CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

ANÁLISE CRÍTICA SOBRE CAPACIDADE 5G UTILIZANDO KPIS PRÁTICOS

Rômulo Torres Serra

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador(a): Maurício Henrique Costa Dias

Rio de Janeiro
Outubro de 2024

ANÁLISE CRÍTICA SOBRE CAPACIDADE 5G UTILIZANDO KPIS PRÁTICOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Rômulo Torres Serra

Banca Examinadora:

_____

Presidente, Professor Dr. Maurício Henrique Costa Dias (CEFET/RJ) (orientador)

_____

Professor Dr. João Terêncio Dias (CEFET/RJ)

_____

Professora Dra. Renata Braz Falcão da Costa (CEFET/RJ)

_____

Professor Dr. Michel Pompeu Tcheou (UERJ)

Rio de Janeiro
Outubro de 2024

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

S487 Serra, Rômulo Torres
Análise crítica sobre capacidade 5G utilizando KPIS práticos / Rômulo Torres Serra. — 2024.
xiii, 66f. : il. color. , enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2024.
Bibliografia : f. 64-66
Orientador: Maurício Henrique Costa Dias

1. Sistemas de telefonia celular. 2. Sistemas de comunicação móvel. 3. Sistemas de comunicação em banda larga. 4. Desempenho - Avaliação. I. Dias, Maurício Henrique Costa. (Orient.). II. Título.

CDD 621.38456

Elaborada pela bibliotecária Tania Mello – CRB/7 nº 5507/04

DEDICATÓRIA

"Dedico esta dissertação à minha avó, Marília, cujo maior orgulho era ver o sucesso e a felicidade dos seus netos."

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação não seria possível sem a colaboração e o suporte de diversas pessoas importantes em minha vida, desta forma deixo meus agradecimentos:

À Deus, por sempre me abençoar e proporcionar oportunidades incríveis para mim.

À minha família, que é a base de tudo. Meus pais, Cristovão e Cristina, sem vocês eu não seria a pessoa que me tornei, obrigado por estarem sempre comigo e por todo amor e dedicação em minha vida. Minha irmã, Rebeca, por sempre me apoiar e ser um espelho para mim. E minha noiva, Camila, por estar ao meu lado diariamente, me dando forças para acreditar que sempre é possível alcançar nossos sonhos.

À minha empresa, TIM, e todos os meus colegas que de alguma forma acreditaram e contribuíram com este projeto. Em especial, Fernando Fruchi, sua vasta experiência e amplo conhecimento foram fundamentais para a construção deste trabalho. E ao meu gestor, Maurício Vianna, por todo o suporte e incentivo durante este período.

Ao meu orientador, professor Dr. Maurício, por acreditar no potencial deste trabalho e por todos os valiosos ensinamentos e apoio durante o mestrado, e finalmente, ao CEFET/RJ, responsável pela minha formação acadêmica e profissional e que se tornou uma segunda casa para mim.

RESUMO

Análise Crítica sobre Capacidade 5G utilizando KPIs Práticos

Rômulo Torres Serra

Orientador:
Maurício Henrique Costa Dias

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – CEFET/RJ como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Enhanced mobile broadband (eMBB) é um dos três grandes cenários operacionais do 5G e aquele que mais impacta diretamente o usuário médio de telefonia móvel, portanto o planejamento de capacidade é um aspecto fundamental para uma excelente experiência do usuário. A partir disso, o 3GPP estabeleceu na TS 38.306 um modelo teórico que estima valores máximos de *throughput*. No entanto, essa equação apresenta algumas questões quando se trata de uma análise de uso real, pois a capacidade é monitorada, na prática, por indicadores chave de desempenho (KPIs) que não correspondem inteiramente aos parâmetros de entrada. Dentro desse contexto, esta dissertação apresenta uma proposta de estudo de capacidade, a partir do modelo teórico do 3GPP, porém incorporando KPIs práticos a ele. Alguns testes foram realizados em diferentes cenários de uso, comparando o *throughput* medido com previsões, utilizando uma proposta de versão híbrida do modelo do 3GPP. Uma boa correlação entre previsões e medições reais foi observada em relação à variação do *throughput* por hora. Também pôde-se notar que, considerando o uso real da largura de banda disponível, em substituição à utilização total de PRBs (*Physical Resource Blocks*), a aplicação de um fator de escala multiplicativo pode otimizar as previsões, levando a uma boa convergência com as medições.

Palavras-chave:
5G; *Throughput*; Capacidade; 3GPP; CQI.

Rio de Janeiro,
Outubro de 2024

ABSTRACT

Critical Analysis of 5G Capacity using Practical KPIs

Rômulo Torres Serra

Advisor:
Maurício Henrique Costa Dias

Abstract of dissertation submitted to Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca CEFET/RJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

Enhanced mobile broadband (eMBB) is one of the three major operating scenarios of 5G and the one that most directly impacts the average mobile phone user, so capacity planning is a fundamental aspect of an excellent user experience. From this, 3GPP established in TS 38.306 a theoretical model that estimates maximum throughput values. However, this equation presents a few issues if real usage analysis is intended, because capacity is tracked, in practice, by key performance indicators (KPIs) that do not correspond entirely to the input parameters. Within such context, this dissertation proposes a capacity study, based on the 3GPP theoretical model, but incorporating practical KPIs into it. Some tests were carried out in different usage scenarios, comparing the measured throughput with predictions using a proposed hybrid version of the 3GPP model. Good correlation between predictions and measurements was observed regarding the hourly throughput variation. It was also noted that, considering the actual usage of the available bandwidth instead of the full usage of PRBs (Physical Resource Blocks), the application of a multiplicative scaling factor can optimize the predictions, leading to good convergence with measurements.

Keywords:
5G; Throughput; Capacity; 3GPP; CQI.

Rio de Janeiro,
October 2024

SUMÁRIO

1. Introdução 14
   1.1 – Escopo e motivação 15
   1.2 – Estado da arte 15
   1.3 – Objetivo 17
   1.4 – Organização 17
2. Fundamentos 19
   2.1 – Aspectos do 5G 19
      2.1.1 – *Link budget* 19
      2.1.2 – Forma de onda e escolha do esquema de modulação 21
      2.1.3 – *Physical resource block, numerology* e *sub-carrier spacing* 23
   2.2 – Capacidade e equação de cálculo do *throughput* máximo 5G 25
      2.2.1 – Breve visão sobre capacidade no 5G 25
      2.2.2 – Equação de cálculo do *throughput* máximo 5G 26
   2.3 – KPIs práticos do 5G 27
      2.3.1 – CQI 27
      2.3.2 – Outros KPIs práticos utilizados 29
   2.4 – Relação entre o CQI e a eficiência espectral 29
3. Metodologia de Trabalho 32
   3.1 – Preparação do estudo 32
   3.2 – Descrição dos cenários de testes 32
      3.2.1 – Cenário 1: Praia de Copacabana 33
      3.2.2 – Cenário 2: Avenida Abelardo Bueno 35
      3.2.3 – Cenário 3: Bondinho do Pão de Açucar 36
      3.2.3 – Cenário 4: *New York City Center* 38
   3.3 – Descrição da metodologia 39
4. Desenvolvimento 41
   4.1 – Tráfego regular geral 41
      4.1.1 – *Throughput* no *downlink* 41
      4.1.2 – *Throughput* no *uplink* 49
   4.2 – Tráfego durante dia extraordinário 52
      4.2.1 – Evento na Praia de Copacabana 52
      4.2.2 – Evento na Arena da Avenida Abelardo Bueno 55
      4.2.3 – Evento no Morro da Urca 57
   4.3 – Conclusões parciais 60
5. Considerações Finais 61

Referências Bibliográficas 64

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Classificação de alto nível dos cenários de uso do 5G 14
Figura 2 – Exemplo de planilha modelo de link budget 5G (TIM BRASIL, 2021) 20
Figura 3 – Símbolo CP-OFDM, com um prefixo cíclico (BURITICA, 2019) 22
Figura 4 – Comparação em tempo e frequência do OFDM com DFT-S-OFDM (BURITICA, 2019) 23
Figura 5 – Estrutura de quadro para o 5G NR demonstrando os SCSs de 3,75 kHz; 7,5 kHz; 30 kHz; 60kHz (YUAN, WANG, 2017). 24
Figura 6 – Estrutura em ninho para o PRB (YUAN, WANG, 2017) 25
Figura 7 – SE versus CQI: dados da Tabela 2 e ajuste proposto 31
Figura 8 – Localização da gNodeB 1 na praia de Copacabana 34
Figura 9 – Localização da gNodeB 2 na Avenida Abelardo Bueno 35
Figura 10 – Localização da gNodeB 3 no bondinho do Pão de Açúcar 37
Figura 11 – Localização da gNodeB 4 no shopping New York City Center 39
Figura 12 – Variação horária dos valores teóricos e das medições reais de throughput do cenário 1 no downlink em 3 de maio de 2024 42
Figura 13 – Variação horária dos valores teóricos e das medições reais de throughput do cenário 1 no downlink em 6 de maio de 2024 42
Figura 14 – Variação horária dos valores teóricos e das medições reais de throughput do cenário 2 no downlink em 6 de maio de 2024 43
Figura 15 – Variação horária dos valores teóricos e das medições reais de throughput do cenário 2 no downlink em 7 de maio de 2024 43
Figura 16 – Variação horária dos valores teóricos e das medições reais de throughput do cenário 3 no downlink em 17 de abril de 2024 44
Figura 17 – Variação horária dos valores teóricos e das medições reais de throughput do cenário 3 no downlink em 25 de abril de 2024 44
Figura 18 – Variação horária dos valores teóricos e das medições reais de throughput do cenário 4 no downlink em 18 de julho de 2024 45
Figura 19 – Variação horária dos valores teóricos e das medições reais de throughput do cenário 4 no downlink em 19 de julho de 2024 45
Figura 20 – Variação horária dos valores teóricos ajustados com um fator de escala único (75) e das medições reais de throughput do cenário 1 no downlink em 3 de maio de 2024 46
Figura 21 – Variação horária dos valores teóricos ajustados com um fator de escala único (83,33) e das medições reais de throughput do cenário 1 no downlink em 6 de maio de 2024 46
Figura 22 – Variação horária dos valores teóricos ajustados com um fator de escala único (150) e das medições reais de throughput do cenário 2 no downlink em 6 de maio de 2024 47
Figura 23 – Variação horária dos valores teóricos ajustados com um fator de escala único (175) e das medições reais de throughput do cenário 2 no downlink em 7 de maio de 2024 47
Figura 24 – Variação horária dos valores teóricos ajustados com um fator de escala único (66,67) e das medições reais de throughput do cenário 3 no downlink em 17 de abril de 2024 47
Figura 25 – Variação horária dos valores teóricos ajustados com um fator de escala único (37,5) e das medições reais de throughput do cenário 3 no downlink em 25 de abril de 2024 48
Figura 26 – Variação horária dos valores teóricos ajustados com um fator de escala único (31,1) e das medições reais de throughput do cenário 4 no downlink em 18 de julho de 2024 48
Figura 27 – Variação horária dos valores teóricos ajustados com um fator de escala único (53,33) e das medições reais de throughput do cenário 4 no downlink em 19 de julho de 2024 48
Figura 28 – Teste em tempo real de estresse máximo de uma célula a partir de speedtests realizados por um UE em um período curto 49

Figura 29 – Variação horária dos valores teóricos e das medições reais de throughput do cenário 1 no uplink em 3 de maio de 2024 50
Figura 30 – Variação horária dos valores teóricos e das medições reais de throughput do cenário 2 no uplink em 7 de maio de 2024 51
Figura 31 – Variação horária dos valores teóricos e das medições reais de throughput do cenário 4 no uplink em 18 de julho de 2024 51
Figura 32 – Variação horária do throughput teórico, ajustado com diferentes fatores de escala por hora, e das medições reais de throughput do cenário 1 no downlink em 4 de maio de 2024 53
Figura 33 – Variação horária do throughput teórico e das medições reais de throughput do cenário 1 no uplink em 4 de maio de 2024 53
Figura 34 – Variação horária do throughput teórico, ajustado com diferentes fatores de escala por hora, e das medições reais de throughput do cenário 2 no downlink em 8 de maio de 2024 55
Figura 35 – Variação horária do throughput teórico e das medições reais de throughput do cenário 2 no uplink em 8 de maio de 2024 57
Figura 36 – Variação horária do throughput teórico, ajustado com diferentes fatores de escala por hora, e das medições reais de throughput do cenário 3 no downlink em 20 de abril de 2024 58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Numerologies de transmissão suportados (3GPP, 2022) 24
Tabela 2 – Tabela de CQI para 256-QAM (3GPP, 2017a) 30
Tabela 3 – Parâmetros de configuração utilizados na gNodeB 1 34
Tabela 4 – Parâmetros de configuração utilizados na gNodeB 2 36
Tabela 5 – Parâmetros de configuração utilizados na gNodeB 3 38
Tabela 6 – Parâmetros de configuração utilizados na gNodeB 4 39
Tabela 7 – Throughput híbrido previsto e fatores de escala observados na gNodeB do cenário 1 no downlink em 4 de maio de 2024 54
Tabela 8 – Throughput híbrido previsto e fatores de escala observados na gNodeB do cenário 2 no downlink em 8 de maio de 2024 56
Tabela 9 – Throughput híbrido previsto e fatores de escala observados na gNodeB do cenário 3 no downlink em 20 de abril de 2024 59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3GPP	*3rd Generation Partnership Project*
AMR	*Adaptative Multirate*
BLER	*Block Error Rate*
BW	*Bandwidth*
CP	*Cyclic Prefix*
CP-OFDM	*Cyclic Prefix-Orthogonal Frequency Division Multiplexing*
CQI	*Channel Quality Indicator*
DFT-S-OFDM	*Discrete Fourier Transform-Spread-Orthogonal Frequency Division Multiplexing*
DSS	*Dynamic Spectrum Sharing*
EIRP	*Effective Isotropic Radiated Power*
eMBB	*Enhanced Mobile Broadband*
FDD	*Frequency Division Duplex*
FDM	*Frequency Division Multiplexing*
HARQ	*Hybrid Automatic Repeat Request*
IoT	*Internet of Things*
KPI	*Key Performance Indicator*
LTE	*Long-Term Evolution*
MAPL	*Maximum Allowed Path Loss*
MCS	*Modulation and Coding Scheme*
MIMO	*Multiple Input Multiple Output*
mMTC	*Massive Machine-Type Communication*
NACK	*Negative Acknowledgment*
NR	*New Radio*
OFDM	*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*
OFDMA	*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*
PAPR	*Peak-to-Average Power Ratio*
PRB	*Physical Resource Block*
PUCCH	*Physical Uplink Control Channel*
QoS	*Quality of Service*
RB	*Resource Block*
RF	*Radio Frequency*

RSRP	*Reference Signal Received Power*
SCS	*Subcarrier Spacing*
SE	*Spectral Efficiency*
SINR	*Signal to Interference plus Noise Ratio*
SNR	*Signal-to-Noise Ratio*
TDD	*Time Division Duplex*
TDM	*Time Division Multiplexing*
UE	*User Equipment*
URLLC	*Ultra-Reliable and Low-Latency Communication*

1. Introdução

As demandas na área de comunicações móveis foram crescendo gradativamente com o advento de novas tecnologias, tendo início com a possibilidade de se realizar chamadas de voz de qualquer local sem fio, em seguida com a chegada das mensagens de texto, envio de arquivos de mídia como sons e imagens até a ascensão da terceira geração na qual efetivamente a navegação na internet via celular se consolidou, reforçando a necessidade cada vez maior de um planejamento e um dimensionamento correto da rede para atender as necessidades do usuário final.

