos de maneira empírica, uma curva representando a Razão Sinal-Interferência (SINR) para DL, uma segunda curva para a Razão Sinal-Ruído (SNR) para DL, uma terceira curva para SINR para Uplink (UL) e uma última curva para SNR para UL, que representa o sentido usuário para estação base.

Estes valores de SINR e SNR são dados em decibéis (dB) no eixo x. De maneira similar à Fig. 16 temos cinco gráficos adicionais, levando em conta as duas frequências estudadas e as três localidades escolhidas.

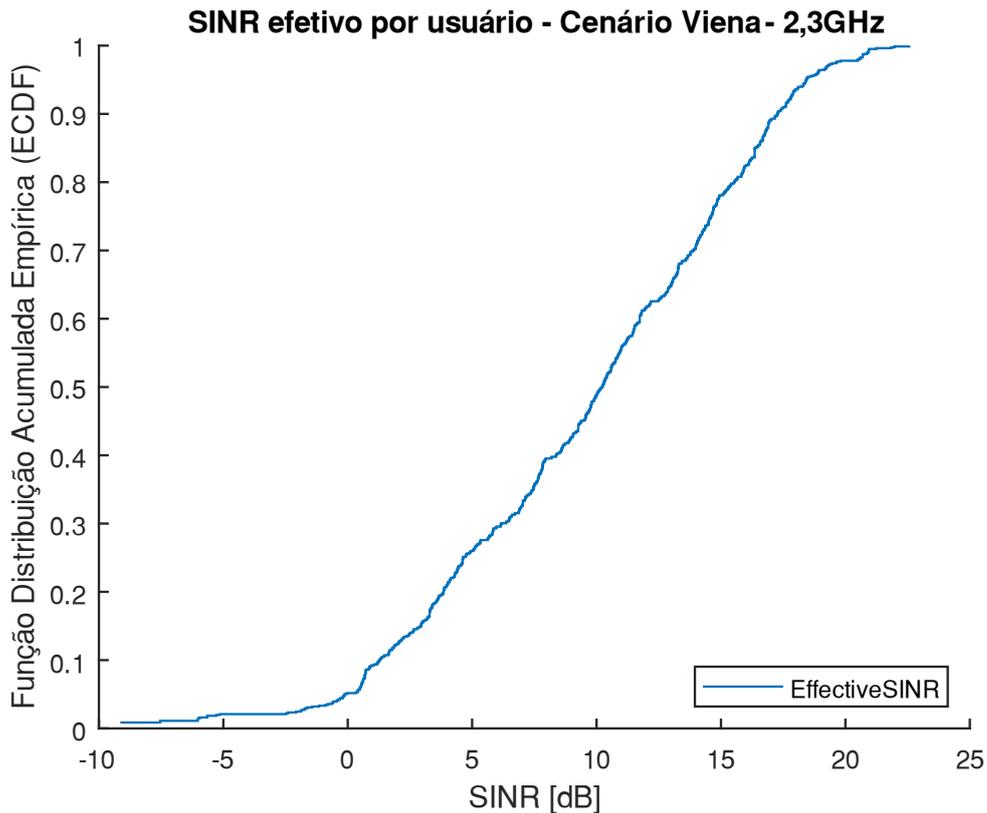


Fig. 18: Função densidade de probabilidade cumulativa empírica de SINR efetivo por usuário em Viena para 2,3GHz. **Fonte:** Autor.

Este gráfico da Fig. 18, o terceiro da lista, apresenta os valores SINR efetivos em uma função densidade de probabilidade cumulativa empírica, levando em conta o Cenário Viena em 2,3 GHz. Apesar de representar os resultados de um parâmetro apresentado na Fig. 17, o SINR efetivo não é calculado em conjunto com o SINR anterior, visto que esse dá um resultado mais robusto em troca de um maior custo computacional.

SINR efetivo também foi apresentado graficamente no simulador para as três localidades e as duas frequências e serão comparadas graficamente e em tabelas mais em diante neste capítulo.

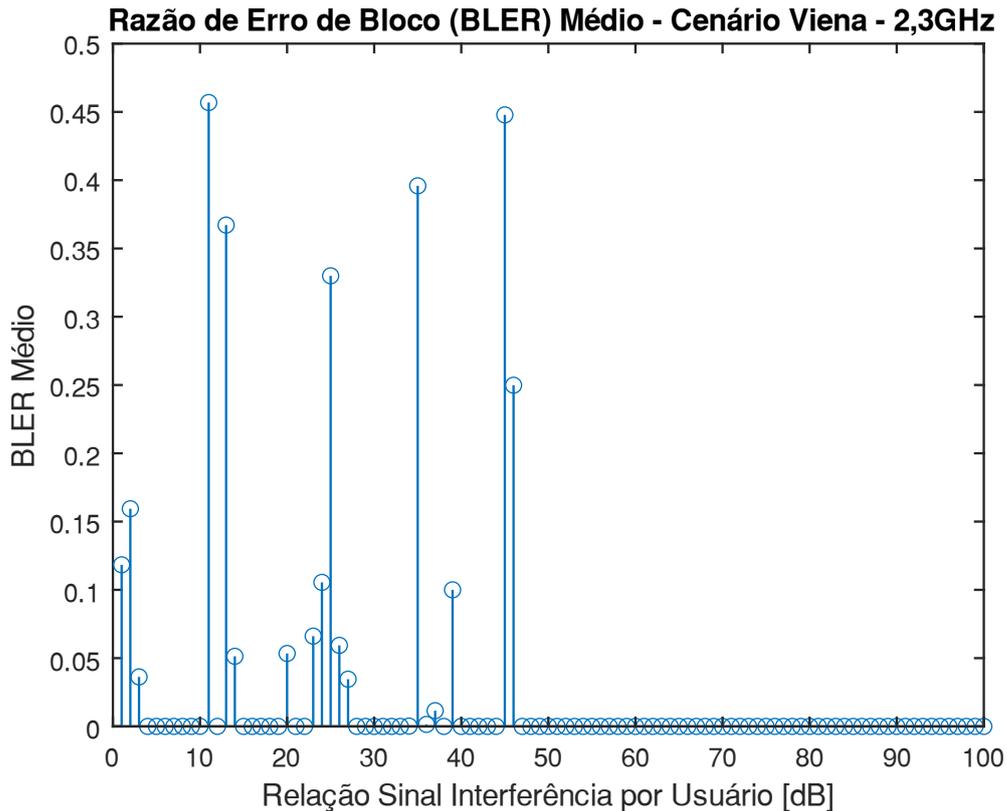


Fig. 19: Relação BLER médio por Usuário em Viena em 2.3GHz. **Fonte:** Autor.

A Razão de Erro de Bloco (BLER) é uma questão a parte, visto que o gráfico gerado, como ilustra a Fig. 19, fica muito confuso quando é comparado a outro, já que há muitos pontos que são muito próximos somente em um gráfico, assim se tornando deverasmente poluído ao se plotar duas ou mais figuras dessas juntas.

Ainda assim nota-se um platô de erro médio 0 para valores de BLER superiores a 47, platô este que também é observado para os outros senários e noutra frequência. Há também algumas ocorrências de nula BLER para SINR inferiores, onde um fator importante pode ser a presença de obstáculos gerando interferência construtiva do sinal interferente ou destes obstáculos estarem atenuando o sinal desejado.

Adiciona-se que gráficos de BLER também foram gerados para os Cenários Viena, Santa Mônica e Parque tanto na frequência de 2,3 GHz quanto para a frequência de 3,5 GHz.

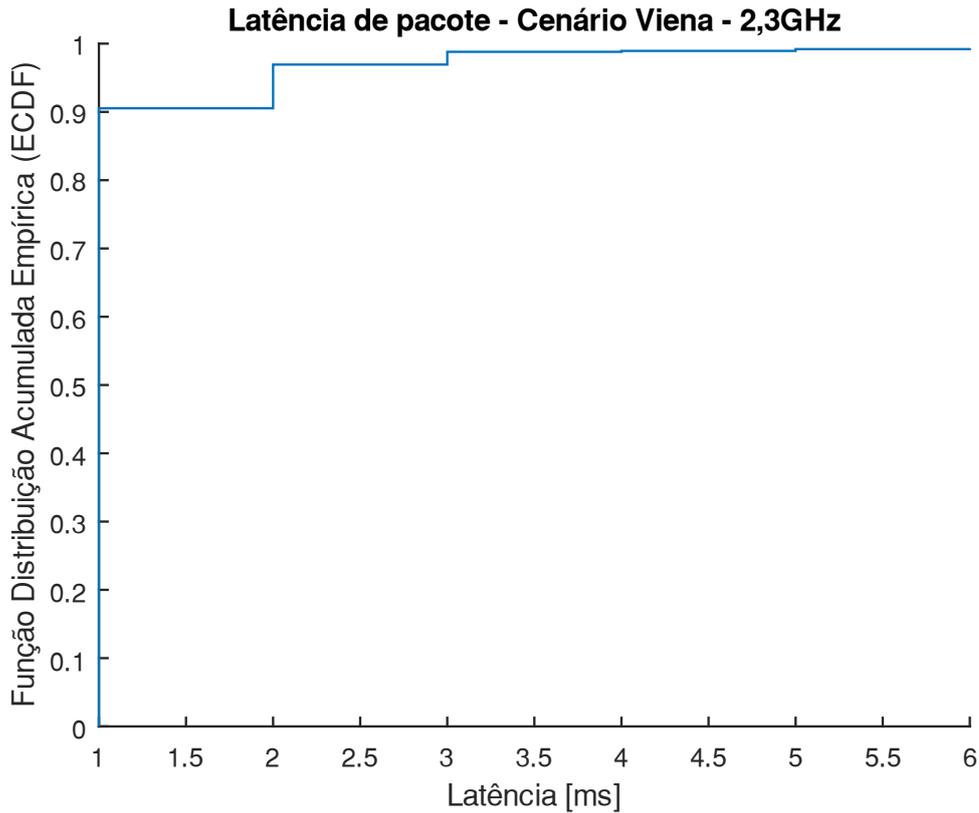


Fig. 20: Função densidade cumulativa empírica de latência dos pacotes em Viena em 2.3GHz. **Fonte:** Autor.

Um dos parâmetros mais aguardados do simulador é a latência. Este simulador apresenta um gráfico com uma função densidade cumulativa empírica para este parâmetro expresso em milissegundos. Como se espera este gráfico, ilustrado na Fig. 20 também é apresentado para a frequência de 3,5 GHz e para os Cenários Santa Mônica e Parque, nos permitindo comparar como a latência de pacote se comporta tanto para diferentes frequências e localidades.

Campus Santa Mônica 2.3GHz:

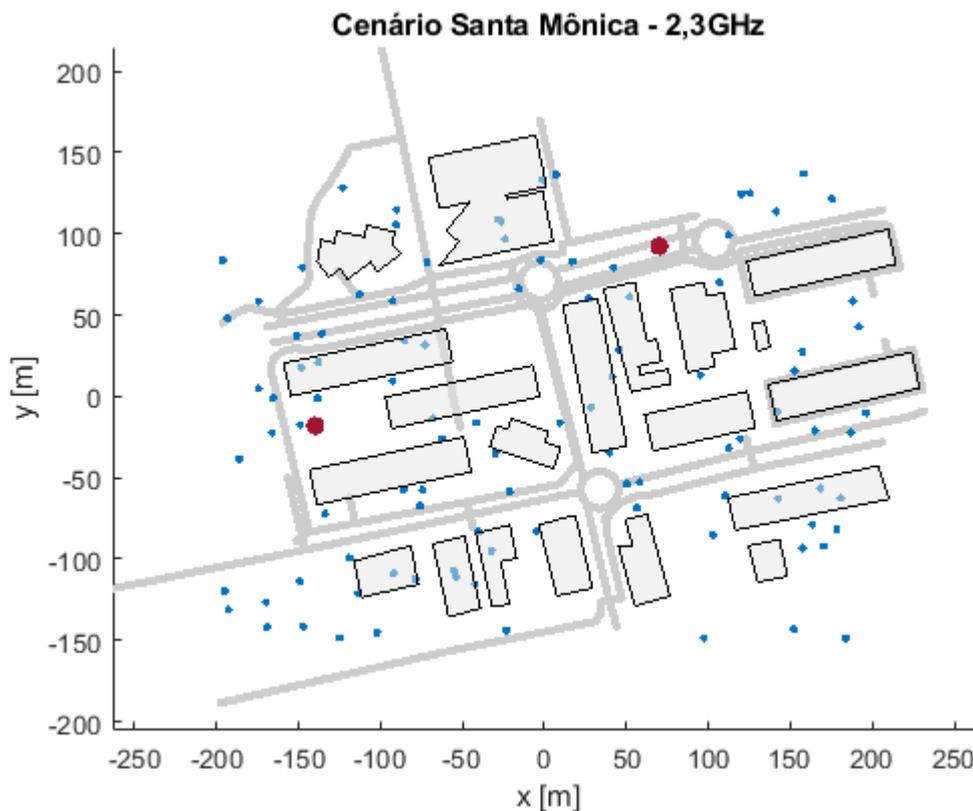


Fig. 21: Vista do Campus Santa Mônica no simulador para a frequência de 2,3GHz. Os pontos azuis representam os usuários e os pontos vermelhos as estações bases. **Fonte:** Autor.

Ao criar uma nova simulação, mudando a localização e mantendo a frequência é criada mais uma série de figuras como as que foram apresentadas anteriormente. Aquela que mais chama atenção é o novo mapa, agora na localidade do Campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia, como observado na Fig. 21.

Nota-se que há uma mesma área de interferência, mesma quantidade de usuários e a mesma distância do centro desta área de interferência quando comparada com o mapa anterior, para que seja gerada uma comparação mais adequada entre estes cenários.

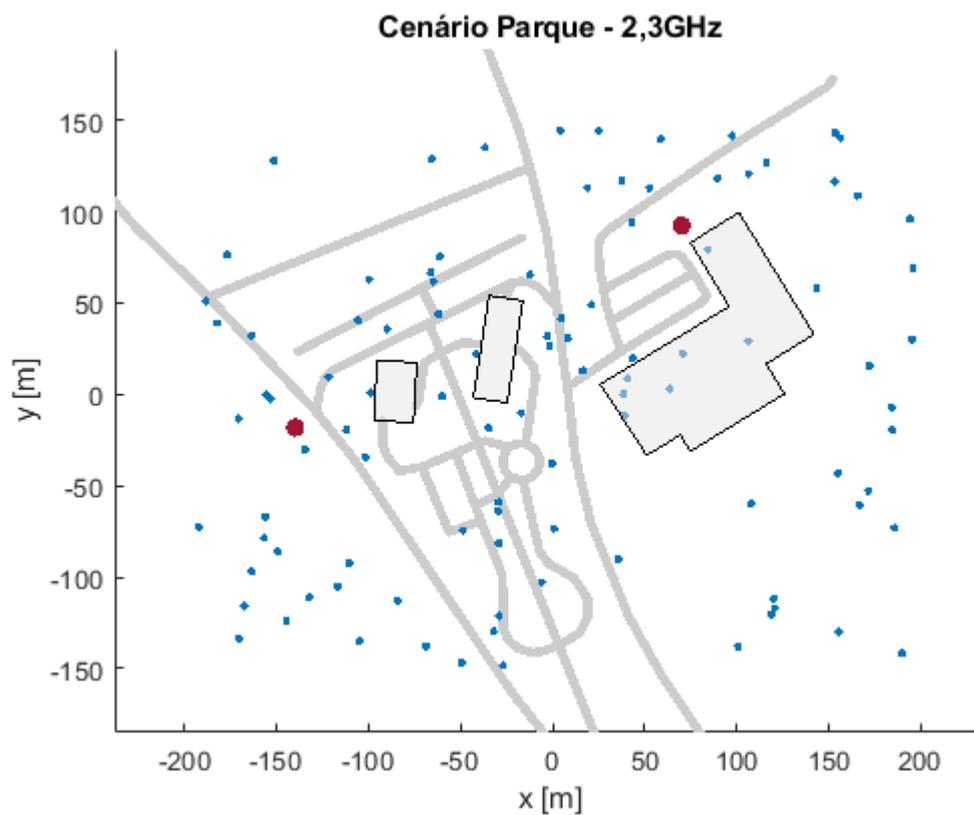
Parque 2.3GHz:

Fig. 22: Vista do parque no simulador para a frequência de 2,3GHz. Os pontos azuis representam os usuários e os pontos vermelhos as estações bases. **Fonte:** Autor.

Com a mesma finalidade anterior, este cenário menos urbanizado, da Fig. 22, com menor quantidade de construções também tem os mesmos quesitos que nas figuras dos mapas apresentados, sendo eles a mesma área de interferência, mesma distância ao centro desta área e quantidade de usuários.

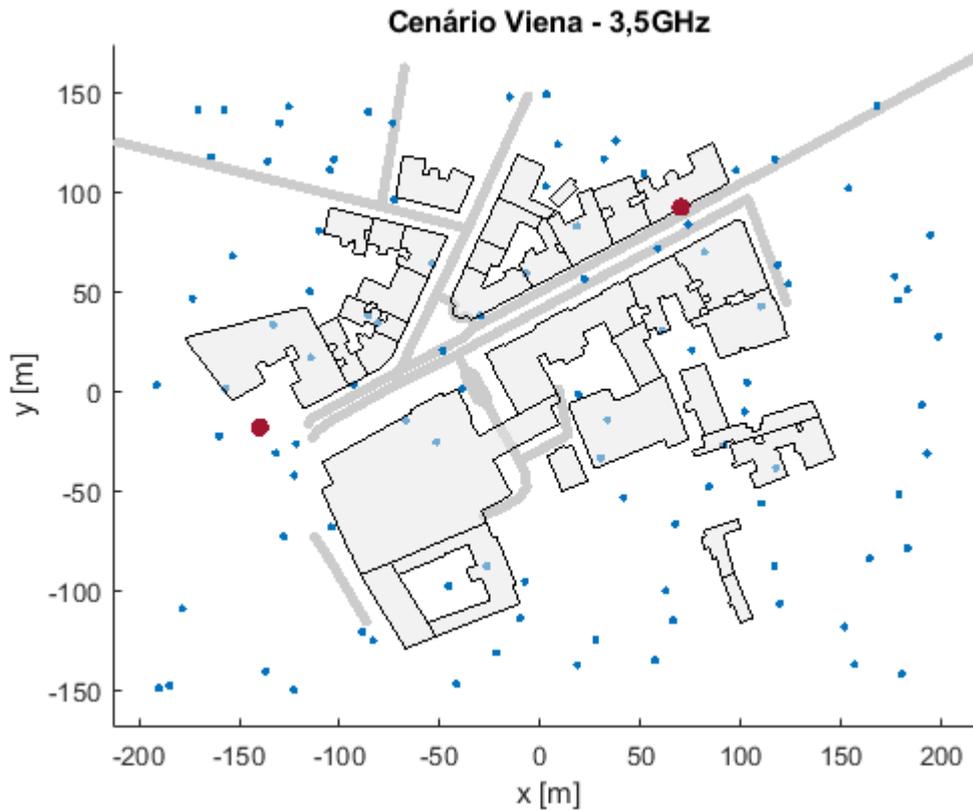
Viena 3.5GHz:

Fig. 23: Vista da Universidade Técnica de Viena no simulador para 3,5GHz. Os pontos azuis representam os usuários e os pontos vermelhos as estações bases. **Fonte:** Autor.

Como foi apresentado no início do capítulo, os mapas são similares, mas não idênticos, como observamos na Fig. 23, onde as estações base estão localizadas nas mesmas localidades, porém a disposição dos usuários é diferente da Fig. 15, já que o simulador executou o programa novamente e com isso a localização dos usuários foi alterada.

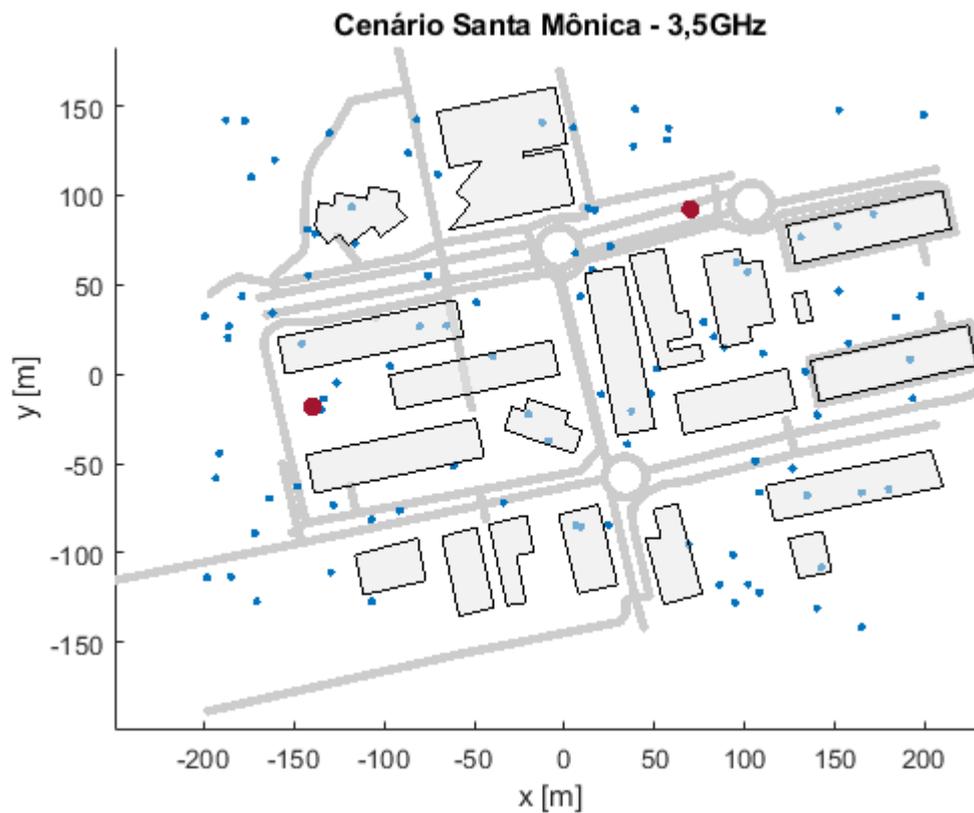
Campus Santa Mônica 3.5GHz:

Fig. 24: Vista do Campus Santa Mônica no simulador para a frequência de 3,5GHz. Os pontos azuis representam os usuários e os pontos vermelhos as estações bases. **Fonte:** Autor.

Mais uma vez é possível comparar as figuras de mesmo cenário em diferentes frequências, como na Fig. 24 e Fig. 21, onde as posições das estações base são inalteradas, há também a mesma área de interferência e mesma quantidade de usuários que estão dispostos em posições diferentes, já que a Fig. 36 resulta de uma nova simulação.

Parque 3.5GHz:

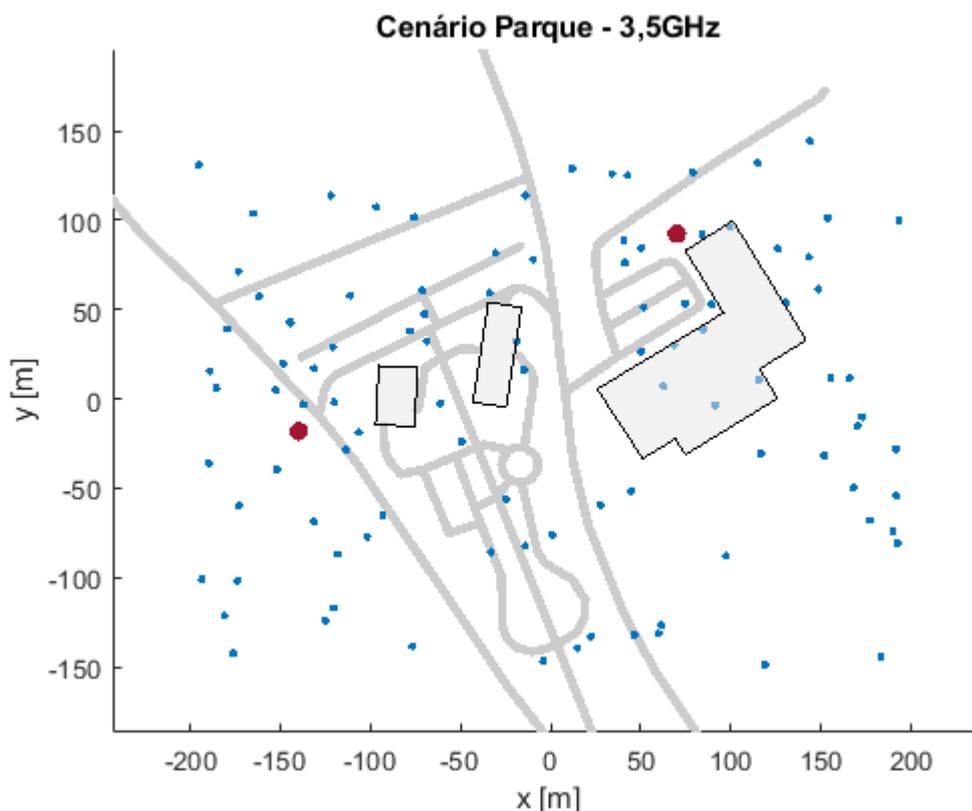


Fig. 25: Vista do parque no simulador para a frequência de 3,5GHz. Os pontos azuis representam os usuários e os pontos vermelhos as estações bases. **Fonte:** Autor.

Por fim o último mapa apresentado é o da Fig. 25, que apresenta o Cenário Parque para a frequência de 3,5 GHz. Seguindo a mesma métrica dos mapas anteriores, o mapa é muito similar ao de mesmo cenário na frequência 2,3 GHz, com diferente posição de usuários, que se torna evidente pelos usuários que estão no interior das construções.

Comparação dos resultados para as duas frequências:

Após obter os resultados das simulações que apresentam as Fig. 15 a Fig. 25, podemos fazer a comparação entre as duas frequências de mesmo cenário. Outra possibilidade é de comparar diferentes cenários na mesma frequência. Estas comparações são feitas nesta seção, juntando os gráficos para efeito de comparação e criando tabelas para melhor visualização.

Vazão por usuário no cenário Viena (bestCQI):

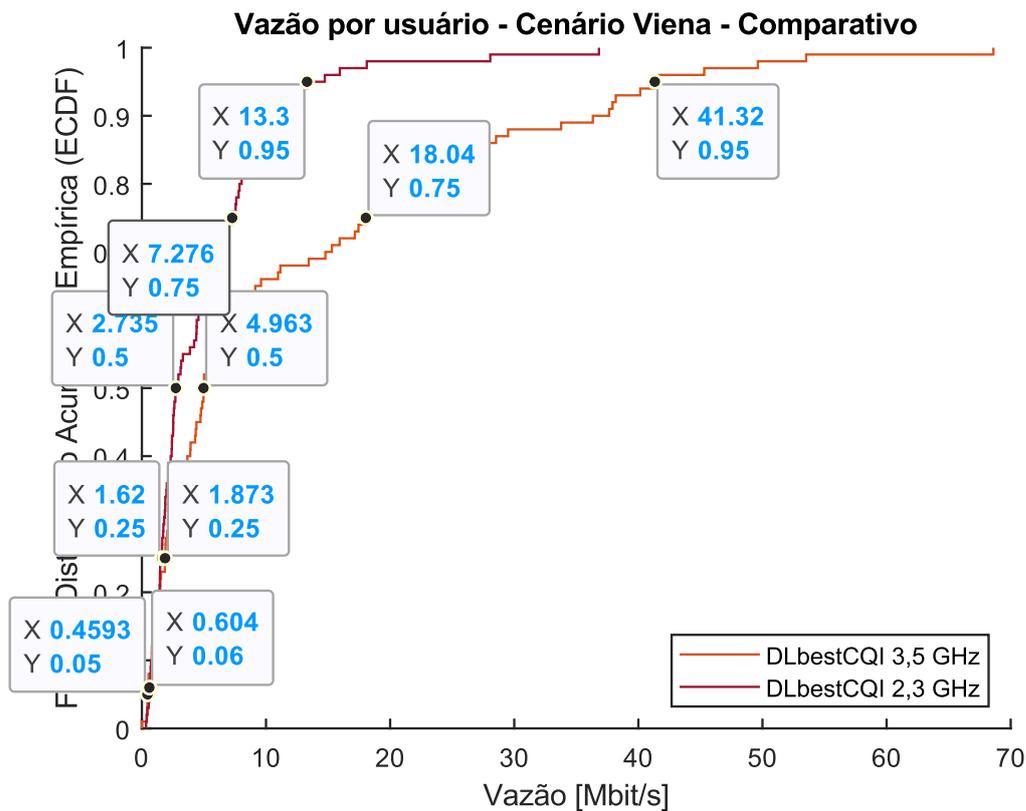


Fig. 26: Gráfico da velocidade de download, usando a técnica de bestCQI para as duas frequências no cenário Viena. **Fonte:** Autor.

eCDF	Velocidade de download bestCQI Viena [Mbps]	
	2,3 GHz	3,5 GHz
95%	13,3	41,32
75%	7,28	18,04
50%	2,74	4,96
25%	1,62	1,87
5%	0,46	0,6

Tab. 11: Valores de velocidade de download, usando a técnica de bestCQI para as duas frequências no cenário Viena. **Fonte:** Autor.