O planejamento de redes é uma tarefa complexa que envolve uma série de aspectos importantes a serem considerados, e dentro desse contexto, calcular o *link budget* com dados consistentes e uma variedade de parâmetros é essencial para um melhor dimensionamento. Nesse ponto é feito um estudo teórico que permite o cálculo da potência final ao longo de todo o percurso entre a transmissão e a recepção, considerando a potência de transmissão, as diversas perdas dos equipamentos, os ganhos das antenas e amplificadores e os efeitos de propagação. Diferentes cálculos são feitos considerando *downlink* e *uplink*, devido à distinção dos parâmetros em cada direção de transmissão. Parte fundamental em todas as gerações, o cálculo de enlace se tornou ainda mais importante com a chegada do 5G, graças ao seu maior número de funcionalidades e à alta demanda de tráfego de dados exigida.

O 5G possui três cenários de uso principais de grande destaque: altíssimas velocidades (*enhanced mobile broadband* – eMBB), conexão massiva de dispositivos (*massive machine-type communication* – mMTC), e baixíssimo tempo de resposta com alta confiabilidade (*ultra-reliable and low-latency communication* – URLLC), conforme ilustrado pela Figura 1.

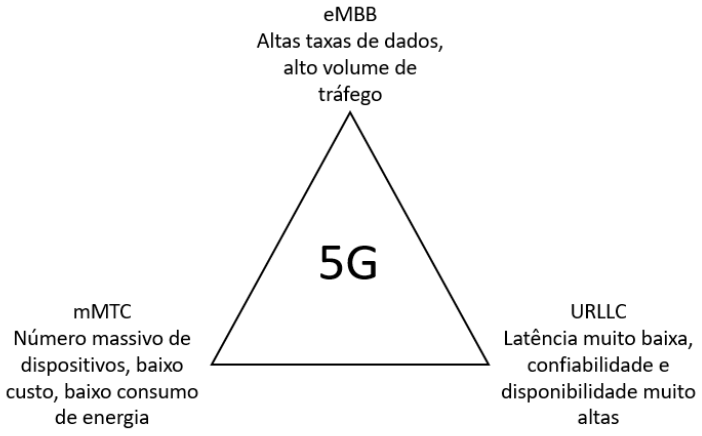


Figura 1 – Classificação de alto nível dos cenários de uso do 5G

Dentro do cenário de eMBB se encontra o estudo e dimensionamento de capacidade, parte importante na elaboração do *link budget* e um dos principais aspectos a serem considerados no planejamento e engenharia de redes móveis, se tornando um requisito fundamental a fim de oferecer uma experiência satisfatória do cliente.

1.1 – Escopo e motivação

Planejar a capacidade da rede é um processo complexo que requer um estudo detalhado relacionado à cada cenário de atendimento. Muitos fatores são considerados, tais como: o comportamento do usuário, o local de atendimento, o volume esperado de tráfego e a infraestrutura de rede física disponível. Ter uma visão completa de todos os fatores é importante para atender à alta demanda exigida pelo 5G e para isso é necessário um controle prévio. Portanto, realizar uma análise preditiva é fundamental para um dimensionamento eficaz que irá proporcionar um serviço de qualidade ao cliente da operadora.

Partindo disso os estudos teóricos são a base para as predições realizadas. Por meio de um conjunto de dados históricos e valores de configuração, somados à aplicação de fórmulas, é possível mensurar determinados valores que servem como parâmetros para a tomada de decisões estratégicas sobre expansão de cobertura e reforço de capacidade.

O 3GPP recomenda o uso de uma equação teórica para o cálculo do *throughput* máximo na TS 38.306 como base para estudos de capacidade no planejamento de redes de acesso 5G. Apesar de atender ao propósito nos estágios iniciais de planejamento, essa equação apresenta alguns problemas se for utilizada para análises de uso real ou previsões baseadas nesse uso real. Alguns dos parâmetros da equação não são rastreados diretamente pela célula ou pela gNodeB como o número de *layers*, o índice de modulação, o *code rate*; em vez disso o *throughput* é medido por meio de alguns indicadores chave de desempenho (KPIs) que não estão presentes diretamente na equação.

1.2 – Estado da arte

A equação teórica é constituída por parâmetros constantes advindos basicamente de valores de configuração dos equipamentos da rede, além de banda e frequência utilizadas, fornecendo resultados que estimam apenas valores máximos fixos de *throughput* que são importantes em uma

análise inicial, porém não permitem um acompanhamento contínuo dos resultados conforme uso real. Alguns estudos demonstram que existem indicadores que possuem correlação com o *throughput* e podem otimizar as análises teóricas. Nasri e Hamdi (2019) corroboram a visão que, em gestão de alto nível em empresas de telecomunicações, sempre é preciso monitorar a satisfação do cliente em relação ao crescimento da base de assinantes e os investimentos que estão sendo feitos para expandir os recursos de rede. Grandes operadoras investem muito nas áreas comerciais cujo foco é tentar ampliar rapidamente a base de clientes e consequentemente a sua receita, isso gera um impacto na rede com um aumento massivo de tráfego. Se o dimensionamento dos recursos da rede e a sua expansão não é feita de forma adequada, será oferecida uma experiência ruim para o usuário. Portanto, monitorar e prever a correlação entre o tráfego e o *throughput* médio do usuário é fundamental para avaliar se existe uma boa percepção com a expansão da rede. Uma informação precisa sobre o uso real permite que a equipe de *marketing* personalize ofertas e sugira serviços que cumpram o mínimo e o máximo de tráfego suportado.

Martínez *et al.* (2021) indicam que o *throughput* varia de acordo com o volume de tráfego na célula, e que a capacidade da célula possui uma correlação direta com a largura de banda e a eficiência espectral. Além disso, apesar da eficiência espectral ser um valor que não pode ser medido, ela possui uma relação importante com o CQI (*Channel Quality Indicator*), um KPI com histórico de medições fundamental nesta análise.

Mu *et al.* (2013) apresentam um estudo no qual ambientes com reforço de cobertura por *small cells* são importantes no aumento da capacidade para atender à demanda crescente de tráfego. Nesses ambientes, devido à alta SINR (*Signal to Interference plus Noise Ratio*), é possível uma configuração com modulação de ordem superior em até 256 QAM, melhorando assim a eficiência espectral. Nesse cenário, o CQI é um parâmetro fundamental para apoiar esse aumento da ordem de modulação.

De acordo com a 3GPP (2017a) em seu TS 36.213, há uma correlação direta entre o CQI e o produto de dois parâmetros da equação do *throughput* teórico máximo, o índice de modulação e o *code rate*, representada em uma tabela disponível naquele documento, e Kim (2015) demonstra que esse produto corresponde à eficiência espectral.

Wang, Liu e Fang (2020) reforçam que, no sistema de comunicação móvel 5G, a estação base realiza a codificação e a modulação adaptativa com base nas informações de estado do canal (CSI) realimentadas pelo usuário, melhorando a eficiência espectral a partir da seleção de diferentes combinações de tipos de modulação e taxas de código, justamente os dois parâmetros da equação teórica. O princípio básico é ajustar os métodos de codificação e modulação de acordo com as atuais mudanças na qualidade do canal dentro dos limites do sistema e maximizar a taxa

de transmissão de dados sem perda de qualidade.

Por fim, Fan *et al.* (2011) investigam a alocação adaptativa de *resource blocks* (RBs) para transmissão por *downlink* em redes OFDMA. Esse esquema é desenvolvido para maximizar o *throughput* da rede em geral por meio da alocação adequada dos RBs e de potência para usuários distintos. Na equação original, o número de alocação de RBs também está presente, mas principalmente no sentido de utilização máxima. Na prática, porém, essa alocação é dinâmica. Portanto, no que diz respeito à análise de utilização real, em substituição a um valor máximo fixo, deve ser considerado um KPI real que rastreie essa alocação regularmente ao longo do tempo.

1.3 – Objetivo

O objetivo deste trabalho é analisar alguns casos de dados reais de *throughput* no âmbito do modelo teórico do 3GPP, porém incorporando KPIs práticos a ele. Para isso, foram realizados alguns estudos de caso com medições de *throughput* de algumas gNodeBs localizadas na cidade do Rio de Janeiro. Alguns cenários distintos foram observados, como um ambiente de um evento extraordinário (concerto de música ao ar livre) com um alto número de usuários conectados simultaneamente, causando um aumento efetivo de tráfego na região. Em contrapartida, há também uma análise do tráfego normal típico da localidade. Também foram consideradas medições de um ambiente *indoor* para efeitos de comparação em comportamento. As previsões híbridas usando o modelo teórico alimentado por dados reais de KPIs específicos foram derivadas e comparadas com os *throughputs* reais medidos.

1.4 – Organização

Após a Introdução, esta dissertação é estruturada da seguinte forma: o Capítulo 2, “Fundamentos”, fornece alguns aspectos importantes sobre o 5G e porque eles influenciam diretamente no desenvolvimento desta pesquisa. Além disso, apresenta a fórmula teórica para cálculo de *throughput* máximo com uma breve descrição dos seus parâmetros e detalha os KPIs práticos e a relação desses com a análise de capacidade.

O Capítulo 3, “Metodologia de Trabalho”, diz respeito à estratégia utilizada para esta abordagem, enumerando o que foi realizado para alcançar o objetivo. Nesse capítulo, são descritos a origem dos dados, a forma de coleta desses dados, os cenários observados para estudo de caso e

a abordagem para o tratamento e apresentação dos resultados.

O Capítulo 4, “Desenvolvimento”, apresenta e analisa os testes feitos, como foi feita a escolha da realização das predições, além de algumas conclusões parciais a respeito do estudo.

O Capítulo 5, “Considerações Finais”, conclui o trabalho, com uma breve descrição do que foi realizado, apresentando as contribuições e estabelecendo ideias para análises e trabalhos futuros.

2. Fundamentos

Com o objetivo de elucidar alguns conceitos importantes para este trabalho, o capítulo é composto por 4 seções: a seção 2.1, “Aspectos do 5G”, enuncia e fornece um breve resumo sobre alguns aspectos relacionados ao 5G que são muito importantes nesta análise. A seção 2.2, “Capacidade e Equação de cálculo do *throughput* máximo 5G”, apresenta uma visão geral sobre o estudo de capacidade e a equação padrão do 3GPP para cálculo do *throughput* máximo teórico, com a descrição dos parâmetros que compõem essa fórmula. A seção 2.3, “KPIs práticos do 5G”, apresenta os KPIs práticos nos quais foram coletadas as medições reais e são a base para a proposta de adequação da equação teórica e finalmente a seção 2.4 “Relação entre o CQI e a eficiência espectral”, encerra o capítulo trazendo um ponto fundamental desta pesquisa que é a relação entre o CQI e dois parâmetros da fórmula.

2.1 – Aspectos do 5G

Ter um embasamento teórico sobre alguns conceitos relacionados à telefonia móvel, em especial sobre análises e estudos de capacidade de redes de quinta geração, é fundamental para que as adequações propostas sejam bem-sucedidas. Além disso, contribui para um melhor entendimento nas análises de dados e conclusões a partir dos testes realizados. Nos próximos subtópicos segue uma breve apresentação de alguns aspectos e conceitos do 5G.

2.1.1 – *Link budget*

O *link budget* ou balanço de enlace é definido, em resumo, por Fontán e Espiñeira (2008) como o cálculo final de potência em todo o percurso entre a transmissão e a recepção, considerando a potência de transmissão, as diversas perdas em equipamentos (da estação base e do usuário), ganhos de antenas, de amplificadores e efeitos da propagação. O principal objetivo dessa análise é determinar a perda de percurso máxima permitida ou MAPL (*Maximum Allowed Path Loss*), fundamental para avaliar o alcance prático em uma célula e estimar os níveis de cobertura desejados.

São realizados cálculos separadamente para *downlink* e *uplink*, dada a distinção dos parâmetros de cada sentido de transmissão. Essa distinção é fundamental para balancear a potência

e minimizar a diferença do alcance nas duas direções. Algumas considerações importantes para o *link budget* são: o ambiente da célula, a utilização da codificação AMR (*Adaptative Multirate*) para o serviço de chamadas e a homogeneidade dos parâmetros ao longo da célula (CHEVALIER *et al*., 2006). A Figura 2 ilustra uma planilha típica utilizada por fornecedores de equipamentos e operadoras de telefonia móvel para esse tipo de cálculo.