Com os resultados da Fig. 26 e Tab. 11 nota-se uma evidente melhora nas velocidades de download com o dobro da largura de banda, que é utilizada na frequência de 3,5GHz em detrimento à frequência de 2,3GHz. Desta maneira em 2,3GHz, 50% dos usuários têm ao menos 2,74 Mbps de vazão, enquanto esse valor já é alcançado para uma porcentagem superior de usuários no cenário de frequência superior.

Vazão por usuário no cenário Viena (Round Robin):

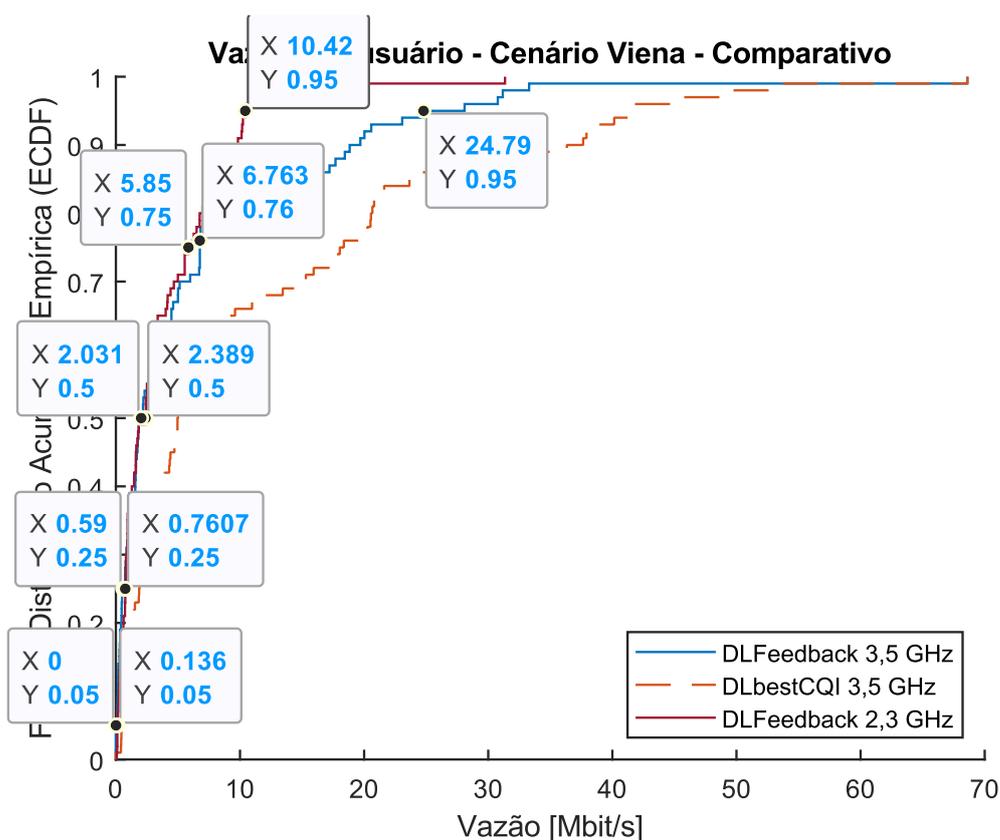


Fig. 27: Gráfico da velocidade de download, usando a técnica de Round Robin para as duas frequências no cenário Viena. **Fonte:** Autor.

eCDF	Velocidade de download Round Robin Viena [Mbps]	
	2,3 GHz	3,5 GHz
95%	10,42	24,79
75%	5,85	6,763
50%	2,03	2,39
25%	0,59	0,76
5%	0	0,14

Tab. 12: Valores de velocidade de download, usando a técnica Round Robin para as duas frequências no cenário Viena. **Fonte:** Autor.

Com os resultados da Fig. 27 e Tab. 12 acima, nota-se um resultado inferior para o método Round Robin em comparação ao método Best CQI. Ainda assim a tendência de que uma maior largura de banda haverá maior vazão se sustenta.

Vazão por usuário no cenário Santa Mônica (bestCQI):

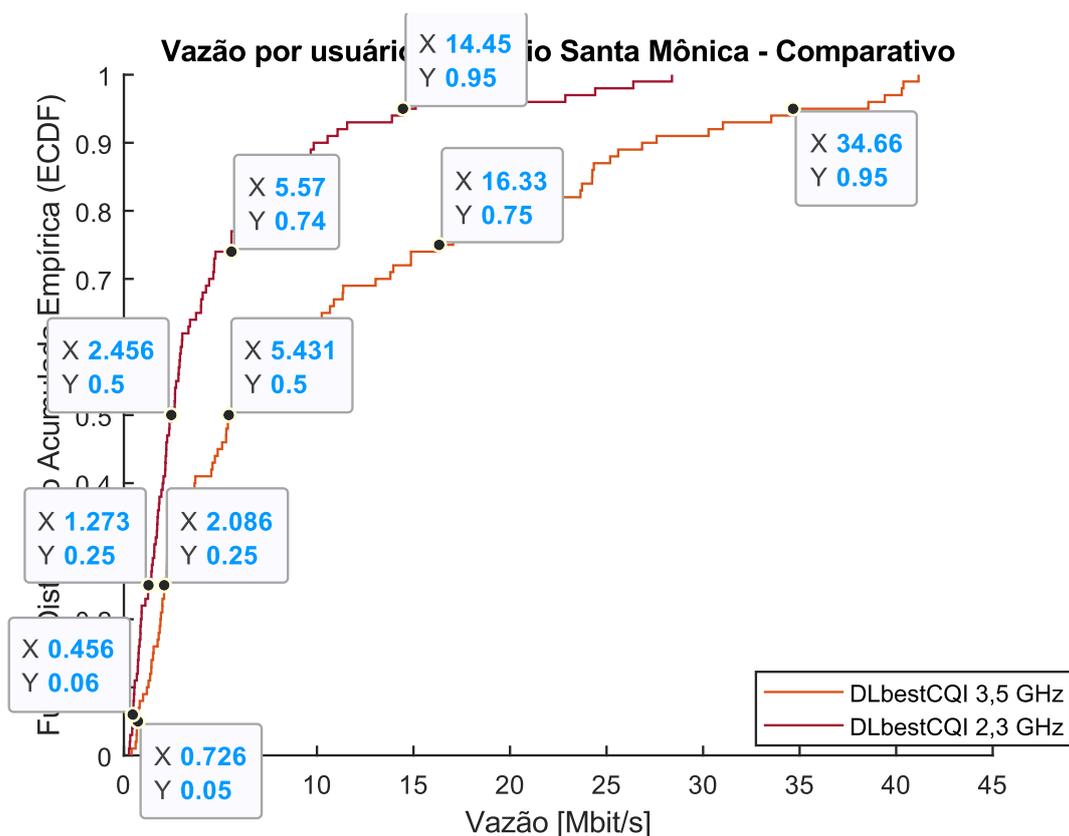


Fig. 28: Gráfico da velocidade de download, usando a técnica de bestCQI para as duas frequências no cenário Santa Mônica. **Fonte:** Autor.

eCDF	Velocidade de download bestCQI Santa Mônica [Mbps]	
	2,3 GHz	3,5 GHz
95%	14,45	34,66
75%	5,57	16,33
50%	2,46	5,43
25%	1,27	2,09
5%	0,46	0,73

Tab. 13: Valores de velocidade de download, usando a técnica de bestCQI para as duas frequências no cenário Santa Mônica. **Fonte:** Autor.

Os resultados da Fig. 28 e Tab. 13 reforçam um resultado superior do escalonador bestCQI.

Vazão por usuário no cenário Santa Mônica (Round Robin):

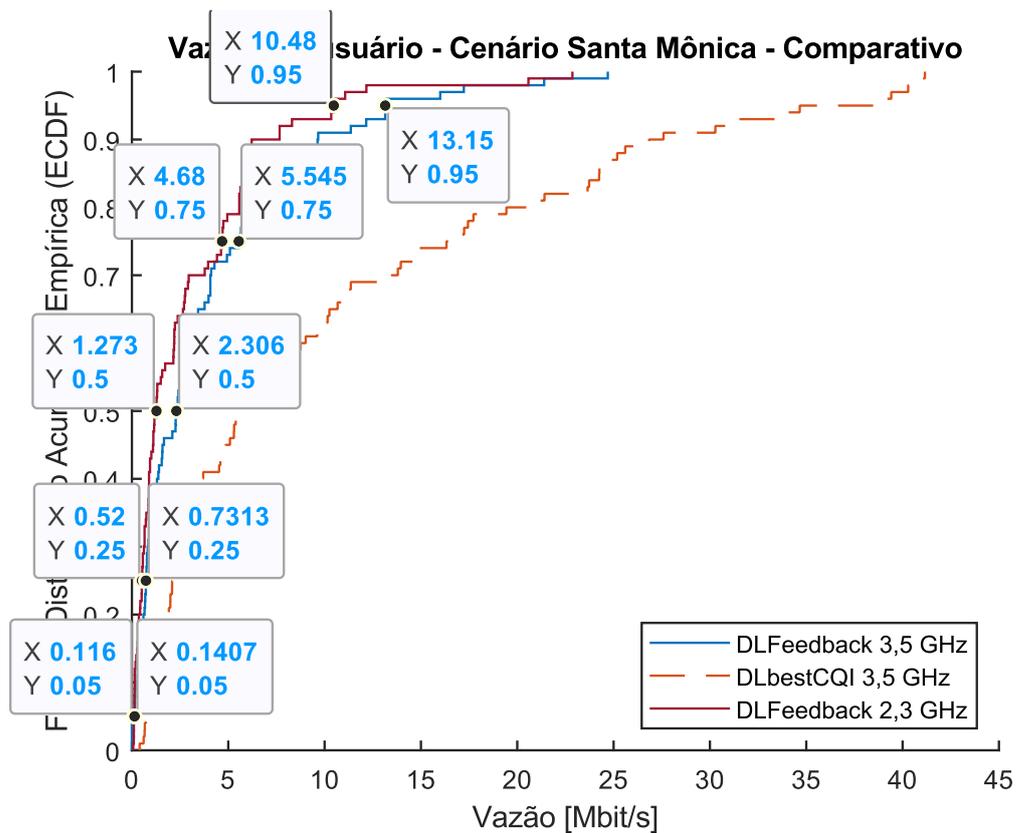


Fig. 29: Gráfico da velocidade de download, usando a técnica Round Robin para as duas frequências no cenário Santa Mônica. **Fonte:** Autor.

eCDF	Velocidade de download Round Robin Santa Mônica [Mbps]	
	2,3 GHz	3,5 GHz
95%	10,48	13,15
75%	4,68	5,55
50%	1,27	2,31
25%	0,52	0,73
5%	0,12	0,14

Tab. 14: Valores de velocidade de download, usando a técnica Round Robin para as duas frequências no cenário Santa Mônica. **Fonte:** Autor.

Os resultados da Fig 29 e Tab. 14 apresentam os resultados do método Round Robin para as duas frequências de estudo, em tracejado o escalonador Best CQI.

Vazão por usuário no cenário parque (bestCQI):

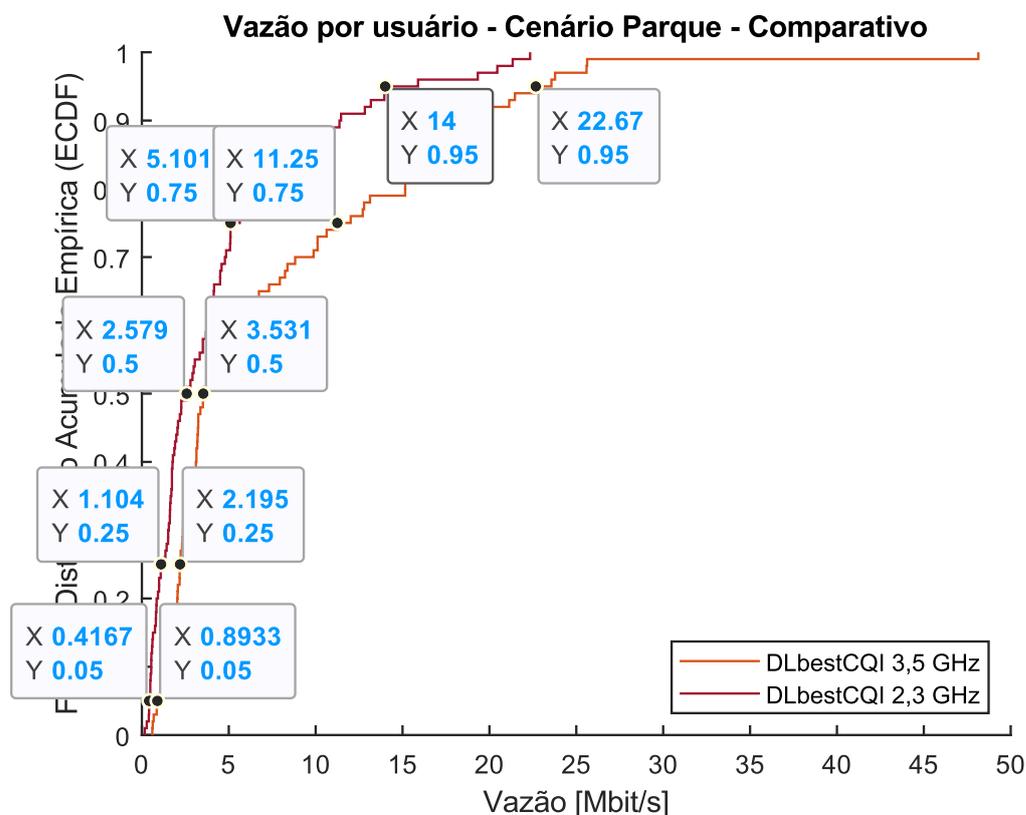


Fig. 30: Gráfico da velocidade de download, usando a técnica bestCQI para as duas frequências no cenário Parque. **Fonte:** Autor.

	Velocidade de download bestCQI Parque [Mbps]	
	2,3 GHz	3,5 GHz
eCDF		
95%	14	22,67
75%	5,1	11,25
50%	2,58	3,53
25%	1,1	2,2
5%	0,42	0,89

Tab. 15: Valores de velocidade de download, usando a técnica bestCQI para as duas frequências no cenário Parque. **Fonte:** Autor.

Os resultados da Fig. 30 e Tab. 15 ressaltam, novamente, que o escalonador bestCQI também tem um resultado superior em espaços mais abertos. Pode-se comparar estes resultados com o trabalho de conclusão de curso espanhol que pontua que todos os

usuários conseguem receber uma taxa de vazão mínima e a taxa máxima é de 11,8 Mbps, resultado deverasmente similar ao apresentado na Tab.15.

Vazão por usuário no cenário parque (Round Robin):

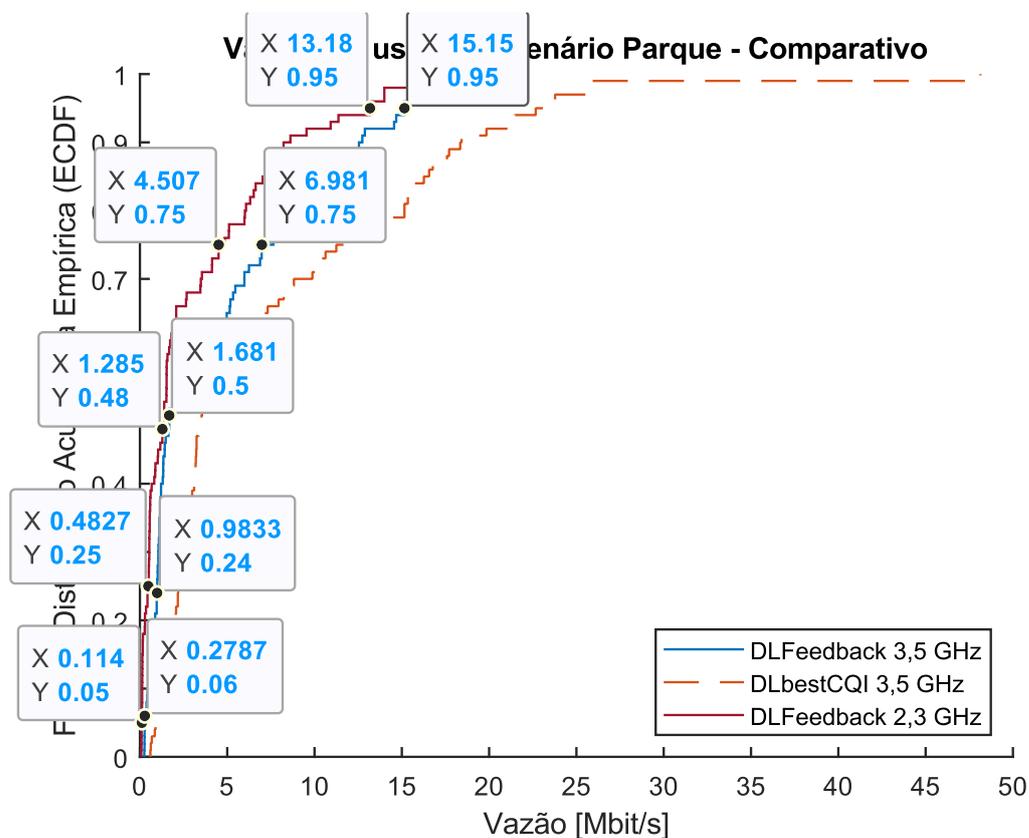


Fig. 31: Gráfico da velocidade de download, usando a técnica Round Robin para as duas frequências no cenário Parque. **Fonte:** Autor.

eCDF	Velocidade de download Round Robin Parque [Mbps]	
	2,3 GHz	3,5 GHz
95%	13,18	15,15
75%	4,51	6,98
50%	1,29	1,68
25%	0,48	0,98
5%	0,11	0,28

Tab. 16: Valores de velocidade de download, usando a técnica Round Robin para as duas frequências no cenário Parque. **Fonte:** Autor.

Os resultados da Fig. 31 e Tab. 16 mostram os valores de vazão para o método Round Robin. Comparando com o trabalho espanhol podemos comparar os resultados e pontuar que há semelhanças à certo ponto, ambos pontuam que há uma vazão mínima para todos os usuários, porém a taxa máxima é registrada como 8,19 Mbps, que destoa de 13,18 Mbps da Tab. 16.

Razão Sinal-Interferência efetivo no cenário Viena:

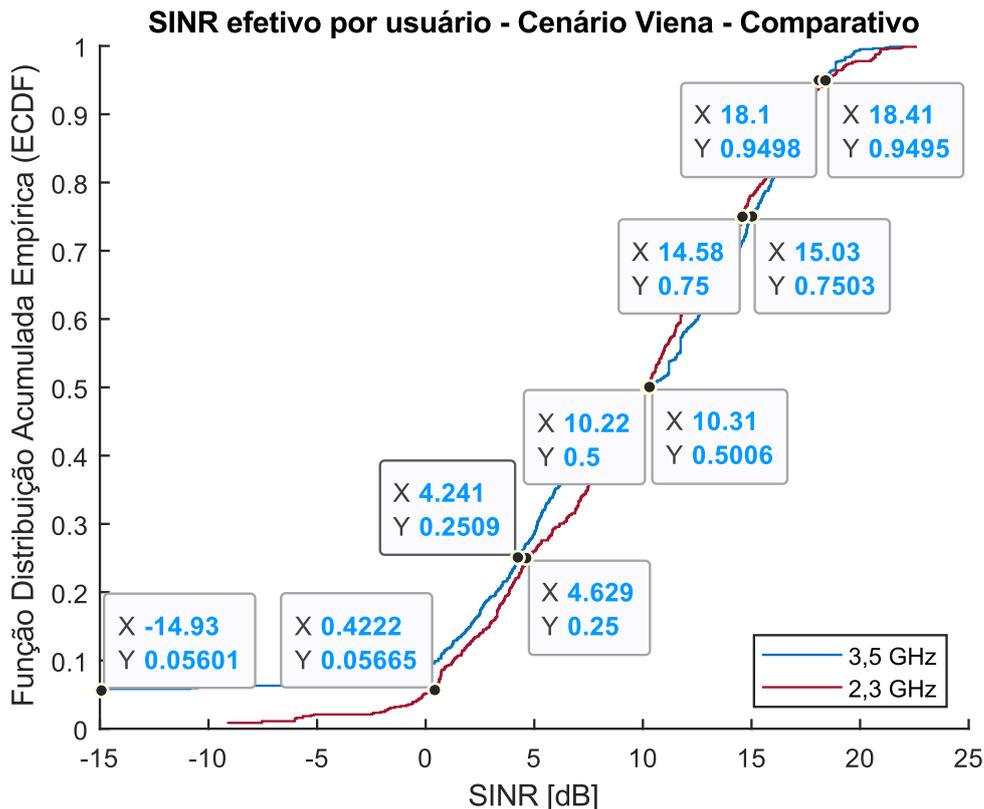


Fig. 32: Gráfico da Relação Sinal-Interferência efetivo para as duas frequências no cenário Viena. **Fonte:** Autor.

eCDF	SINR efetivo Viena [dB]	
	2,3 GHz	3,5 GHz
95%	18,41	18,1
75%	14,58	15,03
50%	10,22	10,31
25%	4,63	4,24
5%	0,42	-14,93

Tab. 17: Valores da Relação Sinal-Interferência efetivo para as duas frequências no cenário Viena. **Fonte:** Autor.

A Relação Sinal-Ruído apresentada na Fig. 32 e Tab. 17 não é significativamente diferente entre as duas frequências, uma possível explicação pode ser do fato de que as frequências são relativamente próximas e com isso, a atenuação da maior frequência não é grande o suficiente para haver uma diferença substancial na SINR para a frequência de 3,5dB.

Razão Sinal-Interferência efetivo no cenário Santa Mônica:

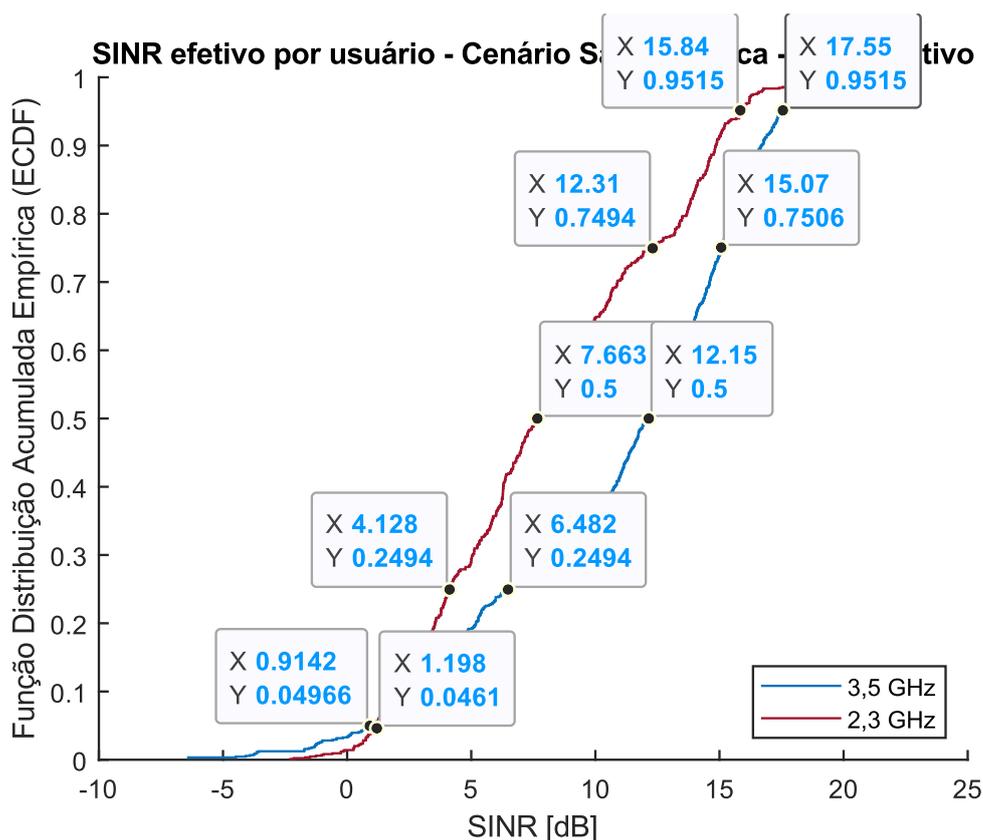


Fig. 33: Gráfico da Relação Sinal-Interferência efetiva para as duas frequências no cenário Santa Mônica. **Fonte:** Autor.

eCDF	SINR efetivo Santa Mônica [dB]	
	2,3 GHz	3,5 GHz
95%	15,84	17,55
75%	12,31	15,07
50%	7,66	12,15
25%	4,13	6,48
5%	1,2	0,91

Tab. 18: Valores da Relação Sinal-Interferência efetiva para as duas frequências no cenário Santa Mônica. **Fonte:** Autor.

Nos resultados apresentados na Fig. 33 e Tab. 18, nota-se uma diferença sensível entre as frequências, porém neste caso a frequência superior causou maior SINR, ou seja, uma razão entre o sinal e a interferência maior, que é um bom fator para a comunicação.

Razão Sinal-Interferência efetivo no cenário parque:

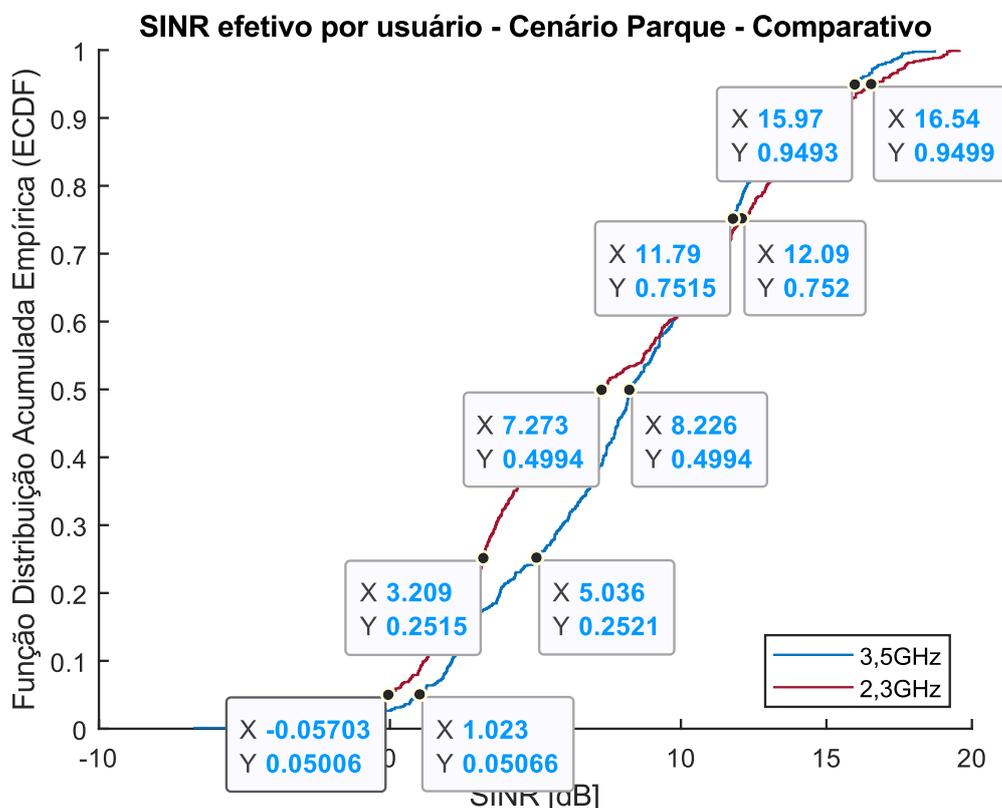


Fig. 34: Gráfico da Relação Sinal-Interferência efetivo para as duas frequências no cenário Parque. **Fonte:** Autor.

eCDF	SINR efetivo Parque [dB]	
	2,3 GHz	3,5 GHz
95%	16,54	15,97
75%	12,09	11,79
50%	7,27	8,23
25%	3,21	5,04
5%	-0,06	1,02

Tab. 19: Valores da Relação Sinal-Interferência efetivo para as duas frequências no cenário Parque. **Fonte:** Autor.