INPUT					
Frequência [MHz]	**3500**				
Largura de Banda do Canal [MHz]	**80**				
Espaçamento de Subportadora (SCS) [kHz]	**30**				
Throughput Usuario DL na borda da Célula [Mbps]	**30,0**				
Modo de Duplexação	**TDD**				
OUTPUT					
DL SNR [dB]	**0,0**				
UL SNR [dB]	**-6,7**				
Sensibilidade Rx DL [dBm] - UE	**-81,8**				
Sensibilidade Rx UL [dBm] - ERB	**-118,1**				
Perdas de Percurso [dB] indoor	117,8	125,3	129,8	133,8	147,3
Limiar de Campo [dBuV/m] Indoor	**105**	**97**	**93**	**89**	**75**
Limiar de Potência [dBm] Indoor	-43	-51	-55	-59	-73
Limiar RSRP [dBm] Indoor BOOST	-77	-85	-89	-93	-107
Perdas de Percurso [dB] outdoor	137,8	138,8	140,8	142,8	146,8
Limiar de Campo [dBuV/m] Outdoor	**85**	**84**	**82**	**80**	**76**
Limiar de Potência [dBm] Outdoor	-63	-64	-66	-68	-72
Limiar RSRP [dBm] Outdoor BOOST	-97	-98	-100	-102	-106
DL	**Urbano Denso**	**Urbano**	**Suburbano**	**Rural**	**Aberto**
UE					
Potência Mínima de Rx [dBm]	-81,8				
Margens e Ganhos e Perdas do UE					
Ganho da Antena Rx [dBi]	0,0				
Perdas do Alimentador Rx [dB]	0,0				
Margem de Interferência [dB]	3,0				
Perdas de Corpo/Mãos [dB]	2,0				
Margem de Sombreamento e Indoor [dB]	33,5	26,0	21,5	17,5	4,0
Margem de Sombreamento [dB]	13,5	12,5	10,5	8,5	4,5
Margens [dB] INDOOR	38,5	31,0	26,5	22,5	9,0
Potência Min Rx+Marg [dBm] INDOOR	-43,3	-50,8	-55,3	-59,3	-72,8
Margens [dB] OUTDOOR	18,5	17,5	15,5	13,5	9,5
Potência Min Rx+Marg [dBm] OUTDOOR	-63,3	-64,3	-66,3	-68,3	-72,3
Estação Base					
Potência de Tx [dBm]	50,0				
Ganho da Antena de Tx [dBi]	24,5				
Perdas do Alimentador Tx [dB]	0,0				
EIRP [dBm]	74,5				
Output					
Perdas de Percurso [dB] INDOOR	**117,8**	**125,3**	**129,8**	**133,8**	**147,3**
Perdas de Percurso [dB] OUTDOOR	**137,8**	**138,8**	**140,8**	**142,8**	**146,8**
Altura Antena ERB [m]	30,0				
Altura Antena UE [m]	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Balanço de Potência Tx DL [dBm]	50,0				
Potência de Referência Tx [dBm]	50,0				
Canais de Controle MAPL [dB]	**119,1**				

Figura 2 – Exemplo de planilha modelo de *link budget* 5G (TIM BRASIL, 2021)

A planilha em questão é um exemplo de cálculo para o *downlink* e é composta por alguns parâmetros divididos em blocos de referência. Os parâmetros de *input* são relativos aos aspectos básicos de operação da estação base 5G NR em questão: a frequência, a largura de banda do canal

disponível, o espaçamento de subportadora (SCS), o *throughput* médio do usuário na borda da célula em *downlink* e o modo de duplexação utilizado. Dentre os parâmetros de *output* estão: a relação sinal-ruído para *downlink* e *uplink*, a sensibilidade de recepção no UE e na estação base, e mais quatro parâmetros observados em ambientes *indoor* e *outdoor* que são as perdas de percurso (variam com o tipo de cenário), os limiares de campo, os limiares de potência e os limiares de potência recebida do sinal de referência (RSRP). Os parâmetros relacionados ao equipamento do usuário são: potência mínima de recepção, ganho da antena de recepção, perda de recepção do alimentador (que indica a perda de sinal causada por vários dispositivos localizados no caminho da antena até o receptor), margem de interferência, perdas pelo corpo e pelas mãos, margem de sombreamento, além das potências mínimas de recepção com uma margem para ambientes *indoor* e *outdoor*. Os parâmetros da estação base são: potência de transmissão, ganho da antena de transmissão, as perdas de transmissão do alimentador, e a potência isotrópica efetiva radiada (EIRP). Finalmente, são consideradas as alturas das antenas da estação base e do UE, o balanço de potência de transmissão, a potência de referência de transmissão, e a perda de percurso máxima permitida para os canais de controle.

Talvez a principal dificuldade na implementação do 5G seja atender aos três cenários distintos (eMBB, mMTC e URLLC) simultaneamente, pois cada um deles exige análises específicas que influenciam inclusive na forma em que será realizado o cálculo de balanço de enlace. É um grande desafio realizar o dimensionamento desse sistema com as demandas distintas de cada cenário, levando também em consideração as características do ambiente (urbano denso, urbano, suburbano, rural e aberto) e as demais inovações tecnológicas incorporadas. Dentro deste contexto, o estudo de capacidade é um dos aspectos fundamentais no escopo do *link budget*.

2.1.2 – Forma de onda e escolha do esquema de modulação

A escolha do esquema de modulação influencia diretamente na relação sinal-ruído, na largura de banda do canal e no *throughput*. A partir disso, também é possível estimar a eficiência espectral do sistema. Com a evolução das comunicações móveis, pesquisadores têm investigado diversas formas de onda multiportadoras nos últimos anos, e algumas propostas já estão sendo utilizadas visando a engenharia de acesso no 5G.

Formas de onda que utilizam multiplexação por divisão de frequências ortogonais, o OFDM, funcionam bem com operação de duplexação por divisão de tempo. Elas suportam aplicações sensíveis a atraso e demonstraram sucesso na implementação comercial com

processamento eficiente de sinais com as maiores larguras de banda já utilizadas (BURITICA, 2019). Além disso, a alta eficiência espectral e a compatibilidade com a tecnologia MIMO dos sinais OFDM ajudam a alcançar altas taxas de transmissão de dados e a cobertura necessária para atender às demandas do 5G.

Graças às técnicas de estimativa de canal e às técnicas de equalização, formas de onda OFDM demonstram grande resiliência em canais sujeitos a desvanecimento seletivo em frequência. Ao anexar uma cópia do símbolo OFDM ao início do símbolo, um exemplo de prefixo cíclico, um receptor pode tolerar melhor os erros de sincronização e evitar a interferência intersimbólica, como ilustra a Figura 3. Logo, o 3GPP estabeleceu o uso do prefixo cíclico OFDM (CP-OFDM) como a forma de onda para o *downlink* no 5G e *uplink* para esquemas de modulação a partir de 256-QAM.

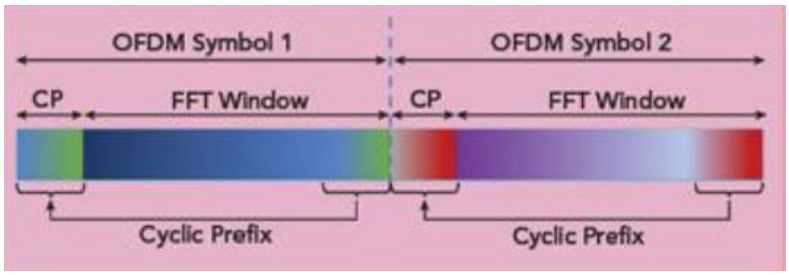


Figura 3 – Símbolo CP-OFDM, com um prefixo cíclico (BURITICA, 2019)

Formas de onda OFDM sofrem com altas taxas de potência de pico em relação à potência média (PAPR). Como o amplificador de potência de RF consome a maior parte da energia de um dispositivo móvel, foi necessário escolher, para o 5G, uma forma de onda que suportasse a operação de um amplificador de alta eficiência e que atendesse às altas demandas espectrais do sistema.

Para o *uplink*, o 5G oferece ao terminal a opção de utilizar CP-OFDM ou um formato híbrido de forma de onda chamado de distribuição discreta da transformada de Fourier OFDM (DFT-S-OFDM). Utilizando DFT-S-OFDM, o transmissor modula todas as subportadoras com os mesmos dados, conforme ilustra a Figura 4. Isso reduz as taxas de PAPR, mantendo a resiliência com as interferências por multipercurso e a alocação de frequência de subportadora flexível que o OFDM fornece (BURITICA, 2019).

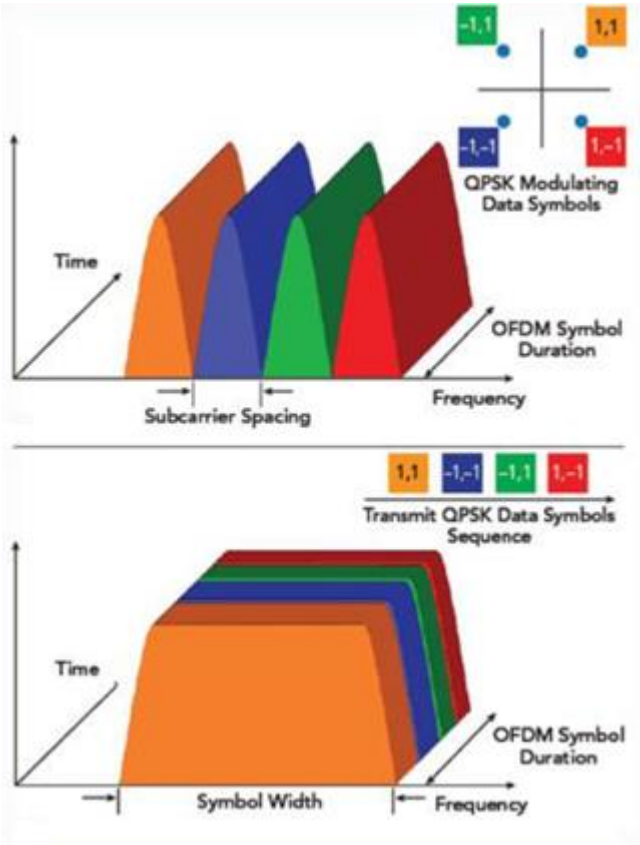


Figura 4 – Comparação em tempo e frequência do OFDM com DFT-S-OFDM (BURITICA, 2019)

2.1.3 – *Physical resource block, numerology* e *sub-carrier spacing*

O termo PRB (*Physical Resource Block*) existe nas interfaces aéreas 4G LTE e 5G NR. O PRB no LTE é composto por 12 subportadoras consecutivas com duração de um *slot* (0,5 ms). Em contraste, o PRB no NR define apenas o domínio da frequência, ou seja, 1 PRB equivale a 12 subportadoras, com o espaçamento entre as subportadoras baseado no *numerology*.

Uma definição simples do *numerology*, baseada na descrição da 3GPP TS 38.211 seria o "tipo de espaçamento de subportadora" também frequentemente chamado de SCS. No LTE não é necessária nenhuma terminologia específica para indicar o SCS, pois existe apenas o valor de 15 kHz, porém no 5G existem algumas opções de espaçamento.

De acordo com o *release* 17 (3GPP, 2022), existem 7 *numerologies* disponíveis, conforme reproduzido na Tabela 1. Seriam possíveis valores adicionais se forem suportadas frequências muito mais altas em ondas milimétricas em *releases* futuros.

Tabela 1 – *Numerologies* de transmissão suportados (3GPP, 2022)

μ	$\Delta f = 2^{\mu} \cdot 15$ [kHz]	**Prefixo Cíclico**
0	15	Normal
1	30	Normal
2	60	Normal, Extendido
3	120	Normal
4	240	Normal
5	480	Normal
6	960	Normal

As estruturas de símbolo em 3,75 kHz; 7,5 kHz; 15 kHz; 30 kHz e 60 kHz para uma família de CP normal podem ser observadas na Figura 5. Yuan e Wang (2017) mostram que é possível observar nos casos de 30 kHz e 60 kHz, que todos os símbolos OFDM dentro do 0,5 ms, exceto os primeiros, possuem o mesmo tamanho. O 5G enfrenta a questão de como multiplexar diferentes *numerologies*, e para reduzir a complexidade e a fragmentação, uma estrutura em ninho é adotada e pode ser aplicada em casos em que os PRBs de diferentes *numerologies* são multiplexados em TDM ou FDM, conforme ilustrado na Figura 6. A estrutura do quadro no NR deve fornecer maior flexibilidade de alocação, independentemente do tipo de multiplexação.

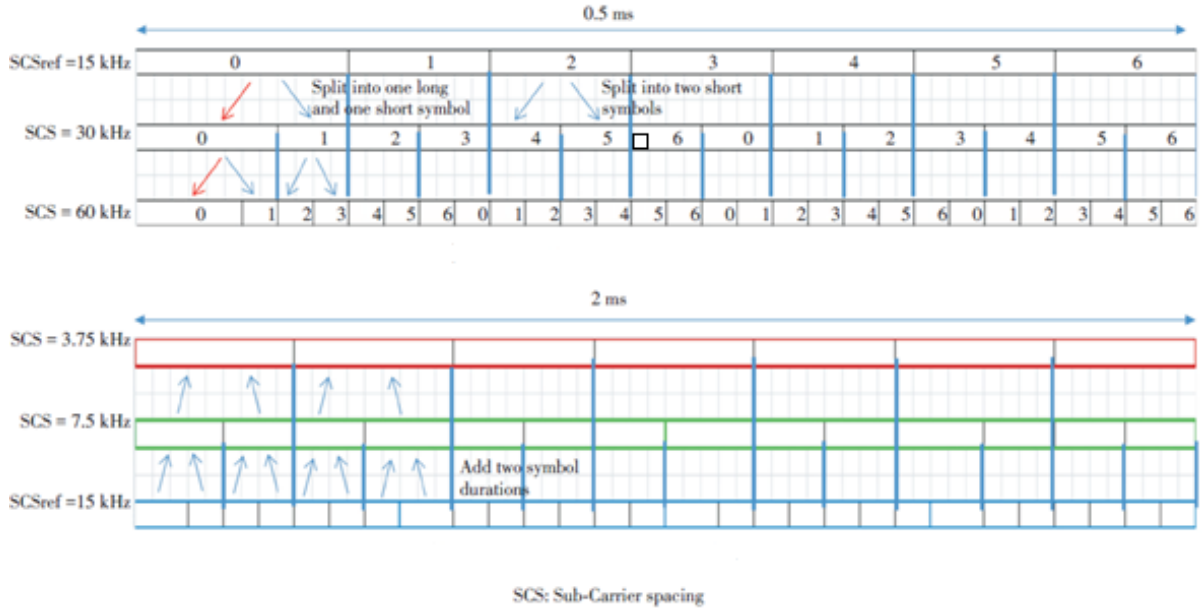


Figura 5 – Estrutura de quadro para o 5G NR demonstrando os SCSs de 3,75 kHz; 7,5 kHz; 30 kHz; 60kHz (YUAN, WANG, 2017).