Os resultados da Fig. 34 e Tab. 19 apresentam os valores de Relação Sinal-Interferência no cenário parque.

Latência de pacote no cenário Viena:

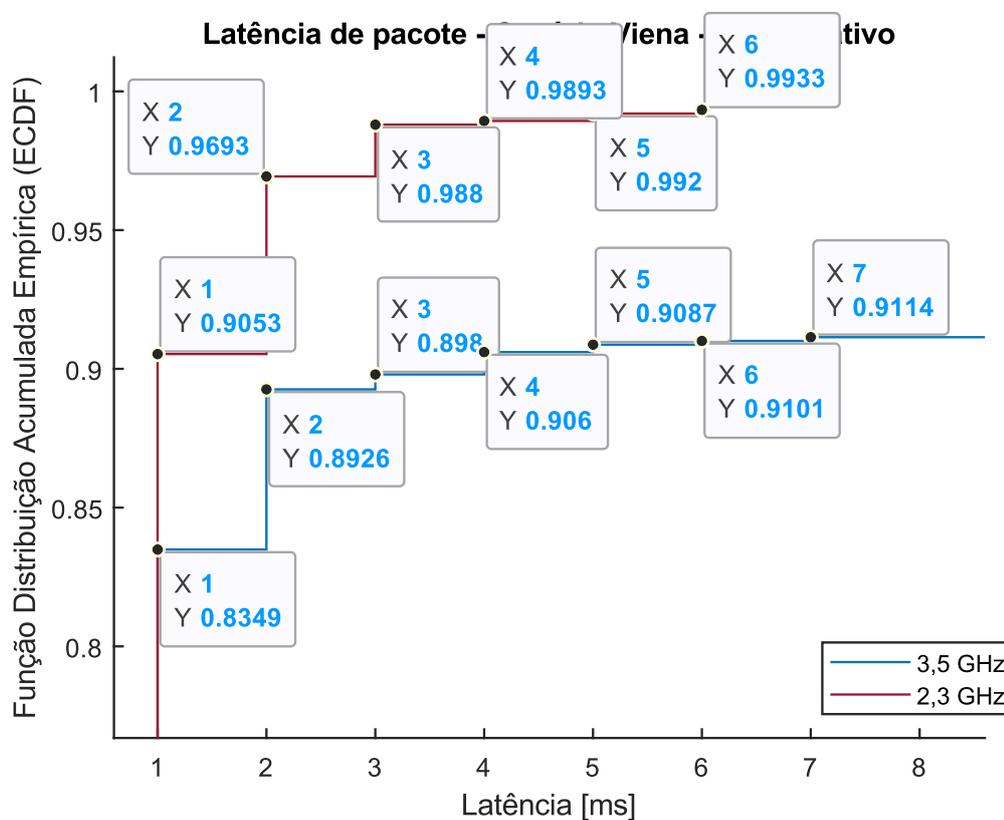


Fig. 35: Gráfico da latência média dos pacotes para as duas frequências no cenário Viena. **Fonte:** Autor.

[ms]	Latência de pacote Viena	
	2,3 GHz	3,5 GHz
1	90,53%	83,49%
2	96,93%	89,23%
3	98,8%	89,8%
4	98,93%	90,6%
5	99,2%	90,87%
6	99,33%	91,01%
7	100%	91,11%

Tab. 20: Valores de latência média dos pacotes para as duas frequências no cenário Viena. **Fonte:** Autor.

Com os resultados da Fig. 35 e Tab. 20 nota-se uma excelente notícia, a grande maioria dos usuários são atendidos com uma latência de pacote inferior a 1ms, em ambas as frequências utilizadas. Ainda assim há um desempenho inferior da tecnologia em 3,5 GHz quando comparada com 2,3 GHz.

Latência de pacote no cenário Santa Mônica:

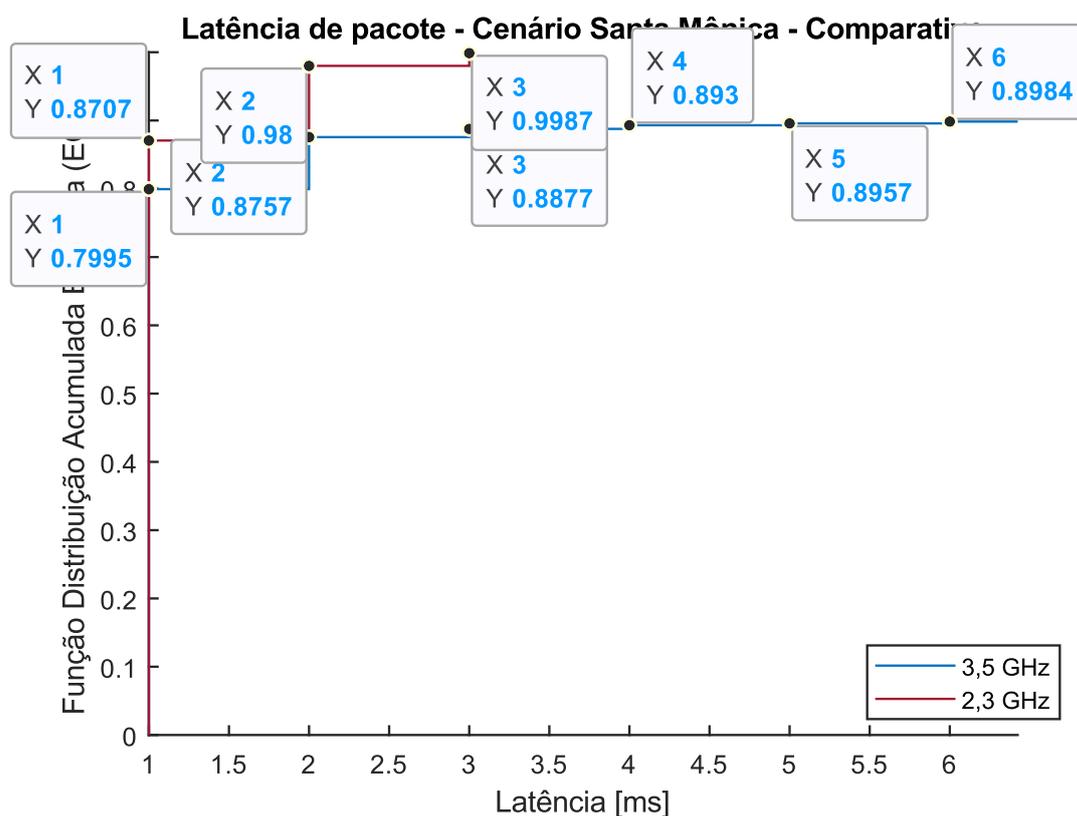


Fig. 36: Gráfico da latência média dos pacotes para as duas frequências no cenário Santa Mônica. **Fonte:** Autor.

[ms]	Latência de pacote Santa Mônica	
	2,3 GHz	3,5 GHz
1	87,07%	79,95%
2	98%	87,57%
3	100%	88,77%
4	100%	89,3%
5	100%	89,57%
6	100%	89,84%

Tab. 21: Valores de latência média dos pacotes para as duas frequências no cenário Santa Mônica. **Fonte:** Autor.

Com os resultados da Fig. 36 e Tab. 21 nota-se, mais uma vez, uma resposta melhor no cenário que emprega a tecnologia de menor frequência. Porém foi possível alcançar valores inferiores à 3ms para 100% dos usuários em 2,3 GHz.

Latência de pacote no cenário parque:

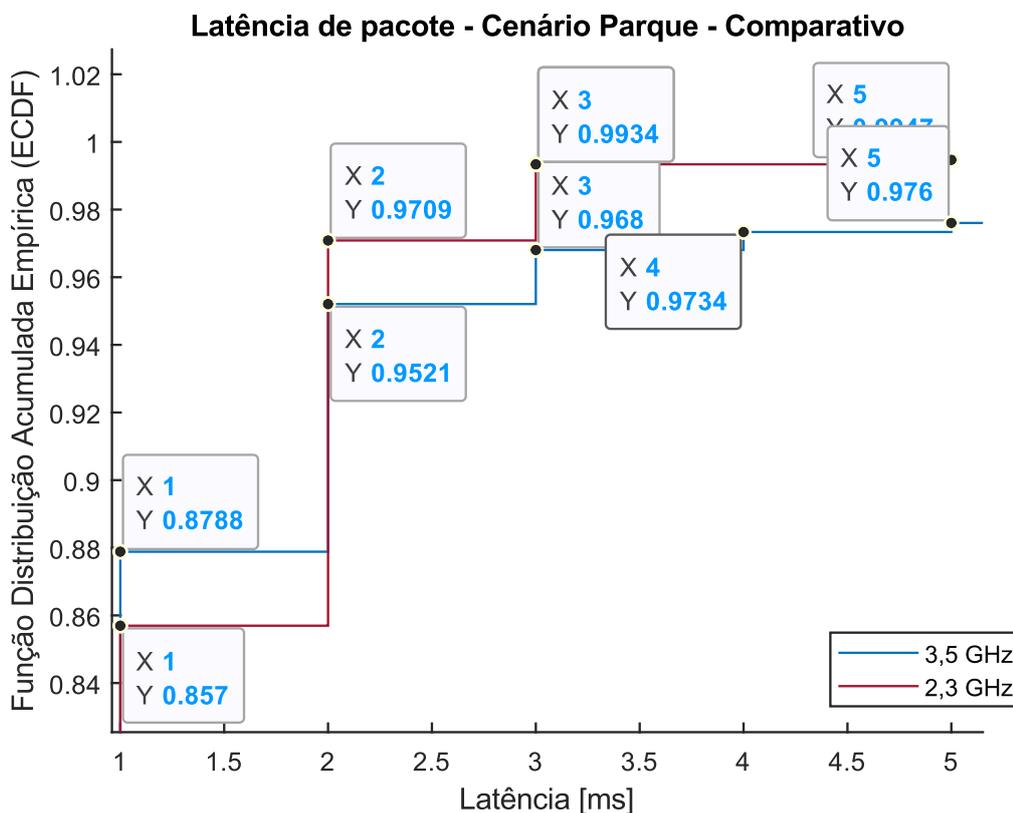


Fig. 37: Gráfico da latência média dos pacotes para as duas frequências no cenário Parque. **Fonte:** Autor.

	Latência de pacote Parque	
[ms]	2,3 GHz	3,5 GHz
1	85,7%	87,883%
2	97,09%	95,21%
3	99,34%	96,8%
4	99,34%	97,34%
5	99,47%	97,6%

Tab. 22: Valores de latência média dos pacotes para as duas frequências no cenário Parque. **Fonte:** Autor.

Com os resultados da Fig. 37 e Tab. 22 percebe-se uma piora da tecnologia em 3,5 GHz em latência, sendo uma possível explicação o fato de que com SINR próximas para ambas as frequências, aquela com maior taxa terá mais retransmissões, assim inundando a rede de pacotes, que gera uma espera em fila maior, o que aumenta a latência de pacote.

Capítulo 5 - Conclusão:

5.1 – Análise Geral

Este trabalho inicia com a premissa da comparação de cenários de diferentes localidades e de diferentes frequências de uso do LTE e do 5G. De acordo com os resultados, chega-se à conclusão de que há de fato uma melhora na vazão por usuário à medida que se aumenta a largura de banda da transmissão, em qualquer uma das 3 localidades estudadas.

Outro objeto de estudo foi a latência, que se comportou melhor com a menor frequência. Este resultado pode parecer estranho à primeira vista, mas uma explicação plausível seria da necessidade de mais retransmissões de pacotes em 3,5 GHz devido à degradação do sinal enviado, causado pela maior frequência utilizada, inundando a rede com pacotes e, assim, aumentando o atraso de fila da rede, que contribui com o aumento da latência.

Nota-se também uma diferença muito pequena nas relações sinal-interferência entre as duas frequências estudadas, sendo possível explicá-las pelo fato de estas frequências estarem relativamente próximas e com isso a atenuação do sinal interferente é muito similar para estas frequências. Outra observação importante neste aspecto é de que a atenuação ao sinal passar pela parede, como simulado neste trabalho, é exatamente igual para ambos os casos, o que na prática é diferente, visto que a atenuação ao atravessar um objeto sólido é monotonamente crescente em relação ao aumento da frequência.

Por fim verificou-se uma melhor performance do método best CQI frente ao método Round Robin, indicando que, de fato, uma escolha de um bom escalonador pode causar uma melhora significativa do serviço aos usuários, mesmo sem precisar de usar um hardware novo para a estação base.

5.2 – Trabalhos futuros

Notou-se durante este trabalho que o simulador é altamente configurável e permite diversas mudanças, desde escalonamento e cenários. Desta forma, este trabalho poderia ser continuado usando esta tendência, fazendo alterações em escalonadores, como o caso

do Round Robin e o best CQI apresentados. Outra modificação vem da mudança das localizações geográficas para estudar-se uma localidade que houver uma demanda maior de usuários, dando um sentido econômico para este tipo de pesquisa. Mais uma análise que seria importantíssima para este tipo de simulador seria de usar bandas do NR FR2 [14], com bandas que vão de 24,3 GHz a 71 GHz, permitindo superiores larguras de banda e, consecutivamente maiores vazões.

Referências:

- [1] <https://www.statista.com/statistics/262950/global-mobile-subscriptions-since-1993/>
Acesso 21/02/2023
- [2] COX, Christopher. **An introduction to 5G: The New Radio, 5G Network and Beyond**. Cambridge:Wiley, 2021
- [3] <https://sistemas.anatel.gov.br/anexar-api/publico/anexos/download/8640e5ee7596164498004506dfeebdfd> Acesso 17/01/2023
- [4] ERICSSON. (2009). *LTE – an introduction* [White Paper]
https://web.archive.org/web/20100801122658/http://www.ericsson.com/res/docs/whitepapers/lte_overview.pdf Acesso 24/01/2023
- [5] COUCH, Leon W. **DIGITAL AND ANALOG COMMUNICATION SYSTEMS: EIGHTH EDITION**. Upper Saddle River: Pearson, 2012.
- [6] MÜLLER, Martin K. et. al. **Flexible multi-node simulation of cellular mobile communications: the Vienna 5G System Level Simulator**. Viena: EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2018.
- [7] ELLER, Lucas. SVOBODA, Philipp. RUPP, Markus. **A Deep Learning Network Planner: Propagation Modeling using Real-World Measurements and a 3D City Model**. Austria: Institute of Telecommunications, TU Wien, 2022.
- [8] ELLER, Lucas. RAIDA, Vaclav. SVOBODA, Philipp. RUPP, Markus. **Localizing Basestations from End-User Timing Advance Measurements**. Austria: Institute of Telecommunications, TU Wien, 2022.
- [9] Wang, Donglin. SATTIRAJU, Raja R. WEINAND, Andreas. SCHOTTEN, Hans D. **System-Level Simulator of LTE Sidelink C-V2X**. Kaiserslautern: MKT'19
- [10] ROPERO, Alex A. **Implementation of 5G broad-/multi-casting features to support video broadcasting and cellular assisted vehicular communications**. Barcelona: BarcelonaTECH, 2020
- [11] KUROSE, James F. ROSS, Keith W. **COMPUTER NETWORKING: A TOP-DOWN APPROACH**. Londres: Pearson, 2021.

- [12] RAPPAPORT, Theodore S. **Comunicações sem fio: Princípios e práticas**. São Paulo: Pearson, 2008.
- [13] Arpaci-Dusseau, Remzi H.; Arpaci-Dusseau, Andrea C. , [*Operating Systems: Three Easy Pieces \[Chapter: Scheduling Introduction\]*](#), Arpaci-Dusseau Books, 2014
- [14] ["TS 38.101-2: NR; User Equipment \(UE\) radio transmission and reception; Part 2: Range 2 Standalone"](#) (18.0.0 ed.). 3GPP. Acesso 22/01/2023

Apêndices:

Apêndice I – Programa original:

```

function params = openStreetMap(params)
% configures scenario with streets and blockages based on data from
OpenStreetMap
% Base stations are placed with predefined positions and users are
% distributed randomly. Each base station is equipped with a 5G and an
LTE
% antenna and an equal number of 5G and LTE users are in the network,
the
% 5G users have a higher data rate. The dynamic spectrum scheduler
% allocates spectrum according to the user traffic. Modulation scheme
up to
% 1024-QAM are used for transmission.
%
% input:
%   params: [1x1]handleObject parameters.Parameters
%
% output:
%   params: [1x1]handleObject parameters.Parameters with scenario
parameters set
%
% initial author: Christoph Buchner
% extended by: Thomas Lipovec, Jan Nausner
%
% see also launcherFiles.launcherOpenStreetMap

%% General Configuration
% time config
params.time.slotDuration      = 1e-3;
params.time.slotsPerChunk    = 15;

% Scheduler type
params.spectrumSchedulerParameters.type =
parameters.setting.SpectrumSchedulerType.dynamicTraffic;

% enable/disable ini
params.calculateIni = true;
params.iniOversampling = 2;

% define the region of interest and interference region
params.regionOfInterest.xSpan = 400;
params.regionOfInterest.ySpan = 300;
params.regionOfInterest.zSpan = 50;

% transmission parameters
params.carrierDL.centerFrequencyGHz = 2;
params.transmissionParameters.DL.bandwidthHz = 10e6;
params.transmissionParameters.DL.cqiParameterType =
parameters.setting.CqiParameterType.Cqi1024QAM;

% disable HARQ
params.useHARQ = false; % not compatible with dynamic spectrum
scheduling

```

```

%% Configuration of the Network Elements
%% Blockages
% The following parameters describe the specification of an
OpenStreetMap
% city. The desired real-world area is specified via latitudes and
% longitudes, which can easily be obtained from openstreetmap.com via
the
% "Export" feature.
openStreetMapCity = parameters.city.OpenStreetMap;
openStreetMapCity.latitude = [48.1955904, 48.1973271];
openStreetMapCity.longitude = [16.3690209, 16.3718059];
openStreetMapCity.streetWidth = 5;
% All buildings have random heights, which are sampled from a uniform
% distribution bounded by the minimum and maximum building height. For
% reproducibility it is possible to specify an integer seed for the
height
% random number generator.
openStreetMapCity.minBuildingHeight = 10;
openStreetMapCity.maxBuildingHeight = 25;
openStreetMapCity.heightRandomSeed = 'shuffle';
openStreetMapCity.wallLossdB = 10;
% The configuration of a city can be stored to and loaded from JSON
files.
% This also allows for manually setting building heights and wall
loss.
openStreetMapCity.saveFile = [];
openStreetMapCity.loadFile = [];
params.cityParameters('OSMCity') = openStreetMapCity;

%% Base Stations
% antennas
antennaLTE = parameters.basestation.antennas.ThreeSector;
antennaLTE.nTX = 4;
antennaLTE.numerology = 0; % assign numerology 0
antennaLTE.technology =
parameters.setting.NetworkElementTechnology.LTE;
antennaLTE.alwaysOn = false;
antenna5G = parameters.basestation.antennas.ThreeSector;
antenna5G.nTX = 4;
antenna5G.numerology = 1; % assign numerology 1
antenna5G.technology =
parameters.setting.NetworkElementTechnology.NRMN_5G;
antenna5G.alwaysOn = false;
% precoders
precoderTechnology = parameters.precoders.Technology();
precoderTechnology.setTechPrecoder(parameters.setting.NetworkElementTe
chnology.LTE, parameters.precoders.LteDL);
precoderTechnology.setTechPrecoder(parameters.setting.NetworkElementTe
chnology.NRMN_5G, parameters.precoders.LteDL);
% First Base Station
BS1 = parameters.basestation.PredefinedPositions;
BS1.positions = [-139.815; -18.1125]; % [x;y] coordinate in the OSM
city
BS1.nSectors = 3;
BS1.antenna = [antennaLTE, antenna5G];
BS1.precoder.DL = precoderTechnology;
params.baseStationParameters('BS1') = BS1;
% Second Base Station
BS2 = parameters.basestation.PredefinedPositions;
BS2.positions = [70; 92.355]; % [x;y] coordinate in the OSM city
BS2.nSectors = 3;

```

```

BS2.antenna      = [antennaLTE, antenna5G];
BS2.precoder.DL = precoderTechnology;
params.baseStationParameters('BS2') = BS2;

%% Users
% LTE users
UsersLTE = parameters.user.Poisson2D;
UsersLTE.nElements      = 50;
UsersLTE.nRX            = 1;
UsersLTE.channelModel   =
parameters.setting.ChannelModel.PedB;
UsersLTE.trafficModelType =
parameters.setting.TrafficModelType.ConstantRate;
UsersLTE.trafficModel.size      = 94;
UsersLTE.trafficModel.numSlots = 2;
UsersLTE.numerology             = 0;
UsersLTE.technology             =
parameters.setting.NetworkElementTechnology.LTE;
params.userParameters('LTE') = UsersLTE;
% 5G users
Users5G = parameters.user.Poisson2D;
Users5G.nElements      = 50;
Users5G.nRX            = 1;
Users5G.channelModel   =
parameters.setting.ChannelModel.PedB;
Users5G.trafficModelType =
parameters.setting.TrafficModelType.ConstantRate;
Users5G.trafficModel.size      = 94*5;
Users5G.trafficModel.numSlots = 2;
Users5G.numerology             = 1;
Users5G.technology             =
parameters.setting.NetworkElementTechnology.NRMN_5G;
params.userParameters('5G') = Users5G;
end

```

Apêndice II – Programa adaptado – Cenário Viena – 2,3GHz:

```

function params = openStreetMap2p3(params)
% configures scenario with streets and blockages based on data from
OpenStreetMap
% Base stations are placed with predefined positions and users are
distributed randomly. Each base station is equipped with a 5G and an
LTE
% antenna and an equal number of 5G and LTE users are in the network,
the
% 5G users have a higher data rate. The dynamic spectrum scheduler
% allocates spectrum according to the user traffic. Modulation scheme
up to
% 1024-QAM are used for transmission.
%
% input:
%   params: [1x1]handleObject parameters.Parameters
%
% output:
%   params: [1x1]handleObject parameters.Parameters with scenario
parameters set
%
% initial author: Christoph Buchner
% extended by: Thomas Lipovec, Jan Nausner

```

```

%
% see also launcherFiles.launcherOpenStreetMap

%% General Configuration
% time config
params.time.slotDuration      = 1e-3;
params.time.slotsPerChunk    = 15;

% Scheduler type
params.spectrumSchedulerParameters.type =
parameters.setting.SpectrumSchedulerType.dynamicTraffic;

% enable/disable ini
params.calculateIni = true;
params.iniOversampling = 2;

% define the region of interest and interference region
params.regionOfInterest.xSpan = 400;
params.regionOfInterest.ySpan = 300;
params.regionOfInterest.zSpan = 50;

% transmission parameters
params.carrierDL.centerFrequencyGHz = 2.3; %2.3GHz
params.transmissionParameters.DL.bandwidthHz = 40e6; %40MHz
params.transmissionParameters.DL.cqiParameterType =
parameters.setting.CqiParameterType.Cqi1024QAM;

% disable HARQ
params.useHARQ = false; % not compatible with dynamic spectrum
scheduling

%% Configuration of the Network Elements
%% Blockages
% The following parameters describe the specification of an
OpenStreetMap
% city. The desired real-world area is specified via latitudes and
% longitudes, which can easily be obtained from openstreetmap.com via
the
% "Export" feature.
openStreetMapCity = parameters.city.OpenStreetMap;
openStreetMapCity.latitude      = [48.1955904, 48.1973271];
openStreetMapCity.longitude    = [16.3690209, 16.3718059];
openStreetMapCity.streetWidth  = 5;
% All buildings have random heights, which are sampled from a uniform
% distribution bounded by the minimum and maximum building height. For
% reproducibility it is possible to specify an integer seed for the
height
% random number generator.
openStreetMapCity.minBuildingHeight = 10;
openStreetMapCity.maxBuildingHeight = 25;
openStreetMapCity.heightRandomSeed = 'shuffle';
openStreetMapCity.wallLossdB      = 10;
% The configuration of a city can be stored to and loaded from JSON
files.
% This also allows for manually setting building heights and wall
loss.
openStreetMapCity.saveFile        = [];
openStreetMapCity.loadFile       = [];
params.cityParameters('OSMCity') = openStreetMapCity;

```

```

%% Base Stations
% antennas
antennaLTE = parameters.basestation.antennas.ThreeSector;
antennaLTE.nTX = 4;
antennaLTE.numerology = 0; % assign numerology 0
antennaLTE.technology =
parameters.setting.NetworkElementTechnology.LTE;
antennaLTE.alwaysOn = false;
antenna5G = parameters.basestation.antennas.ThreeSector;
antenna5G.nTX = 4;
antenna5G.numerology = 1; % assign numerology 1
antenna5G.technology =
parameters.setting.NetworkElementTechnology.NRMN_5G;
antenna5G.alwaysOn = false;
% precoders
precoderTechnology = parameters.precoders.Technology();
precoderTechnology.setTechPrecoder(parameters.setting.NetworkElementTe
chnology.LTE, parameters.precoders.LteDL);
precoderTechnology.setTechPrecoder(parameters.setting.NetworkElementTe
chnology.NRMN_5G, parameters.precoders.LteDL);
% First Base Station
BS1 = parameters.basestation.PredefinedPositions;
BS1.positions = [-139.815; -18.1125]; % [x;y] coordinate in the OSM
city
BS1.nSectors = 3;
BS1.antenna = [antennaLTE, antenna5G];
BS1.precoder.DL = precoderTechnology;
params.baseStationParameters('BS1') = BS1;
% Second Base Station
BS2 = parameters.basestation.PredefinedPositions;
BS2.positions = [70; 92.355]; % [x;y] coordinate in the OSM city
BS2.nSectors = 3;
BS2.antenna = [antennaLTE, antenna5G];
BS2.precoder.DL = precoderTechnology;
params.baseStationParameters('BS2') = BS2;

%% Users
% LTE users
UsersLTE = parameters.user.Poisson2D;
UsersLTE.nElements = 50;
UsersLTE.nRX = 1;
UsersLTE.channelModel =
parameters.setting.ChannelModel.PedB;
UsersLTE.trafficModelType =
parameters.setting.TrafficModelType.ConstantRate;
UsersLTE.trafficModel.size = 94;
UsersLTE.trafficModel.numSlots = 2;
UsersLTE.numerology = 0;
UsersLTE.technology =
parameters.setting.NetworkElementTechnology.LTE;
params.userParameters('LTE') = UsersLTE;
% 5G users
Users5G = parameters.user.Poisson2D;
Users5G.nElements = 50;
Users5G.nRX = 1;
Users5G.channelModel =
parameters.setting.ChannelModel.PedB;
Users5G.trafficModelType =
parameters.setting.TrafficModelType.ConstantRate;
Users5G.trafficModel.size = 94*5;
Users5G.trafficModel.numSlots = 2;

```

```

Users5G.numerology          = 1;
Users5G.technology          =
parameters.setting.NetworkElementTechnology.NRMN_5G;
params.userParameters('5G') = Users5G;
end