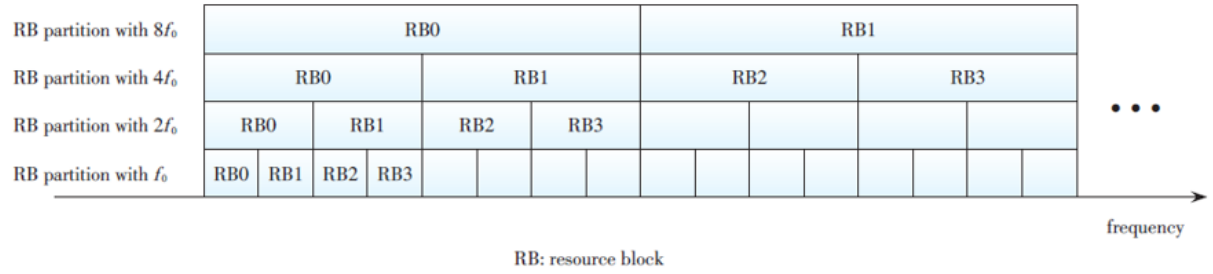


Figura 6 – Estrutura em ninho para o PRB (YUAN, WANG, 2017)

2.2 – Capacidade e equação de cálculo do *throughput* máximo 5G

2.2.1 – Breve visão sobre capacidade no 5G

Loung, Ngah e Han (2021) demonstram que a principal proposta do 5G é permitir um aumento substancial na capacidade com utilização eficiente de todos os recursos possíveis. Com base na conhecida Teoria de Shannon, a capacidade C do canal pode ser expressa pela Equação (1):

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N}\right) \text{ (bps)}, \quad (1)$$

onde C corresponde à capacidade do canal (bits por segundo), B é a largura de banda do canal (Hz), S é a potência média do sinal recebido (W), N é a potência média do ruído (W) e S/N equivale à relação sinal-ruído do sinal de comunicação para o ruído e a interferência no receptor.

A partir da Equação (1), é possível calcular a capacidade total do sistema que é equivalente à soma de capacidade de todos os canais e redes heterogêneas (*Hetnets*). Alguns exemplos de *Hetnets* são *macrocells, microcells, small cells, relays* e *Femtocell* que podem ser implementadas para reforçar a cobertura. Aumentar o número de canais utilizando sistemas MIMO, também permite um aumento de capacidade. Dentre as possibilidades para otimizar C estão: a modulação espacial (com o aumento do número de antenas transmissoras que podem mitigar a interferência entre canais), a sincronização entre antenas, e múltiplas cadeias de RF em sistemas MIMO convencionais.

O 5G aumenta significativamente a demanda por capacidade se beneficiando de novas tecnologias como *network slicing*, gerenciamento de espectro e utilização de maiores larguras de

banda, alocando maiores recursos de frequência a fim de aprimorar a experiência do usuário. Melhorando os recursos de capacidade e a largura de banda, é possível otimizar o *throughput*, aumentar o número de usuários e dispositivos conectados simultaneamente e reduzir a latência. As redes 5G são extremamente flexíveis, confiáveis, rápidas, sustentáveis e acessíveis, com tecnologia escalável para lidar com o forte crescimento previsto do número de pessoas conectadas, sem causar um aumento no consumo de energia e na complexidade de gerenciamento em redes heterogêneas (LOUNG, NGAH, HAN, 2021).

2.2.2 – Equação de cálculo do *throughput* máximo 5G

A Equação (2), publicada pelo 3GPP na TS 38.306 (3GPP, 2019), é a base de estudos de capacidade e o ponto central desta dissertação. O valor aproximado do *throughput* máximo para um determinado número de portadoras agregadas em uma banda ou combinação de bandas é calculado por:

$$C = 10^{-6} \cdot \sum_{j=1}^{J} \{ V_{layers}^{(j)} \cdot Q_m^{(j)} \cdot f^{(j)} \cdot R_{max} \cdot \frac{N_{PRB}^{BW(j),\mu} \cdot 12}{T_S^{\mu}} \cdot (1 - OH^{(j)}) \} \text{ (Mbps).} \quad (2)$$

Em (2) os parâmetros são descritos a seguir:

- C: corresponde ao máximo valor teórico de *throughput*, medido em Mbps;
- j: corresponde ao número máximo de portadoras componentes agregadas em uma banda ou combinação de bandas, sendo que, de acordo com o 3GPP TR 38.802 (3GPP, 2017b), o número máximo de portadoras NR é 16;
- $V_{layers}^{(j)}$: é o número máximo de *layers* para cada portadora; para o *uplink* o máximo valor possível é 4 e no *downlink* 8. É importante recordar, conforme explica de Javel (2022), que *layers* são a quantidade de fluxos de transmissão advindos da gNodeB para o equipamento do usuário (UE) e vice-versa no *uplink*;
- $Q_m^{(j)}$: é o índice da máxima ordem de modulação disponível: 2 para QPSK, 4 para 16-QAM, 6 para 64-QAM e 8 para 256-QAM;
- $f^{(j)}$: corresponde ao *scaling factor*, que assume um desses valores: 1; 0,8; 0,75; ou 0,4;
- R_{max}: é o *coding rate* máximo, que tem o valor de 0,92578125;
- μ: corresponde ao *numerology*, que conforme visto na seção 2.1.3 é um parâmetro chave que afeta a largura de banda e a performance da rede 5G. Vihriälä *et al.* (2016)

resumem que o 5G suporta uma variedade de valores de SCS, incluindo 15 kHz, 30 kHz, 60 kHz, 120 kHz e 240 kHz. Esses valores são mapeados para os *numerologies* 0, 1, 2, 3, e 4, respectivamente. Quanto maior o *numerology*, mais amplo será o SCS;

- $N_{PRB}^{BW(j),\mu}$: é a máxima alocação de PRBs em uma largura de banda $BW(j)$, dado um *numerology* μ;
- $BW(j)$: é a máxima largura de banda suportada em cada banda ou combinação de bandas;
- T_S^{μ}: é a duração média de um símbolo OFDM em um *subframe* considerando o valor de μ para um prefixo cíclico normal, que corresponde à $10^{-3}/(14 \cdot 2^{\mu})$;
- $OH^{(j)}$: corresponde ao *overhead*, que pode tomar como valores 0,14 no *downlink* e 0,08 no *uplink* para a faixa de frequência de 450 MHz a 6000 MHz e 0,18 no *downlink* e 0,10 no *uplink* para a faixa de frequência de 24250 MHz a 52600 MHz.

O produto entre os parâmetros $Q_m^{(j)}$ and R_{max} fornece a eficiência espectral e possui correlação com o CQI, conforme discutido à frente.

2.3 – KPIs práticos do 5G

Há diversos KPIs que as operadoras de telefonia utilizam para monitorar o desempenho de suas redes e observar o comportamento diário de uso. Esses dados são coletados pela gNodeB e processados para fornecer visualizações que auxiliam no monitoramento. Esses KPIs são a referência na análise de qualidade e na tomada de decisões estratégicas sobre expansão de cobertura e reforço de capacidade, sendo parte fundamental do planejamento das redes de acesso e transporte.

Para realizar a proposta de ajuste e modelagem da Equação (2), alguns KPIs práticos foram selecionados. Dentre eles, destaca-se o CQI, que indica a qualidade do canal para a gNodeB e é um ponto chave neste trabalho, conforme indicado anteriormente, devido à sua correlação com outros dois parâmetros da Equação (2), o índice de modulação e o *code rate*.

2.3.1 – CQI

Conforme indicam Martínez *et al.* (2021), o CQI é uma informação de controle transmitida dentro de uma rede móvel para determinar a utilização dos recursos espectrais disponíveis pelo

equipamento do usuário. Com base nisso, a gNodeB ajusta as condições de despacho de recursos, a seleção do esquema de modulação e a taxa de codificação que será aplicada aos *resource blocks* solicitados pelo usuário. Portanto, à medida que o CQI aumenta, a eficiência espectral também aumenta, resultando no aumento do *throughput*.

Vale lembrar que o CQI assume valores na faixa de 0 (pior qualidade) a 15 (melhor qualidade), e é utilizado pelo sistema para adaptar dinamicamente a ordem de modulação e a taxa de código durante uma operação de enlace (DAHLMAN, PARKVALL, SKOLD, 2016).

Shariatmadari *et al.* (2018) fazem um breve resumo sobre a dinâmica de funcionamento do CQI na rede: o UE mapeia o SINR ao CQI, selecionando o MCS (*Modulation and Coding Scheme*) mais alto que garanta pelo menos 10% de BLER (*Block Error Rate*) para uma única transmissão. Além disso, conforme citado anteriormente, existem 16 possíveis valores de CQI, que são representados por 4 bits. O CQI é transportado ao PUCCH (*Physical Uplink Control Channel*) utilizando principalmente recursos de rádio reservados periodicamente; nesse caso, o CQI é codificado em 20 bits para proteção contra ruídos e interferência.

Geralmente, existem dois problemas diferentes associados ao relatório do indicador: o primeiro está relacionado à decodificação do CQI, ou seja, decodificar o relatório erroneamente como um valor maior ou menor. Decodificar como um valor mais baixo, resulta no emprego de um MCS excessivamente robusto para a transmissão de dados, desse modo não degradando a confiabilidade da comunicação. No entanto, decodificar incorretamente como um valor mais alto, resulta em uma taxa de transmissão maior, porém menos confiável. O segundo problema é o intervalo de tempo entre a medição do canal e a transmissão de dados real, durante o qual o canal pode mudar desfavoravelmente. Shariatmadari *et al.* (2018) sugerem algumas soluções para essas questões:

– Relatório de CQI configurável: um CQI de banda larga é transportado ao PUCCH utilizando o mesmo número de recursos. Uma taxa de codificação mais baixa pode ser utilizada para o relatório do CQI com a finalidade de oferecer maior proteção, o que pode ser feito alocando mais recursos de rádio para o UE relatar o CQI. Outra forma é reduzir o conteúdo do relatório, utilizando menos de 4 bits para representar os valores de CQI. O custo é um menor desempenho da adaptação do *link*, já que apenas um subconjunto de MCSs disponíveis pode ser usado.

– Adaptação de *link* baseada em atraso: o atraso entre a medição do canal e a transmissão de dados real degrada a precisão do relatório CQI. Para obter estimativas mais precisas da qualidade do canal, o UE pode ser configurado para reportar ao PUCCH com mais frequência; entretanto isso aumentaria o *overhead* de sinalização e o consumo de energia. Para compensar os efeitos de relatórios desatualizados, a gNodeB pode considerar o nível de atraso dos relatórios no

momento de escolha do MCS para transmissão de dados. Nesse caso, um MCS mais robusto é selecionado quando há um longo atraso.

– Resposta HARQ com um CQI atualizado: para reduzir o *overhead* de sinalização do relatório periódico de CQI, o UE pode reportar um CQI atualizado após a transmissão inicial de dados no *downlink*. Por exemplo, o UE reporta o CQI junto com o NACK se a transmissão inicial falhar.

2.3.2 – Outros KPIs práticos utilizados

Além do CQI, outros KPIs práticos foram selecionados para realizar a proposta de ajuste e modelagem da Equação (2). São eles: *Mean User Throughput*, que calcula o *throughput* médio por usuário com granularidade horária; *Mean Number of Active Users*, que fornece o número médio de usuários conectados em um determinado *site* móvel durante a janela de uma hora; e por fim *Mean PRBs Used*, que calcula a utilização de *resource blocks* para a largura de banda disponível também com a janela de uma hora. Esses KPIs são a referência das medições reais coletadas que formam a base de dados deste trabalho.

2.4 – Relação entre o CQI e a eficiência espectral

A especificação 3GPP TS 36.213 (3GPP, 2017a) aborda a correlação entre o CQI e as possíveis ordens de modulação combinadas com os valores de *code rate*, que fornecem a faixa de eficiência espectral (SE), quando multiplicados. Tal correlação é fornecida em forma tabular, associando a SE apenas a valores inteiros de CQI, conforme se verifica na Tabela 2. Essa tabela foi, então, um trunfo natural a ser considerado na análise pretendida neste trabalho, uma vez que o CQI foi escolhido como um KPI chave a ser utilizado no ajuste da Equação (2).

Tabela 2 – Tabela de CQI para 256-QAM (3GPP, 2017a)

CQI index	**modulation**	**code rate × 1024**	**efficiency (SE)**
0	out of range		
1	QPSK	78	0,1523
2	QPSK	193	0,3770
3	QPSK	449	0,8770
4	16QAM	378	1,4766
5	16QAM	490	1,9141
6	16QAM	616	2,4063
7	64QAM	466	2,7305
8	64QAM	567	3,3223
9	64QAM	666	3,9023
10	64QAM	772	4,5234
11	64QAM	873	5,1152
12	256QAM	711	5,5547
13	256QAM	797	6,2266
14	256QAM	885	6,9141
15	256QAM	948	7,4063

Após uma inspeção cuidadosa da Tabela 2, pôde-se observar que existe uma relação quase linear entre a SE e o CQI. Dessa forma, para facilitar a utilização do CQI como entrada da adaptação pretendida da Equação (2), foi realizado um ajuste por regressão. A regressão linear trouxe bons resultados, mas o ajuste por regressão quadrática foi ainda melhor, por isso foi escolhido. A Equação (3) representa a regressão obtida. A Figura 7 mostra a relação SE versus CQI, utilizando dados da Tabela 2 (gráfico tipo haste) sobrepondo a curva de ajuste (gráfico tipo contínuo). A convergência é clara.

$$SE = 8{,}027 \cdot 10^{-3} \cdot CQI^2 + 0{,}4 \cdot CQI - 0{,}34 \text{ (bps/Hz)} \quad (3)$$

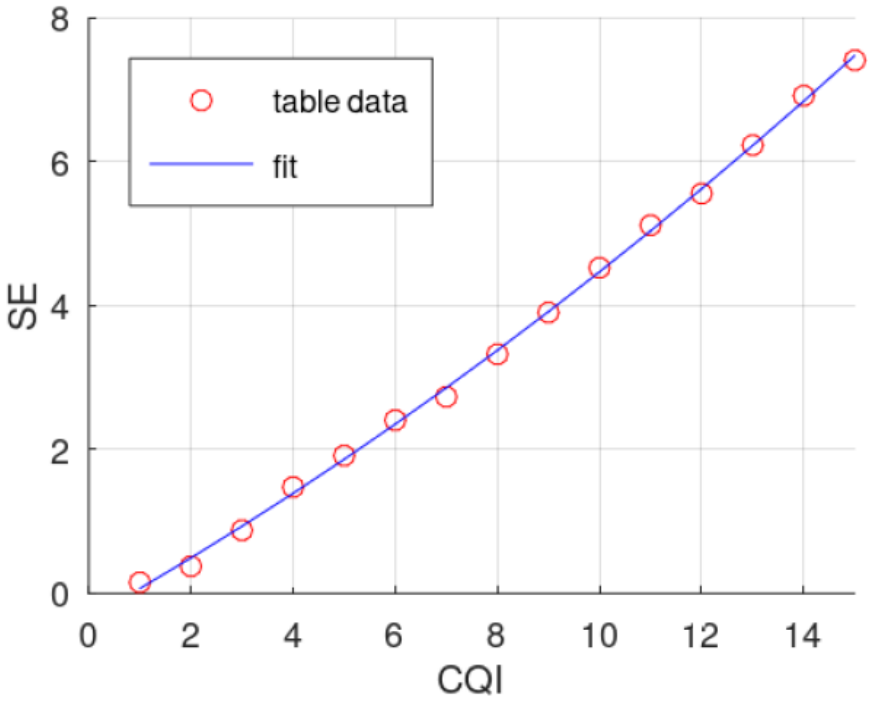


Figura 7 – SE versus CQI: dados da Tabela 2 e ajuste proposto

A partir dos KPIs práticos apresentados, a nova equação híbrida proposta fica desta forma:

$$C = 10^{-6} \cdot \sum_{j=1}^{J} \{ V_{layers}^{(j)} \cdot SE \cdot f^{(j)} \cdot \frac{PRB_{USED\ MEAN} \cdot 12}{T_S^{\mu}} \cdot (1 - OH^{(j)}) \} \text{ (Mbps).} \quad (4)$$

Onde:

- SE: É a eficiência espectral calculada a partir da fórmula de regressão;
- $PRB_{USED\ MEAN}$: KPI coletado que calcula a utilização de *resource blocks* para a largura de banda disponível com a janela de uma hora.

Após a apresentação de importantes aspectos relacionados ao 5G e dos fundamentos que são a base teórica deste trabalho, a seguir é apresentada a metodologia utilizada para realizar as análises e os testes que compõem esta dissertação.

3. Metodologia de Trabalho

Este capítulo é dividido da seguinte forma: a seção 3.1, “Preparação do estudo”, descreve a forma de abordagem do problema em questão, considerando a hipótese postulada. Nela, são descritos o método de análise e a estratégia para obtenção da base de dados resultantes de medições reais de campo, bem como as ferramentas utilizadas para realização dos testes. A seção 3.2, “Descrição dos cenários de testes”, apresenta as principais características e peculiaridades dos cenários abordados na pesquisa. Cada cenário traz características específicas com a finalidade de enriquecer os estudos de caso analisados. Por fim, a seção 3.3, “Descrição da metodologia”, traz os ajustes e as ações realizadas para se alcançar os resultados pretendidos.

3.1 – Preparação do estudo

Conforme citado anteriormente**,** apesar de atender ao propósito nos estágios iniciais de planejamento, a Equação (2) apresenta alguns problemas se forem consideradas análises de uso real ou trabalhos de predição baseados em casos reais. Como alguns dos parâmetros da equação não são rastreados diretamente pela célula ou pela gNodeB, o objetivo deste trabalho é analisar alguns valores de *throughput* no âmbito do modelo teórico 3GPP, porém incorporando KPIs práticos a ele. Para isso, é importante destacar alguns pontos considerados na construção de tal modelo.

A ideia foi realizar uma previsão híbrida usando a Equação (2) como base, fazendo uma mistura de alguns parâmetros originais com valores “fixos” e parâmetros provenientes de medições horárias coletadas de KPIs práticos. Dessa forma, foi realizada uma análise comparativa entre os valores médios de *throughput* medidos ao longo das horas de um ou mais dias das gNodeBs escolhidas e as previsões teóricas de *throughput* horário, com foco em verificar se surgiria algum tipo de correlação ou convergência. A partir disso foi possível observar as curvas de comportamento dos valores obtidos, analisar as correlações e realizar conclusões pertinentes.

Para uma melhor compreensão, foram considerados cenários de *downlink* e *uplink* para a realização deste estudo e foram utilizadas medições reais de gNodeBs avistadas em pontos estratégicos da cidade do Rio de Janeiro.

3.2 – Descrição dos cenários de testes

Para formar o banco de dados desta análise foram coletadas medições de uso real relativas a alguns KPIs citados anteriormente (CQI, *Mean User Throughput*, *Mean Number of Active Users*, *Mean PRBs Used*) que possuem correlação fundamental com a equação teórica do 3GPP. As gNodeBs de interesse se encontram na cidade do Rio de Janeiro e foram escolhidas de forma a fornecer cenários com características criticamente distintas, no que tange principalmente às condições do ambiente e ao número de usuários conectados, impactando diretamente no volume de dados trafegado.

3.2.1 – Cenário 1: Praia de Copacabana

As praias são utilizadas principalmente para fins de lazer e entretenimento e oferecem uma ampla gama de atividades incrivelmente emocionantes e divertidas para a população. No entanto, existem certas limitações relativas às questões relacionadas com a segurança e a conectividade nas praias, tais como a falta de sistemas de vigilância adequados para evitar afogamentos e escassez de informações prévias sobre a densidade de pessoas que desfrutam do local, que comem em restaurantes próximos ou estacionam seus carros. Além disso há possibilidades de otimizar as previsões meteorológicas em tempo real e os alertas de emergência em saúde. Portanto as praias são um excelente ambiente para estudo de caso em redes 5G, conforme corroboram Alam *et al*. (2017), que propõem uma arquitetura para áreas costeiras seguras e conectadas.

Dentro desse contexto, o primeiro local escolhido para realização dos testes é a praia de Copacabana. A gNodeB 1 de referência se encontra na Rua Fernando Mendes, ao lado da Avenida Atlântica, cobrindo essa região na orla da praia. Foram coletadas medições entre os dias 1 e 8 de maio de 2024.

Esse local e essa semana específicos foram escolhidos pois foi possível observar o tráfego regular da região, na maior parte dos dias. Adicionalmente, foi observada uma demanda extraordinária de capacidade devida a um concerto musical de enorme porte, que ocorreu nessa área da praia no dia 4 de maio. Dessa forma, foi possível realizar uma análise comparativa entre o comportamento usual e um alto congestionamento da rede para o mesmo *site*. A Figura 8 ilustra a localização da gNodeB 1 considerada.



Figura 8 – Localização da gNodeB 1 na praia de Copacabana

É de extrema importância conhecer alguns parâmetros da gNodeB que possuem influência direta na análise proposta dos estudos de caso. A Tabela 3 apresenta os detalhes de configuração encontrados na gNodeB 1 do *site* de Copacabana.

Tabela 3 – Parâmetros de configuração utilizados na gNodeB 1

Nome do parâmetro de configuração	**Valor do parâmetro**
5G *StandAlone*	Sim
Frequência de Operação	3500 MHz
Largura de Banda Disponível (*BW*)	100 MHz
Sub-Carrier Spacing (*SCS*)	30 kHz
Configuração do *Massive MIMO*	64T64R
Número de *Layers*	2 UL / 6 DL

Tendo essa visão geral do cenário de estudo de caso, torna-se possível trabalhar com as amostras de dados coletadas e aplicar as modelagens propostas na Equação (2) para verificar os resultados encontrados.

3.2.2 – Cenário 2: Avenida Abelardo Bueno

Um tema importante trazido por Yang e Hua (2019) é a dificuldade com a gestão dos recursos de espectro em redes móveis quando ocorrem engarrafamentos ou emergências em vias expressas. Nesses casos, muitos veículos agregar-se-ão rapidamente num curto período, e a demanda por espectro e recursos de roteamento aumentará rapidamente, levando à procura por requisitos de comunicação mais complexos. A competição por recursos locais com suporte limitado ao tráfego em rodovias é cada vez mais proeminente, e a alta demanda pode levar a sérios atrasos na transmissão ou à paralisia da rede. A densidade média de veículos em áreas urbanas é maior se comparada a locais mais remotos, tornando mais difícil garantir o QoS para algumas aplicações.

Dentro desse contexto, o segundo local escolhido para realização dos estudos de caso é a Avenida Abelardo Bueno, na Barra da Tijuca. A gNodeB 2 de referência se encontra em frente ao Parque Olímpico do Rio de Janeiro e cobre essa região com um fluxo intenso de veículos e pessoas da cidade.

Esse *site* foi escolhido pois é possível observar, além do comportamento habitual do trânsito, intenso tráfego de veículos nos horários de pico. Essa avenida também possui arenas onde acontecem eventos sazonais. Novamente, no dia 8 de maio, houve um evento disponível adequado para análise, onde pôde-se observar um fluxo de usuários maior que o usual na região. A Figura 9 ilustra a localização da gNodeB 2 considerada.

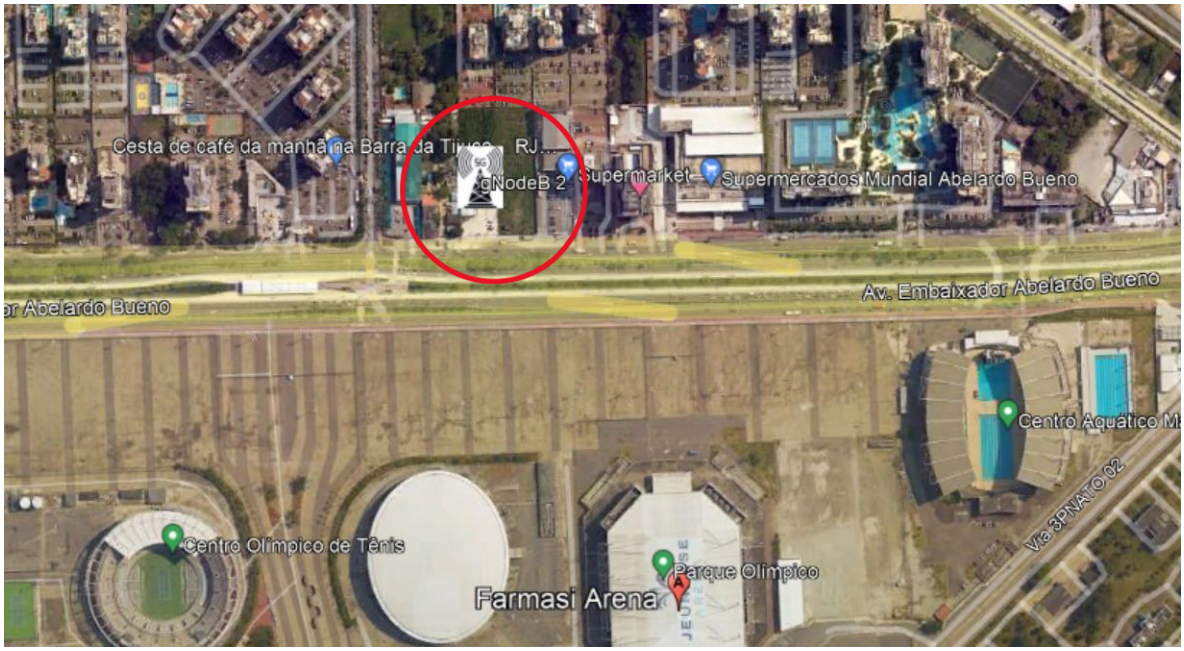


Figura 9 – Localização da gNodeB 2 na Avenida Abelardo Bueno

Cada cenário possui características distintas, com comportamentos de usuários variados, logo é importante conhecer os parâmetros das gNodeBs de cada *site*. A Tabela 4 apresenta os detalhes de configuração encontrados na gNodeB 2 do *site* do Parque Olímpico.

Tabela 4 – Parâmetros de configuração utilizados na gNodeB 2

Nome do parâmetro de configuração	**Valor do parâmetro**
5G *StandAlone*	Sim
Frequência de Operação	3500 MHz
Largura de Banda Disponível (*BW*)	100 MHz
Sub-Carrier Spacing (*SCS*)	30 kHz
Configuração do *Massive MIMO*	64T64R
Número de *Layers*	2 UL / 6 DL

3.2.3 – Cenário 3: Bondinho do Pão de Açucar

Com o desenvolvimento contínuo das tecnologias de comunicação e informação, o turismo inteligente está avançando rapidamente. O crescimento dessa área está fazendo a indústria do turismo direcionar mais atenção ao mundo digital, que pode não somente fornecer mais conveniência aos turistas, como também proporcionar o uso do potencial máximo de diversas atrações. O 5G possui taxas de transmissão mais altas, que podem atender às necessidades de aplicações turísticas, como, realidade virtual, realidade aumentada e transmissões ao vivo em alta definição durante a viagem (WANG *et al*., 2020).

Inserido nesse cenário, o terceiro local escolhido para realização dos estudos de caso é o Bondinho do Pão de Açúcar, um dos pontos turísticos mais tradicionais da cidade do Rio de Janeiro. O *site* possui uma *small cell* na estação de embarque do bondinho.

Esse ponto foi escolhido pois possui um grande fluxo de turistas visitando o local todos os dias. Além disso, ocorreu um festival de música nos finais de semana do período entre 5 e 27 de abril, o que ocasionou um tráfego extraordinário, com público concentrado também na parte da noite. A Figura 10 ilustra a localização da gNodeB 3 considerada.