```

Apêndice III – Programa adaptado – Cenário Viena – 3,5GHz:

```

function params = openStreetMap3p5(params)
% configures scenario with streets and blockages based on data from
OpenStreetMap
% Base stations are placed with predefined positions and users are
% distributed randomly. Each base station is equipped with a 5G and an
LTE
% antenna and an equal number of 5G and LTE users are in the network,
the
% 5G users have a higher data rate. The dynamic spectrum scheduler
% allocates spectrum according to the user traffic. Modulation scheme
up to
% 1024-QAM are used for transmission.
%
% input:
%   params: [1x1]handleObject parameters.Parameters
%
% output:
%   params: [1x1]handleObject parameters.Parameters with scenario
parameters set
%
% initial author: Christoph Buchner
% extended by: Thomas Lipovec, Jan Nausner
%
% see also launcherFiles.launcherOpenStreetMap

%% General Configuration
% time config
params.time.slotDuration      = 1e-3;
params.time.slotsPerChunk    = 15;

% Scheduler type
params.spectrumSchedulerParameters.type =
parameters.setting.SpectrumSchedulerType.dynamicTraffic;

% enable/disable ini
params.calculateIni = true;
params.iniOversampling = 2;

% define the region of interest and interference region
params.regionOfInterest.xSpan = 400;
params.regionOfInterest.ySpan = 300;
params.regionOfInterest.zSpan = 50;

% transmission parameters
params.carrierDL.centerFrequencyGHz = 3.5; %3.5GHz
params.transmissionParameters.DL.bandwidthHz = 80e6; %80MHz
params.transmissionParameters.DL.cqiParameterType =
parameters.setting.CqiParameterType.Cqi1024QAM;

% disable HARQ

```

```

params.useHARQ = false; % not compatible with dynamic spectrum
scheduling

%% Configuration of the Network Elements
%% Blockages
% The following parameters describe the specification of an
OpenStreetMap
% city. The desired real-world area is specified via latitudes and
% longitudes, which can easily be obtained from openstreetmap.com via
the
% "Export" feature.
openStreetMapCity = parameters.city.OpenStreetMap;
openStreetMapCity.latitude = [48.1955904, 48.1973271];
openStreetMapCity.longitude = [16.3690209, 16.3718059];
openStreetMapCity.streetWidth = 5;
% All buildings have random heights, which are sampled from a uniform
% distribution bounded by the minimum and maximum building height. For
% reproducibility it is possible to specify an integer seed for the
height
% random number generator.
openStreetMapCity.minBuildingHeight = 10;
openStreetMapCity.maxBuildingHeight = 25;
openStreetMapCity.heightRandomSeed = 'shuffle';
openStreetMapCity.wallLossdB = 10;
% The configuration of a city can be stored to and loaded from JSON
files.
% This also allows for manually setting building heights and wall
loss.
openStreetMapCity.saveFile = [];
openStreetMapCity.loadFile = [];
params.cityParameters('OSMCity') = openStreetMapCity;

%% Base Stations
% antennas
antennaLTE = parameters.basestation.antennas.ThreeSector;
antennaLTE.nTX = 4;
antennaLTE.numerology = 0; % assign numerology 0
antennaLTE.technology =
parameters.setting.NetworkElementTechnology.LTE;
antennaLTE.alwaysOn = false;
antenna5G = parameters.basestation.antennas.ThreeSector;
antenna5G.nTX = 4;
antenna5G.numerology = 1; % assign numerology 1
antenna5G.technology =
parameters.setting.NetworkElementTechnology.NRMN_5G;
antenna5G.alwaysOn = false;
% precoders
precoderTechnology = parameters.precoders.Technology();
precoderTechnology.setTechPrecoder(parameters.setting.NetworkElementTe
chnology.LTE, parameters.precoders.LteDL);
precoderTechnology.setTechPrecoder(parameters.setting.NetworkElementTe
chnology.NRMN_5G, parameters.precoders.LteDL);
% First Base Station
BS1 = parameters.basestation.PredefinedPositions;
BS1.positions = [-139.815; -18.1125]; % [x;y] coordinate in the OSM
city
BS1.nSectors = 3;
BS1.antenna = [antennaLTE, antenna5G];
BS1.precoder.DL = precoderTechnology;
params.baseStationParameters('BS1') = BS1;
% Second Base Station

```

```

BS2 = parameters.basestation.PredefinedPositions;
BS2.positions = [70; 92.355]; % [x;y] coordinate in the OSM city
BS2.nSectors = 3;
BS2.antenna = [antennaLTE, antenna5G];
BS2.precoder.DL = precoderTechnology;
params.baseStationParameters('BS2') = BS2;

%% Users
% LTE users
UsersLTE = parameters.user.Poisson2D;
UsersLTE.nElements = 50;
UsersLTE.nRX = 1;
UsersLTE.channelModel =
parameters.setting.ChannelModel.PedB;
UsersLTE.trafficModelType =
parameters.setting.TrafficModelType.ConstantRate;
UsersLTE.trafficModel.size = 94;
UsersLTE.trafficModel.numSlots = 2;
UsersLTE.numerology = 0;
UsersLTE.technology =
parameters.setting.NetworkElementTechnology.LTE;
params.userParameters('LTE') = UsersLTE;
% 5G users
Users5G = parameters.user.Poisson2D;
Users5G.nElements = 50;
Users5G.nRX = 1;
Users5G.channelModel =
parameters.setting.ChannelModel.PedB;
Users5G.trafficModelType =
parameters.setting.TrafficModelType.ConstantRate;
Users5G.trafficModel.size = 94*5;
Users5G.trafficModel.numSlots = 2;
Users5G.numerology = 1;
Users5G.technology =
parameters.setting.NetworkElementTechnology.NRMN_5G;
params.userParameters('5G') = Users5G;
end

```

Apêndice IV – Programa adaptado – Cenário Santa Mônica – 2,3GHz:

```

function params = openStreetMapUFU2p3(params)
% configures scenario with streets and blockages based on data from
OpenStreetMap
% Base stations are placed with predefined positions and users are
% distributed randomly. Each base station is equipped with a 5G and an
LTE
% antenna and an equal number of 5G and LTE users are in the network,
the
% 5G users have a higher data rate. The dynamic spectrum scheduler
% allocates spectrum according to the user traffic. Modulation scheme
up to
% 1024-QAM are used for transmission.
%
% input:
%   params: [1x1]handleObject parameters.Parameters
%
% output:
%   params: [1x1]handleObject parameters.Parameters with scenario
parameters set

```

```

%
% initial author: Christoph Buchner
% extended by: Thomas Lipovec, Jan Nausner
% modified by: Getúlio Martins
% see also launcherFiles.launcherOpenStreetMap

%% General Configuration
% time config
params.time.slotDuration      = 1e-3;
params.time.slotsPerChunk    = 15;

% Scheduler type
params.spectrumSchedulerParameters.type =
parameters.setting.SpectrumSchedulerType.dynamicTraffic;

% enable/disable ini
params.calculateIni = true;
params.iniOversampling = 2;

% define the region of interest and interference region
params.regionOfInterest.xSpan = 400;
params.regionOfInterest.ySpan = 300;
params.regionOfInterest.zSpan = 50;

% transmission parameters
params.carrierDL.centerFrequencyGHz = 2.3; %2.3GHz
params.transmissionParameters.DL.bandwidthHz = 40e6; %40MHz
params.transmissionParameters.DL.cqiParameterType =
parameters.setting.CqiParameterType.Cqi1024QAM;

% disable HARQ
params.useHARQ = false; % not compatible with dynamic spectrum
scheduling

%% Configuration of the Network Elements
%% Blockages
% The following parameters describe the specification of an
OpenStreetMap
% city. The desired real-world area is specified via latitudes and
% longitudes, which can easily be obtained from openstreetmap.com via
the
% "Export" feature.
openStreetMapCity = parameters.city.OpenStreetMap;
openStreetMapCity.latitude      = [-18.9193034, -18.9175667];
openStreetMapCity.longitude     = [-48.2587825, -48.2559975];
openStreetMapCity.streetWidth   = 5;
% All buildings have random heights, which are sampled from a uniform
% distribution bounded by the minimum and maximum building height. For
% reproducibility it is possible to specify an integer seed for the
height
% random number generator.
openStreetMapCity.minBuildingHeight = 10;
openStreetMapCity.maxBuildingHeight = 25;
openStreetMapCity.heightRandomSeed = 'shuffle';
openStreetMapCity.wallLossdB       = 10;
% The configuration of a city can be stored to and loaded from JSON
files.
% This also allows for manually setting building heights and wall
loss.
openStreetMapCity.saveFile         = [];

```

```

openStreetMapCity.loadFile          = [];
params.cityParameters('OSMcity') = openStreetMapCity;

%% Base Stations
% antennas
antennaLTE = parameters.basestation.antennas.ThreeSector;
antennaLTE.nTX          = 4;
antennaLTE.numerology   = 0;    % assign numerology 0
antennaLTE.technology   =
parameters.setting.NetworkElementTechnology.LTE;
antennaLTE.alwaysOn    = false;
antenna5G = parameters.basestation.antennas.ThreeSector;
antenna5G.nTX          = 4;
antenna5G.numerology   = 1;    % assign numerology 1
antenna5G.technology   =
parameters.setting.NetworkElementTechnology.NRMN_5G;
antenna5G.alwaysOn    = false;
% precoders
precoderTechnology = parameters.precoders.Technology();
precoderTechnology.setTechPrecoder(parameters.setting.NetworkElementTechnology.LTE, parameters.precoders.LteDL);
precoderTechnology.setTechPrecoder(parameters.setting.NetworkElementTechnology.NRMN_5G, parameters.precoders.LteDL);
% First Base Station
BS1 = parameters.basestation.PredefinedPositions;
BS1.positions = [-139.815; -18.1125]; % [x;y] coordinate in the OSM city
BS1.nSectors = 3;
BS1.antenna = [antennaLTE, antenna5G];
BS1.precoder.DL = precoderTechnology;
params.baseStationParameters('BS1') = BS1;
% Second Base Station
BS2 = parameters.basestation.PredefinedPositions;
BS2.positions = [70; 92.355]; % [x;y] coordinate in the OSM city
BS2.nSectors = 3;
BS2.antenna = [antennaLTE, antenna5G];
BS2.precoder.DL = precoderTechnology;
params.baseStationParameters('BS2') = BS2;

%% Users
% LTE users
UsersLTE = parameters.user.Poisson2D;
UsersLTE.nElements = 50;
UsersLTE.nRX = 1;
UsersLTE.channelModel =
parameters.setting.ChannelModel.PedB;
UsersLTE.trafficModelType =
parameters.setting.TrafficModelType.ConstantRate;
UsersLTE.trafficModel.size = 94;
UsersLTE.trafficModel.numSlots = 2;
UsersLTE.numerology = 0;
UsersLTE.technology =
parameters.setting.NetworkElementTechnology.LTE;
params.userParameters('LTE') = UsersLTE;
% 5G users
Users5G = parameters.user.Poisson2D;
Users5G.nElements = 50;
Users5G.nRX = 1;
Users5G.channelModel =
parameters.setting.ChannelModel.PedB;

```

```

Users5G.trafficModelType      =
parameters.setting.TrafficModelType.ConstantRate;
Users5G.trafficModel.size     = 94*5;
Users5G.trafficModel.numSlots = 2;
Users5G.numerology            = 1;
Users5G.technology            =
parameters.setting.NetworkElementTechnology.NRMN_5G;
params.userParameters('5G') = Users5G;
end

```

Apêndice V – Programa adaptado – Cenário Santa Mônica – 3,5GHz:

```

function params = openStreetMapUFU3p5(params)
% configures scenario with streets and blockages based on data from
OpenStreetMap
% Base stations are placed with predefined positions and users are
% distributed randomly. Each base station is equipped with a 5G and an
LTE
% antenna and an equal number of 5G and LTE users are in the network,
the
% 5G users have a higher data rate. The dynamic spectrum scheduler
% allocates spectrum according to the user traffic. Modulation scheme
up to
% 1024-QAM are used for transmission.
%
% input:
%   params: [1x1]handleObject parameters.Parameters
%
% output:
%   params: [1x1]handleObject parameters.Parameters with scenario
parameters set
%
% initial author: Christoph Buchner
% extended by: Thomas Lipovec, Jan Nausner
% modified by: Getúlio Martins
% see also launcherFiles.launcherOpenStreetMap

%% General Configuration
% time config
params.time.slotDuration      = 1e-3;
params.time.slotsPerChunk    = 15;

% Scheduler type
params.spectrumSchedulerParameters.type =
parameters.setting.SpectrumSchedulerType.dynamicTraffic;

% enable/disable ini
params.calculateIni = true;
params.iniOversampling = 2;

% define the region of interest and interference region
params.regionOfInterest.xSpan = 400;
params.regionOfInterest.ySpan = 300;
params.regionOfInterest.zSpan = 50;

% transmission parameters
params.carrierDL.centerFrequencyGHz = 3.5; %3.5GHz
params.transmissionParameters.DL.bandwidthHz = 80e6; %80MHz

```

```

params.transmissionParameters.DL.cqiParameterType =
parameters.setting.CqiParameterType.Cqi1024QAM;

% disable HARQ
params.useHARQ = false; % not compatible with dynamic spectrum
scheduling

%% Configuration of the Network Elements
%% Blockages
% The following parameters describe the specification of an
OpenStreetMap
% city. The desired real-world area is specified via latitudes and
% longitudes, which can easily be obtained from openstreetmap.com via
the
% "Export" feature.
openStreetMapCity = parameters.city.OpenStreetMap;
openStreetMapCity.latitude = [-18.9193034, -18.9175667];
openStreetMapCity.longitude = [-48.2587825, -48.2559975];
openStreetMapCity.streetWidth = 5;
% All buildings have random heights, which are sampled from a uniform
% distribution bounded by the minimum and maximum building height. For
% reproducibility it is possible to specify an integer seed for the
height
% random number generator.
openStreetMapCity.minBuildingHeight = 10;
openStreetMapCity.maxBuildingHeight = 25;
openStreetMapCity.heightRandomSeed = 'shuffle';
openStreetMapCity.wallLossdB = 10;
% The configuration of a city can be stored to and loaded from JSON
files.
% This also allows for manually setting building heights and wall
loss.
openStreetMapCity.saveFile = [];
openStreetMapCity.loadFile = [];
params.cityParameters('OSMcity') = openStreetMapCity;

%% Base Stations
% antennas
antennaLTE = parameters.basestation.antennas.ThreeSector;
antennaLTE.nTX = 4;
antennaLTE.numerology = 0; % assign numerology 0
antennaLTE.technology =
parameters.setting.NetworkElementTechnology.LTE;
antennaLTE.alwaysOn = false;
antenna5G = parameters.basestation.antennas.ThreeSector;
antenna5G.nTX = 4;
antenna5G.numerology = 1; % assign numerology 1
antenna5G.technology =
parameters.setting.NetworkElementTechnology.NRMN_5G;
antenna5G.alwaysOn = false;
% precoders
precoderTechnology = parameters.precoders.Technology();
precoderTechnology.setTechPrecoder(parameters.setting.NetworkElementTe
chnology.LTE, parameters.precoders.LteDL);
precoderTechnology.setTechPrecoder(parameters.setting.NetworkElementTe
chnology.NRMN_5G, parameters.precoders.LteDL);
% First Base Station
BS1 = parameters.basestation.PredefinedPositions;
BS1.positions = [-139.815; -18.1125]; % [x;y] coordinate in the OSM
city
BS1.nSectors = 3;