Figura 10 – Localização da gNodeB 3 no bondinho do Pão de Açúcar

O cenário em questão possui uma peculiaridade em relação aos cenários anteriores: trata-se de um *site* 5G operando na faixa de frequência de 2300 MHz a partir de um compartilhamento de espectro dinâmico. Esse ponto é interessante para se ter uma visão de desempenho com um cenário de configuração diferente dos anteriores.

O DSS é um recurso para o estágio inicial das implantações da rede 5G e, portanto, vantajoso para um mercado em expansão, alocando os recursos necessários de tempo e frequência proporcionais à demanda de tráfego dos usuários, proporcionando uma melhor utilização do espectro. A tecnologia é projetada para ser compatível com versões anteriores de UEs LTE existentes. Além disso, como é provável que o 4G e 5G coexistam durante um bom tempo, a adoção do compartilhamento de espectro é interessante para promover o período de transição entre gerações.

No entanto, os principais desafios que o DSS causa são reduzir a capacidade da rede e o pico de *throughput* alcançável por usuários individuais, devido à sobrecarga gerada a partir de canais de controle NR e LTE. Dependendo da implementação e configuração do DSS, a redução real em capacidade varia. O papel do DSS é permitir a alocação de usuários NR ao espectro do LTE sem afetar o essencial de um sistema pelo outro (SAHA, CIOFFI, 2024). A Tabela 5 apresenta os detalhes de configuração encontrados na gNodeB 3 do *site* do bondinho.

Tabela 5 – Parâmetros de configuração utilizados na gNodeB 3

Nome do parâmetro de configuração	**Valor do parâmetro**
5G *StandAlone*	Não (DSS)
Frequência de Operação	2300 MHz
Largura de Banda Disponível (*BW*)	40 MHz
Sub-Carrier Spacing (*SCS*)	30 kHz
Configuração do *Massive MIMO*	2T2R
Número de *Layers*	2 UL / 2 DL

3.2.3 – Cenário 4: *New York City Center*

Raj *et al*. (2018) pontuam que cada vez mais os visitantes de um shopping demandam mais que apenas uma experiência de compra tradicional. Espera-se que os shoppings inteligentes ofereçam conectividade confiável, serviços e experiência digital a todos os clientes. Com redes móveis avançadas, as operadoras têm um papel significativo no fornecimento de uma combinação de conectividade segura e na entrega de serviços voltados para IoT.

Finalmente, tendo em vista esse cenário importante, o quarto local escolhido para estudo de caso é o shopping *New York City Center*, localizado na Barra da Tijuca. Esse *site* possui alguns pontos importantes a serem analisados, como a influência dos horários de maior movimento do shopping na capacidade da rede, e o fato de ser um *site indoor*, o que pode influenciar diretamente nos valores de alguns KPIs coletados, como o CQI. A Figura 11 ilustra a localização da gNodeB 4 considerada.

Da mesma forma dos cenários anteriores, a Tabela 6 informa os parâmetros de configuração da gNodeB 4 que são importantes para a realização da análise de capacidade proposta.

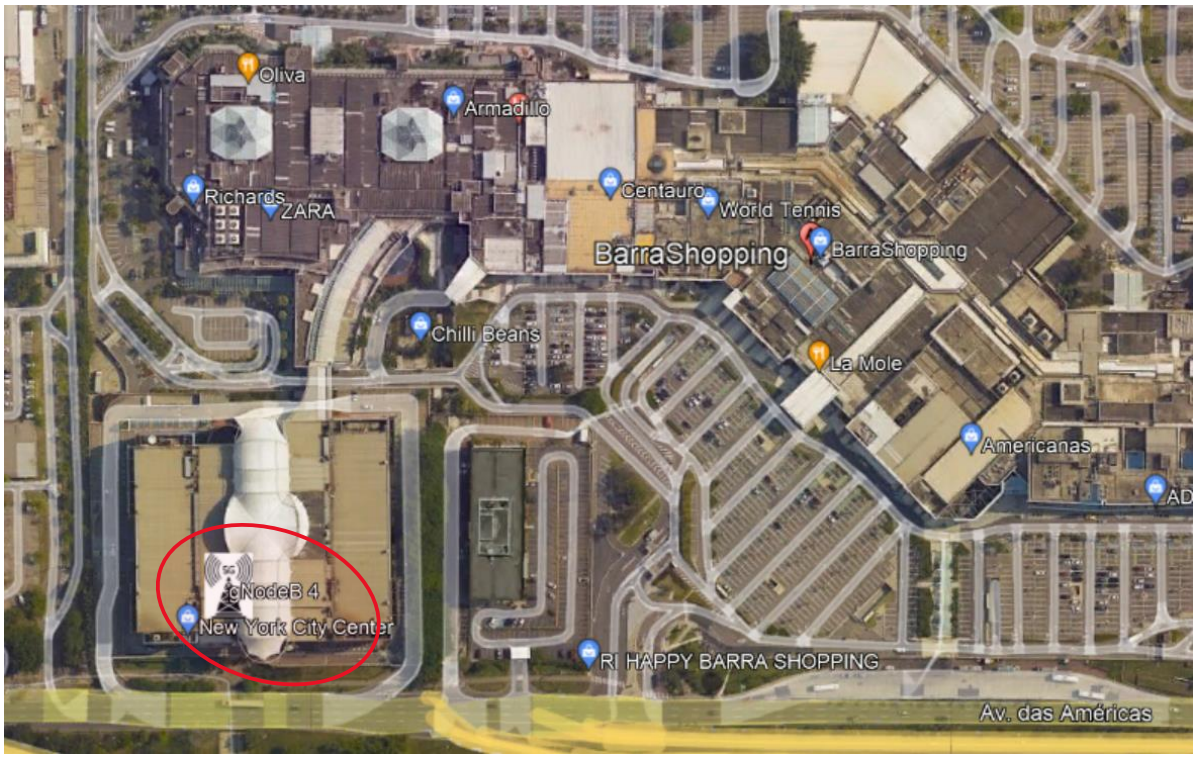


Figura 11 – Localização da gNodeB 4 no shopping *New York City Center*

Tabela 6 – Parâmetros de configuração utilizados na gNodeB 4

Nome do parâmetro de configuração	**Valor do parâmetro**
5G *StandAlone*	Sim
Frequência de Operação	3500 MHz
Largura de Banda Disponível (*BW*)	100 MHz
Sub-Carrier Spacing (*SCS*)	30 kHz
Configuração do *Massive MIMO*	4T4R
Número de *Layers*	2 UL / 4 DL

3.3 – Descrição da metodologia

Após conhecer todos os cenários de teste que compõem o estudo de caso, é importante pontuar os ajustes e as ações realizadas para se alcançar os resultados pretendidos. Com relação à equação de cálculo do *throughput* os parâmetros fixos foram: j, o número de portadoras (neste

trabalho é apenas 1); $V_{layers}^{(j)}$, o número de *layers*, configurado de acordo com o equipamento, (valores demonstrados nas tabelas de parâmetros de configuração para cada cenário); $f^{(j)}$, o *scaling fator*, que nas bases atuais é 1; T_S^{μ}, a duração média de um símbolo OFDM em um subquadro (35,714 μs neste caso); e finalmente $OH^{(j)}$, o *overhead*, que assume os valores de 0,14 para *downlink* e 0,08 para *uplink*, na faixa de frequência FR1 (450 MHz a 6000 MHz) utilizada.

Os demais parâmetros foram calculados de forma variável de acordo com os KPIs coletados por hora. Conforme discutido no capítulo 2, o produto entre $Q_m^{(j)}$ e R_{max} fornece a eficiência espectral (SE), diretamente correlacionada ao CQI, que neste caso é coletado a partir das medições horárias. $N_{PRB}^{BW(j),\mu}$, que é a alocação de *resource blocks* em uma determinada largura de banda $BW(j)$, também foi obtida a partir de dados coletados por hora das medições da gNodeB. Finalmente, o número médio de usuários ativos conectados por hora também foi considerado como fator multiplicativo para calcular o *throughput* total da célula ou do site.

4. Desenvolvimento

Este capítulo apresenta os dados advindos das medições coletadas de cada cenário descrito no capítulo 3. A partir disso, são feitas as análises e discutidos os resultados dos testes. O capítulo é dividido da seguinte forma: a seção 4.1, “Tráfego regular geral”, considera as medições nos dias de comportamento usual de tráfego, com número de usuários conectados dentro do padrão para os locais de referência. A seção 4.2 “Tráfego durante dia extraordinário”, considera as medições nos dias marcados por eventos extraordinários. Nesse caso, com uma concentração de usuários conectados bem acima do usual, observa-se o impacto que esse aumento no tráfego de dados causa no estudo de capacidade e nos resultados da análise proposta. Por fim, a seção 4.3, “Conclusões parciais”, traz um resumo dos testes, com algumas conclusões parciais sobre os resultados encontrados no trabalho tema desta dissertação.

4.1 – Tráfego regular geral

Os resultados a seguir mostram uma comparação entre o *throughput* teórico e o calculado a partir da equação híbrida ajustada utilizando os KPIs práticos e as medições de *throughput* real. Nesta seção foram considerados dias úteis, onde pôde-se observar o tráfego habitual dos cenários escolhidos para realização dos testes.

4.1.1 – *Throughput* no *downlink*

As Figuras 12 e 13 mostram os resultados comparativos do cenário 1, em duas escalas, utilizando as medições coletadas da gNodeB localizada na Praia de Copacabana. Foram consideradas para análise medições horárias dos dias 3 e 6 de maio de 2024, dias úteis com tráfego dentro do usual na região.

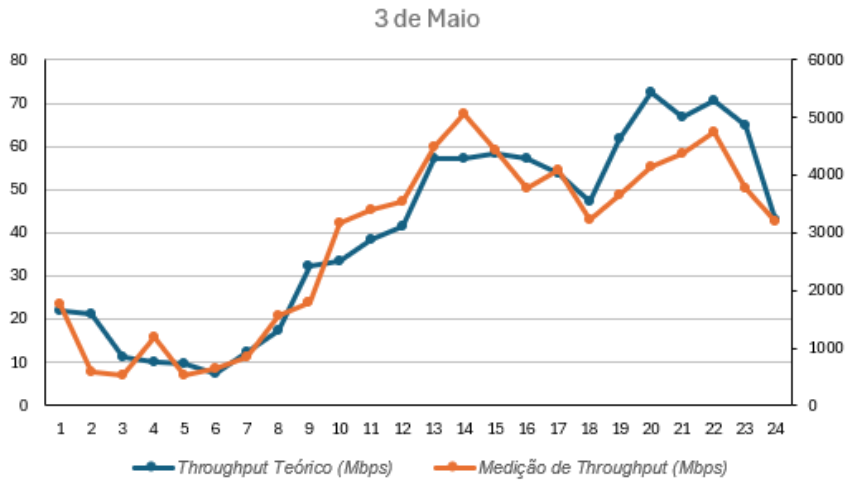


Figura 12 – Variação horária dos valores teóricos e das medições reais de *throughput* do cenário 1 no *downlink* em 3 de maio de 2024

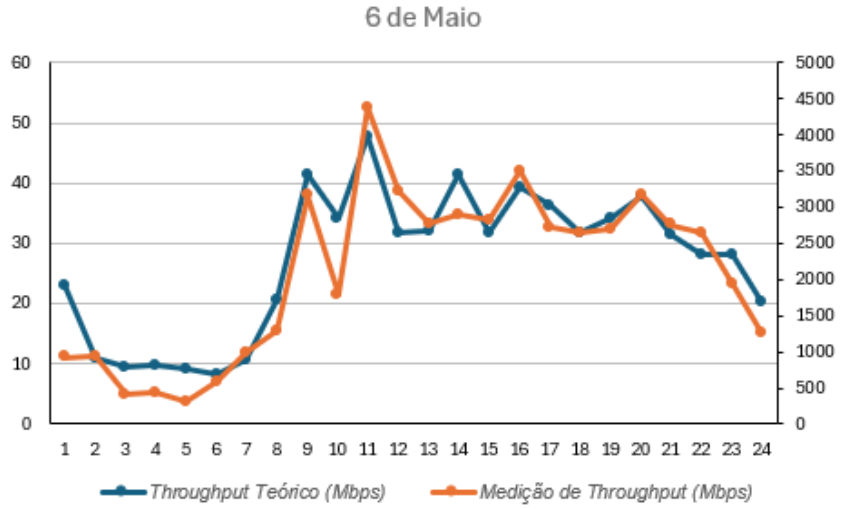


Figura 13 – Variação horária dos valores teóricos e das medições reais de *throughput* do cenário 1 no *downlink* em 6 de maio de 2024

Uma clara correlação é observada entre os comportamentos das medições reais e os resultados teóricos da equação ajustada, porém com uma diferença considerável entre as escalas de magnitude dos valores de *throughput*. Com a finalidade de enriquecer a base de dados e observar os comportamentos em diferentes ambientes, o mesmo teste comparativo foi realizado para todos os cenários de estudo de caso.

As Figuras 14 e 15 mostram os resultados comparativos do cenário 2, em duas escalas, utilizando as medições coletadas da gNodeB localizada na Avenida Abelardo Bueno. Foram consideradas para análise medições horárias dos dias 6 e 7 de maio de 2024.

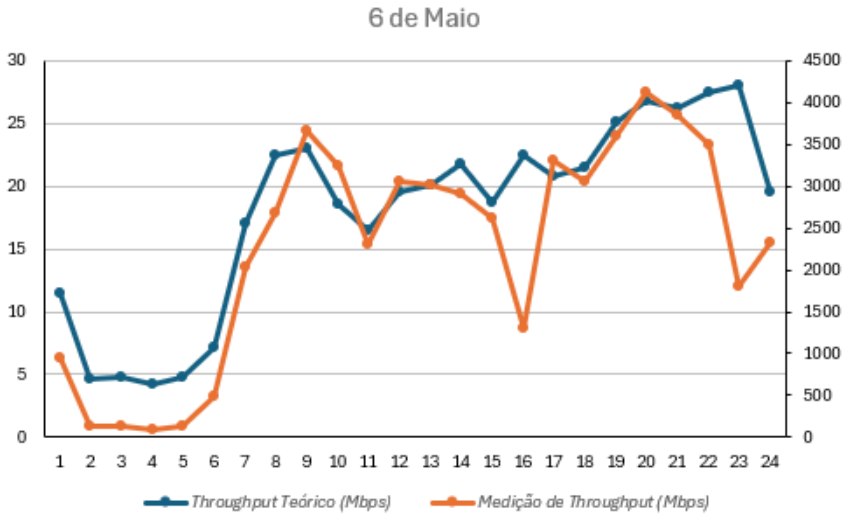


Figura 14 – Variação horária dos valores teóricos e das medições reais de *throughput* do cenário 2 no *downlink* em 6 de maio de 2024

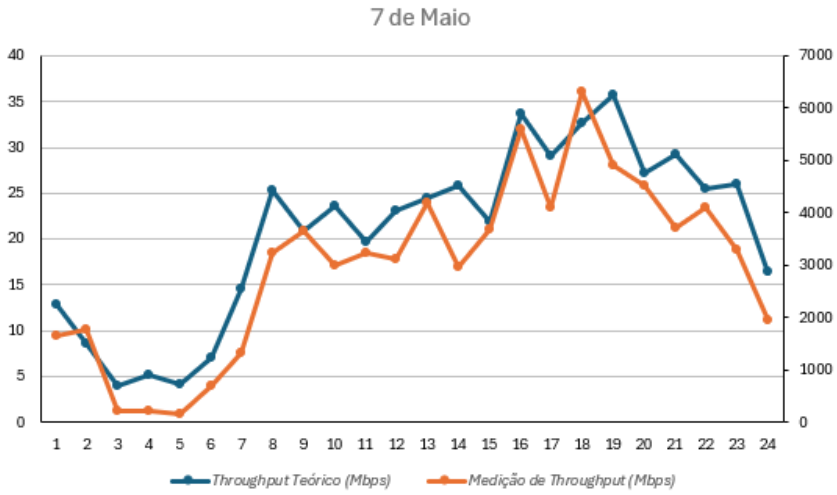


Figura 15 – Variação horária dos valores teóricos e das medições reais de *throughput* do cenário 2 no *downlink* em 7 de maio de 2024

Novamente uma clara correlação é observada entre os comportamentos das medições reais e os resultados teóricos da equação ajustada, corroborando a visão observada no cenário 1, porém se mantém a diferença considerável entre as escalas de magnitude dos valores de *throughput*.

As Figuras 16 e 17 mostram os resultados comparativos do cenário 3, em duas escalas, utilizando as medições coletadas da *small cell* localizada na estação de embarque do bondinho do Pão de Açúcar. Foram consideradas para análise medições horárias dos dias 17 e 25 de abril de 2024.

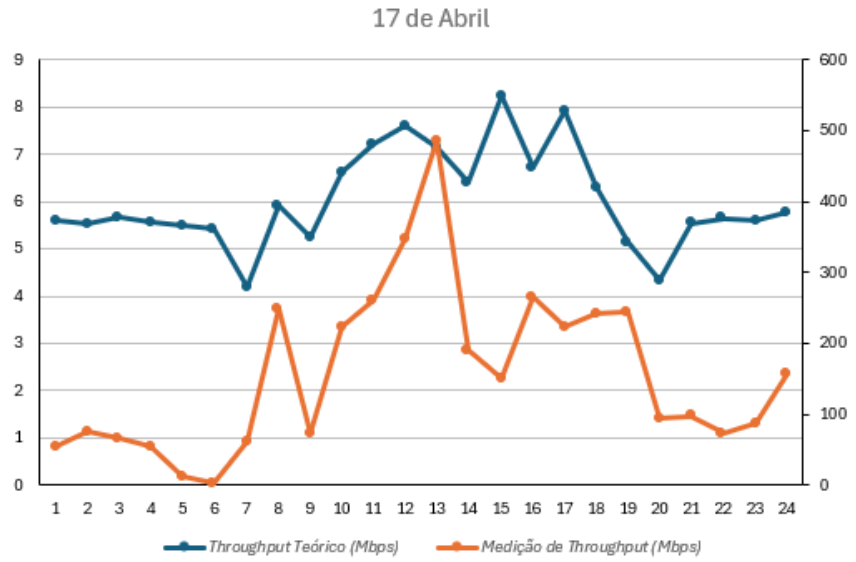


Figura 16 – Variação horária dos valores teóricos e das medições reais de *throughput* do cenário 3 no *downlink* em 17 de abril de 2024

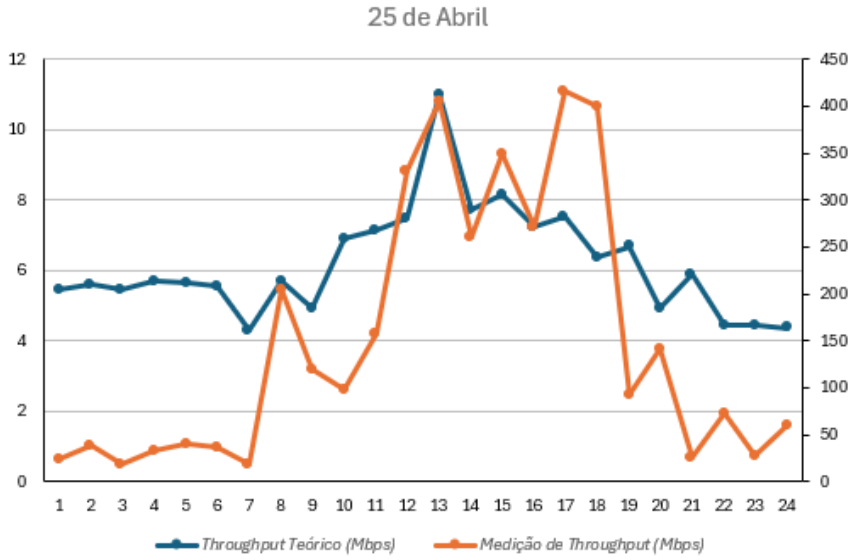


Figura 17 – Variação horária dos valores teóricos e das medições reais de *throughput* do cenário 3 no *downlink* em 25 de abril de 2024

Uma boa correlação é observada entre os comportamentos das medições reais e os resultados teóricos da equação ajustada, porém ainda se mantém a discrepância entre as escalas de magnitude dos valores de *throughput*. Esse cenário também apresenta pequenas diferenças nas curvas observadas, isso se deve ao fato de o equipamento em questão ser uma *small cell* em um ambiente praticamente sem utilização no período noturno. Além disso, por se tratar de um *site* 5G DSS, corrobora-se a visão de Saha e Cioffi (2024), em que há uma redução na capacidade da rede e no pico de *throughput* alcançável por usuários únicos, devida à sobrecarga gerada a partir de canais de controle NR e LTE.

As Figuras 18 e 19 mostram os resultados comparativos do cenário 4, em duas escalas, utilizando as medições coletadas da gNodeB *indoor* localizada no shopping *New York City Center*. Foram consideradas para análise medições horárias dos dias 18 e 19 de julho de 2024.

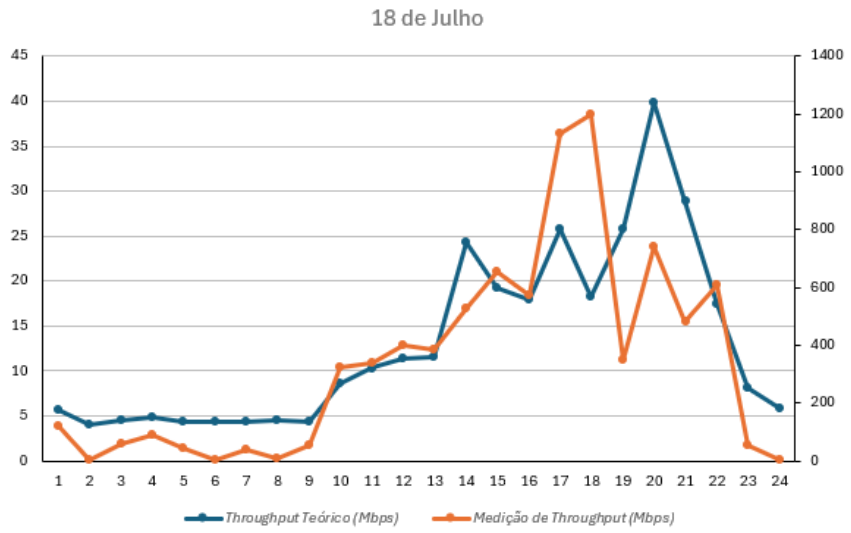


Figura 18 – Variação horária dos valores teóricos e das medições reais de *throughput* do cenário 4 no *downlink* em 18 de julho de 2024

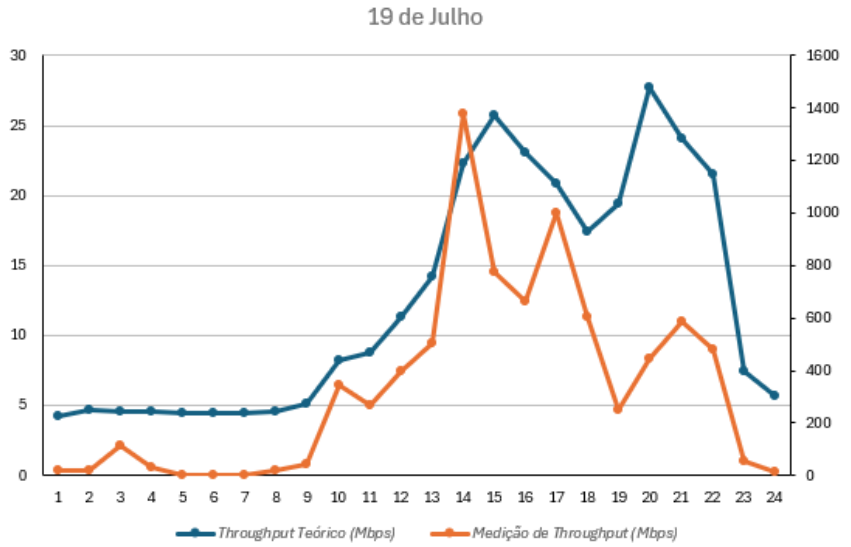


Figura 19 – Variação horária dos valores teóricos e das medições reais de *throughput* do cenário 4 no *downlink* em 19 de julho de 2024

Novamente aparece a correlação entre os comportamentos das medições reais e os resultados teóricos da equação ajustada, porém se mantém a diferença considerável entre as escalas de magnitude dos valores de *throughput*. Um outro ponto interessante a se observar é o aumento

do *throughput* justamente no período de funcionamento do shopping, entre 10:00 e 22:00, o que já indica o impacto que o número de usuários conectados possui na análise.

Conclui-se que uma boa convergência só é alcançada quando o *throughput* teórico é multiplicado por um fator de escala que corresponde aproximadamente à divisão dos valores máximos das duas escalas dos gráficos. Vale ressaltar que tal fator de escala não possui nenhuma relação com $f^{(j)}$, o *scaling factor* presente na Equação (2). As Figuras 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 e 27 mostram o resultado desse ajuste às curvas traçadas nas Figuras 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 e 19, respectivamente.

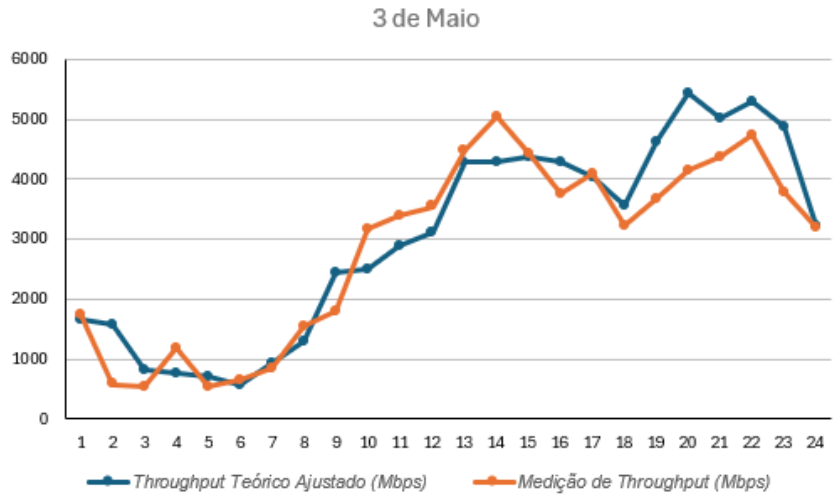


Figura 20 – Variação horária dos valores teóricos ajustados com um fator de escala único (75) e das medições reais de *throughput* do cenário 1 no *downlink* em 3 de maio de 2024

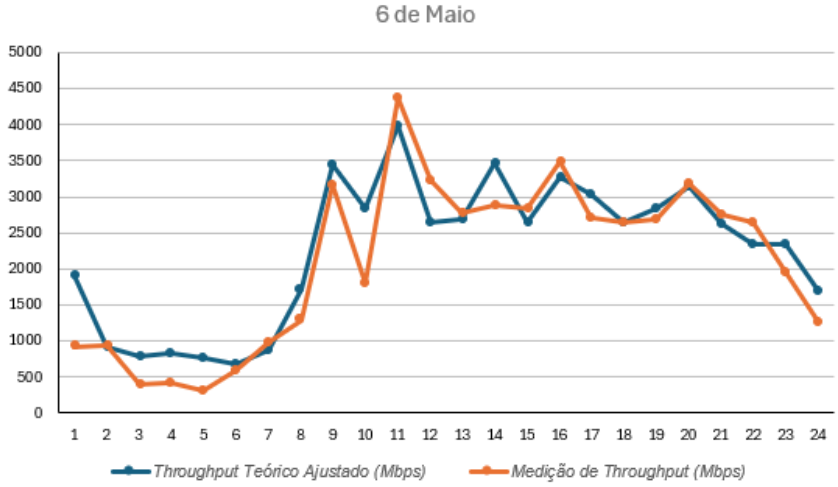


Figura 21 – Variação horária dos valores teóricos ajustados com um fator de escala único (83,33) e das medições reais de *throughput* do cenário 1 no *downlink* em 6 de maio de 2024