```

```

BS1.antenna      = [antennaLTE, antenna5G];
BS1.precoder.DL = precoderTechnology;
params.baseStationParameters('BS1') = BS1;
% Second Base Station
BS2 = parameters.basestation.PredefinedPositions;
BS2.positions    = [70; 92.355]; % [x;y] coordinate in the OSM city
BS2.nSectors     = 3;
BS2.antenna      = [antennaLTE, antenna5G];
BS2.precoder.DL = precoderTechnology;
params.baseStationParameters('BS2') = BS2;

%% Users
% LTE users
UsersLTE = parameters.user.Poisson2D;
UsersLTE.nElements      = 50;
UsersLTE.nRX            = 1;
UsersLTE.channelModel   =
parameters.setting.ChannelModel.PedB;
UsersLTE.trafficModelType =
parameters.setting.TrafficModelType.ConstantRate;
UsersLTE.trafficModel.size = 94;
UsersLTE.trafficModel.numSlots = 2;
UsersLTE.numerology      = 0;
UsersLTE.technology      =
parameters.setting.NetworkElementTechnology.LTE;
params.userParameters('LTE') = UsersLTE;
% 5G users
Users5G = parameters.user.Poisson2D;
Users5G.nElements      = 50;
Users5G.nRX            = 1;
Users5G.channelModel   =
parameters.setting.ChannelModel.PedB;
Users5G.trafficModelType =
parameters.setting.TrafficModelType.ConstantRate;
Users5G.trafficModel.size = 94*5;
Users5G.trafficModel.numSlots = 2;
Users5G.numerology      = 1;
Users5G.technology      =
parameters.setting.NetworkElementTechnology.NRMN_5G;
params.userParameters('5G') = Users5G;
end

```

Apêndice VI – Programa adaptado – Cenário Parque – 2,3GHz:

```

function params = openStreetMapPark2p3(params)
% configures scenario with streets and blockages based on data from
OpenStreetMap
% Base stations are placed with predefined positions and users are
% distributed randomly. Each base station is equipped with a 5G and an
LTE
% antenna and an equal number of 5G and LTE users are in the network,
the
% 5G users have a higher data rate. The dynamic spectrum scheduler
% allocates spectrum according to the user traffic. Modulation scheme
up to
% 1024-QAM are used for transmission.
%
% input:
%   params: [1x1]handleObject parameters.Parameters

```

```

%
% output:
%   params: [1x1]handleObject parameters.Parameters with scenario
parameters set
%
% initial author: Christoph Buchner
% extended by: Thomas Lipovec, Jan Nausner
%
% see also launcherFiles.launcherOpenStreetMap

%% General Configuration
% time config
params.time.slotDuration      = 1e-3;
params.time.slotsPerChunk    = 15;

% Scheduler type
params.spectrumSchedulerParameters.type =
parameters.setting.SpectrumSchedulerType.dynamicTraffic;

% enable/disable ini
params.calculateIni = true;
params.iniOversampling = 2;

% define the region of interest and interference region
params.regionOfInterest.xSpan = 400;
params.regionOfInterest.ySpan = 300;
params.regionOfInterest.zSpan = 50;

% transmission parameters
params.carrierDL.centerFrequencyGHz = 2.3; %2.3GHz
params.transmissionParameters.DL.bandwidthHz = 40e6; %40MHz
params.transmissionParameters.DL.cqiParameterType =
parameters.setting.CqiParameterType.Cqi1024QAM;

% disable HARQ
params.useHARQ = false; % not compatible with dynamic spectrum
scheduling

%% Configuration of the Network Elements
%% Blockages
% The following parameters describe the specification of an
OpenStreetMap
% city. The desired real-world area is specified via latitudes and
% longitudes, which can easily be obtained from openstreetmap.com via
the
% "Export" feature.
openStreetMapCity = parameters.city.OpenStreetMap;
openStreetMapCity.latitude      = [-19.7182913, -19.7165546];
openStreetMapCity.longitude    = [-47.9615167, -47.9587317];
openStreetMapCity.streetWidth  = 5;
% All buildings have random heights, which are sampled from a uniform
% distribution bounded by the minimum and maximum building height. For
% reproducibility it is possible to specify an integer seed for the
height
% random number generator.
openStreetMapCity.minBuildingHeight = 10;
openStreetMapCity.maxBuildingHeight = 25;
openStreetMapCity.heightRandomSeed = 'shuffle';
openStreetMapCity.wallLossdB      = 10;

```

```

% The configuration of a city can be stored to and loaded from JSON
files.
% This also allows for manually setting building heights and wall
loss.
openStreetMapCity.saveFile          = [];
openStreetMapCity.loadFile          = [];
params.cityParameters('OSMcity') = openStreetMapCity;

%% Base Stations
% antennas
antennaLTE = parameters.basestation.antennas.ThreeSector;
antennaLTE.nTX          = 4;
antennaLTE.numerology   = 0;    % assign numerology 0
antennaLTE.technology   =
parameters.setting.NetworkElementTechnology.LTE;
antennaLTE.alwaysOn     = false;
antenna5G = parameters.basestation.antennas.ThreeSector;
antenna5G.nTX          = 4;
antenna5G.numerology   = 1;    % assign numerology 1
antenna5G.technology   =
parameters.setting.NetworkElementTechnology.NRMN_5G;
antenna5G.alwaysOn     = false;
% precoders
precoderTechnology = parameters.precoders.Technology();
precoderTechnology.setTechPrecoder(parameters.setting.NetworkElementTe
chnology.LTE, parameters.precoders.LteDL);
precoderTechnology.setTechPrecoder(parameters.setting.NetworkElementTe
chnology.NRMN_5G, parameters.precoders.LteDL);
% First Base Station
BS1 = parameters.basestation.PredefinedPositions;
BS1.positions = [-139.815; -18.1125]; % [x;y] coordinate in the OSM
city
BS1.nSectors   = 3;
BS1.antenna    = [antennaLTE, antenna5G];
BS1.precoder.DL = precoderTechnology;
params.baseStationParameters('BS1') = BS1;
% Second Base Station
BS2 = parameters.basestation.PredefinedPositions;
BS2.positions = [70; 92.355]; % [x;y] coordinate in the OSM city
BS2.nSectors   = 3;
BS2.antenna    = [antennaLTE, antenna5G];
BS2.precoder.DL = precoderTechnology;
params.baseStationParameters('BS2') = BS2;

%% Users
% LTE users
UsersLTE = parameters.user.Poisson2D;
UsersLTE.nElements = 50;
UsersLTE.nRX       = 1;
UsersLTE.channelModel =
parameters.setting.ChannelModel.PedB;
UsersLTE.trafficModelType =
parameters.setting.TrafficModelType.ConstantRate;
UsersLTE.trafficModel.size = 94;
UsersLTE.trafficModel.numSlots = 2;
UsersLTE.numerology = 0;
UsersLTE.technology =
parameters.setting.NetworkElementTechnology.LTE;
params.userParameters('LTE') = UsersLTE;
% 5G users
Users5G = parameters.user.Poisson2D;

```

```

Users5G.nElements          = 50;
Users5G.nRX                = 1;
Users5G.channelModel       =
parameters.setting.ChannelModel.PedB;
Users5G.trafficModelType   =
parameters.setting.TrafficModelType.ConstantRate;
Users5G.trafficModel.size   = 94*5;
Users5G.trafficModel.numSlots = 2;
Users5G.numerology         = 1;
Users5G.technology         =
parameters.setting.NetworkElementTechnology.NRMN_5G;
params.userParameters('5G') = Users5G;
end

```

Apêndice VII – Programa adaptado – Cenário Parque – 3,5GHz:

```

function params = openStreetMapPark3p5(params)
% configures scenario with streets and blockages based on data from
OpenStreetMap
% Base stations are placed with predefined positions and users are
% distributed randomly. Each base station is equipped with a 5G and an
LTE
% antenna and an equal number of 5G and LTE users are in the network,
the
% 5G users have a higher data rate. The dynamic spectrum scheduler
% allocates spectrum according to the user traffic. Modulation scheme
up to
% 1024-QAM are used for transmission.
%
% input:
%   params: [1x1]handleObject parameters.Parameters
%
% output:
%   params: [1x1]handleObject parameters.Parameters with scenario
parameters set
%
% initial author: Christoph Buchner
% extended by: Thomas Lipovec, Jan Nausner
%
% see also launcherFiles.launcherOpenStreetMap

%% General Configuration
% time config
params.time.slotDuration   = 1e-3;
params.time.slotsPerChunk = 15;

% Scheduler type
params.spectrumSchedulerParameters.type =
parameters.setting.SpectrumSchedulerType.dynamicTraffic;

% enable/disable ini
params.calculateIni = true;
params.iniOversampling = 2;

% define the region of interest and interference region
params.regionOfInterest.xSpan = 400;
params.regionOfInterest.ySpan = 300;

```

```

params.regionOfInterest.zSpan = 50;

% transmission parameters
params.carrierDL.centerFrequencyGHz = 3.5; %3.5GHz
params.transmissionParameters.DL.bandwidthHz = 80e6; %80MHz
params.transmissionParameters.DL.cqiParameterType =
parameters.setting.CqiParameterType.Cqi1024QAM;

% disable HARQ
params.useHARQ = false; % not compatible with dynamic spectrum
scheduling

%% Configuration of the Network Elements
%% Blockages
% The following parameters describe the specification of an
OpenStreetMap
% city. The desired real-world area is specified via latitudes and
% longitudes, which can easily be obtained from openstreetmap.com via
the
% "Export" feature.
openStreetMapCity = parameters.city.OpenStreetMap;
openStreetMapCity.latitude = [-19.7182913, -19.7165546];
openStreetMapCity.longitude = [-47.9615167, -47.9587317];
openStreetMapCity.streetWidth = 5;
% All buildings have random heights, which are sampled from a uniform
% distribution bounded by the minimum and maximum building height. For
% reproducibility it is possible to specify an integer seed for the
height
% random number generator.
openStreetMapCity.minBuildingHeight = 10;
openStreetMapCity.maxBuildingHeight = 25;
openStreetMapCity.heightRandomSeed = 'shuffle';
openStreetMapCity.wallLossdB = 10;
% The configuration of a city can be stored to and loaded from JSON
files.
% This also allows for manually setting building heights and wall
loss.
openStreetMapCity.saveFile = [];
openStreetMapCity.loadFile = [];
params.cityParameters('OSMCity') = openStreetMapCity;

%% Base Stations
% antennas
antennaLTE = parameters.basestation.antennas.ThreeSector;
antennaLTE.nTX = 4;
antennaLTE.numerology = 0; % assign numerology 0
antennaLTE.technology =
parameters.setting.NetworkElementTechnology.LTE;
antennaLTE.alwaysOn = false;
antenna5G = parameters.basestation.antennas.ThreeSector;
antenna5G.nTX = 4;
antenna5G.numerology = 1; % assign numerology 1
antenna5G.technology =
parameters.setting.NetworkElementTechnology.NRMN_5G;
antenna5G.alwaysOn = false;
% precoders
precoderTechnology = parameters.precoders.Technology();
precoderTechnology.setTechPrecoder(parameters.setting.NetworkElementTe
chnology.LTE, parameters.precoders.LteDL);
precoderTechnology.setTechPrecoder(parameters.setting.NetworkElementTe
chnology.NRMN_5G, parameters.precoders.LteDL);

```

```

% First Base Station
BS1 = parameters.basestation.PredefinedPositions;
BS1.positions = [-139.815; -18.1125]; % [x;y] coordinate in the OSM
city
BS1.nSectors = 3;
BS1.antenna = [antennaLTE, antenna5G];
BS1.precoder.DL = precoderTechnology;
params.baseStationParameters('BS1') = BS1;
% Second Base Station
BS2 = parameters.basestation.PredefinedPositions;
BS2.positions = [70; 92.355]; % [x;y] coordinate in the OSM city
BS2.nSectors = 3;
BS2.antenna = [antennaLTE, antenna5G];
BS2.precoder.DL = precoderTechnology;
params.baseStationParameters('BS2') = BS2;

%% Users
% LTE users
UsersLTE = parameters.user.Poisson2D;
UsersLTE.nElements = 50;
UsersLTE.nRX = 1;
UsersLTE.channelModel =
parameters.setting.ChannelModel.PedB;
UsersLTE.trafficModelType =
parameters.setting.TrafficModelType.ConstantRate;
UsersLTE.trafficModel.size = 94;
UsersLTE.trafficModel.numSlots = 2;
UsersLTE.numerology = 0;
UsersLTE.technology =
parameters.setting.NetworkElementTechnology.LTE;
params.userParameters('LTE') = UsersLTE;
% 5G users
Users5G = parameters.user.Poisson2D;
Users5G.nElements = 50;
Users5G.nRX = 1;
Users5G.channelModel =
parameters.setting.ChannelModel.PedB;
Users5G.trafficModelType =
parameters.setting.TrafficModelType.ConstantRate;
Users5G.trafficModel.size = 94*5;
Users5G.trafficModel.numSlots = 2;
Users5G.numerology = 1;
Users5G.technology =
parameters.setting.NetworkElementTechnology.NRMN_5G;
params.userParameters('5G') = Users5G;
end

```