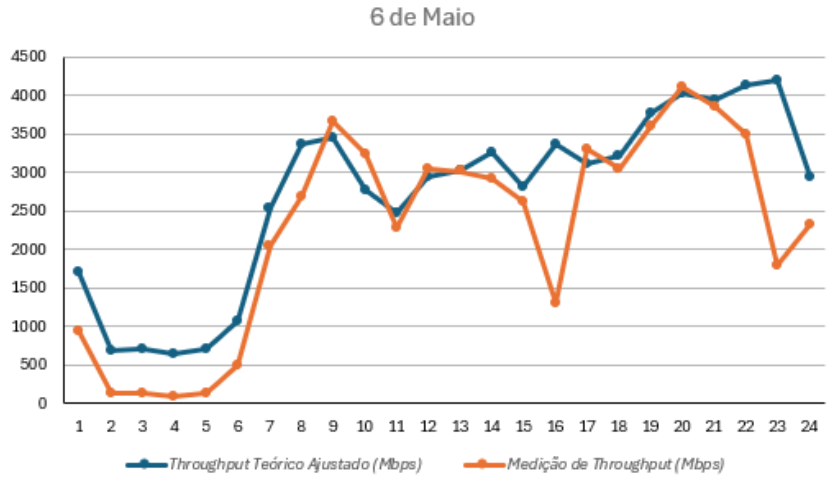


Figura 22 – Variação horária dos valores teóricos ajustados com um fator de escala único (150) e das medições reais de *throughput* do cenário 2 no *downlink* em 6 de maio de 2024

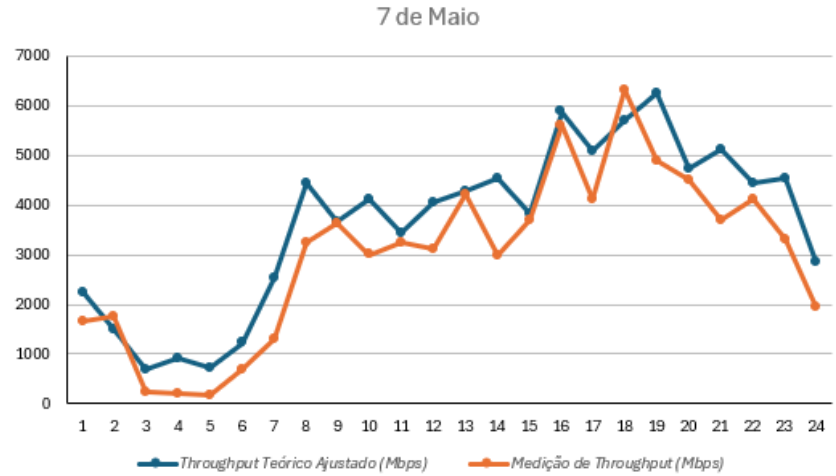


Figura 23 – Variação horária dos valores teóricos ajustados com um fator de escala único (175) e das medições reais de *throughput* do cenário 2 no *downlink* em 7 de maio de 2024

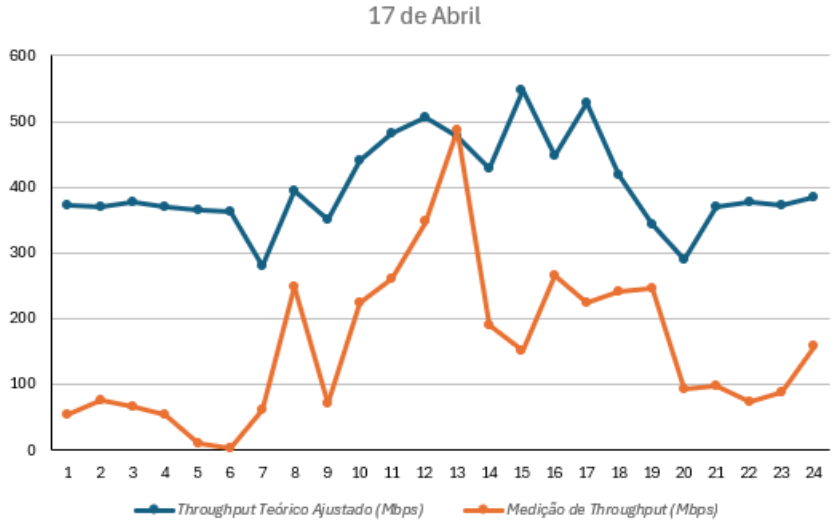


Figura 24 – Variação horária dos valores teóricos ajustados com um fator de escala único (66,67) e das medições reais de *throughput* do cenário 3 no *downlink* em 17 de abril de 2024

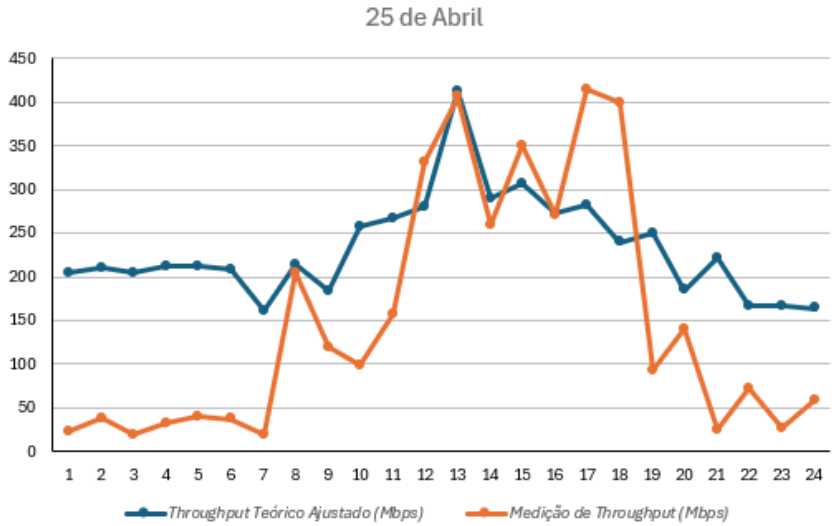


Figura 25 – Variação horária dos valores teóricos ajustados com um fator de escala único (37,5) e das medições reais de *throughput* do cenário 3 no *downlink* em 25 de abril de 2024

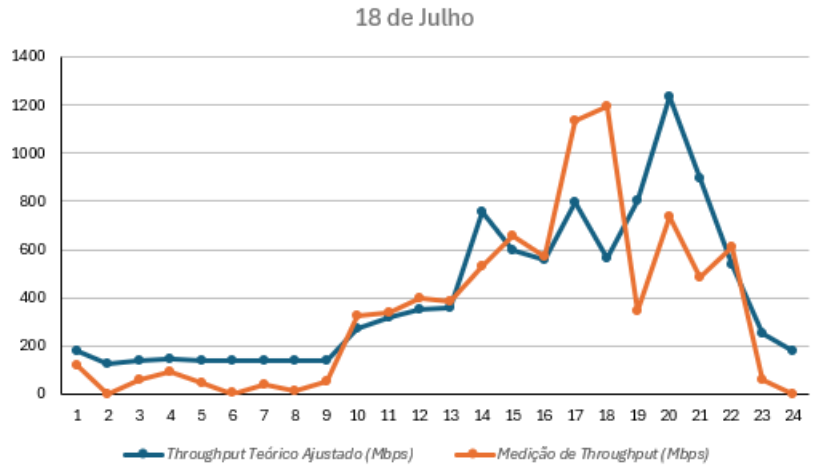


Figura 26 – Variação horária dos valores teóricos ajustados com um fator de escala único (31,1) e das medições reais de *throughput* do cenário 4 no *downlink* em 18 de julho de 2024

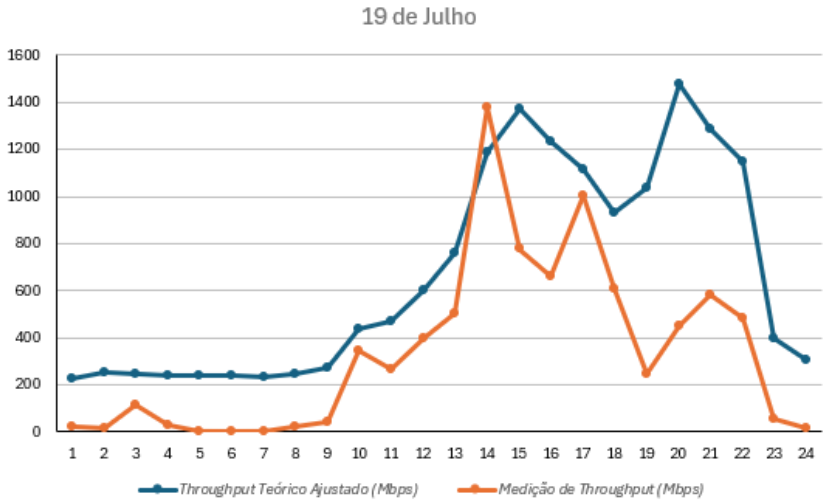


Figura 27 – Variação horária dos valores teóricos ajustados com um fator de escala único (53,33) e das medições reais de *throughput* do cenário 4 no *downlink* em 19 de julho de 2024

Após análise, é interessante pontuar que a *small cell* do cenário 3 e o *site indoor* do cenário 4 demandaram um ajuste com um fator de escala único de valor menor. Isso pode ser explicado pelo comportamento de uso e pelos melhores níveis de CQI encontrados em ambientes fechados desse tipo.

Uma discussão natural surge da diferença considerável observada entre as escalas de magnitude dos valores de *throughput*, apesar da correlação entre os comportamentos diários dos *throughputs* teórico e real. Uma possível explicação é o fato de que o tipo de uso de um aparelho celular por um usuário regular atualmente, se considerado um dia normal de tráfego, não causa a alocação de PRB que explora todo o potencial de largura de banda. Consequentemente, o $N_{PRB}^{BW(j),\mu}$ horário médio, KPI fornecido a partir das medições, se usado conforme a Equação (2), leva a uma previsão de *throughput* subestimada.

Portanto, idealmente, para utilizar tal KPI sem a necessidade de um fator de escala de correção, a alocação de PRB deve ser totalmente explorada ao longo da hora, o que é esperado que se ocorra em casos com alta demanda de tráfego. Corroborando essa hipótese, a Figura 28 ilustra um teste em tempo real de estresse máximo de uma célula, a partir de *speedtests* realizados por um UE, durante um período muito curto, provocando um aumento instantâneo do *throughput* à medida que a utilização aumenta.

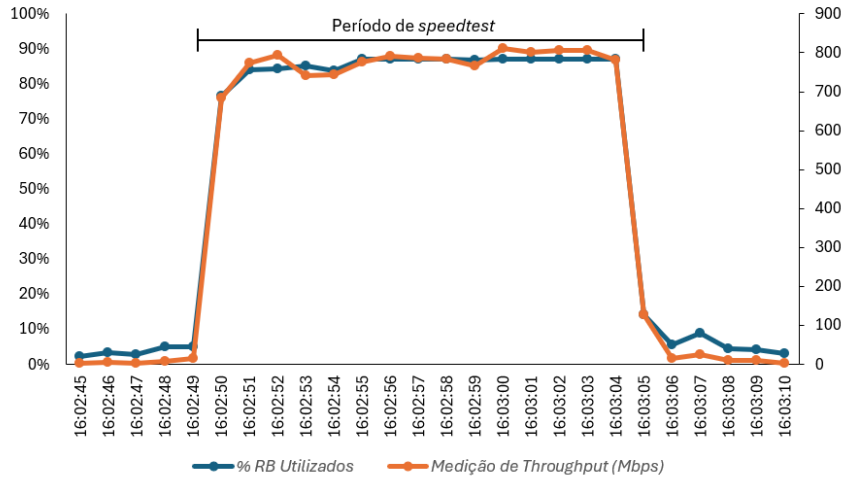


Figura 28 – Teste em tempo real de estresse máximo de uma célula a partir de *speedtests* realizados por um UE em um período curto

4.1.2 – *Throughput* no *uplink*

Muitas vezes, as operadoras mantêm sua estratégia focada no *downlink* e causam uma assimetria entre os canais de *uplink* e *downlink*. Essa assimetria gera velocidades de *upload* mais baixas se comparadas ao *download*. Além disso, os padrões de celular geralmente possuem mais métricas considerando o *downlink*. Entretanto, inúmeras aplicações cada vez mais comuns exigem uma alta taxa de dados no *uplink*, como videoconferência, compartilhamento de arquivos, *live streamings* e postagens de fotos e vídeos em redes sociais (EYCEYURT, ZEC, 2020). Considerando a assimetria *downlink-uplink*, os cenários de estudo de caso em questão proporcionam a utilização dessas aplicações e fornecem uma visão interessante dos testes considerando o *uplink*.

A Figura 29 mostra os resultados comparativos do cenário 1, utilizando as medições coletadas da gNodeB localizada na Praia de Copacabana. Foram consideradas para análise medições horárias do dia 3 de maio de 2024, dia útil com tráfego dentro do usual na região.

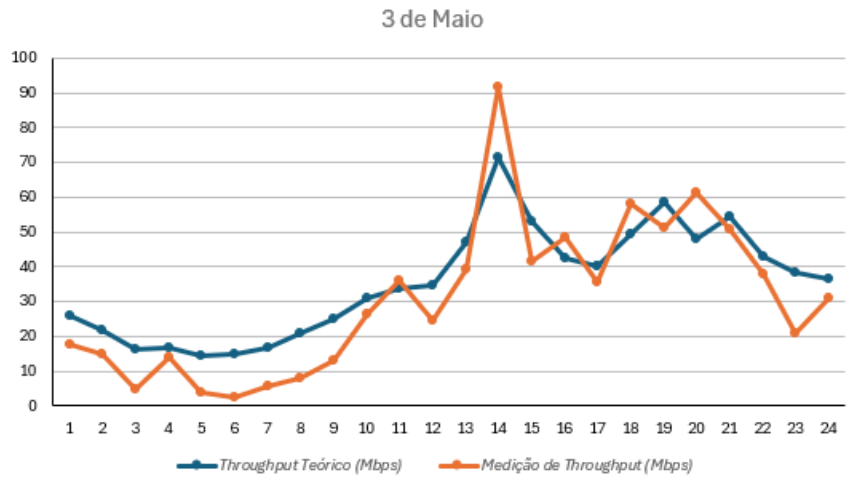


Figura 29 – Variação horária dos valores teóricos e das medições reais de *throughput* do cenário 1 no *uplink* em 3 de maio de 2024

Como se pode perceber, não houve necessidade de um fator de escala para ajuste. Há uma correlação direta entre os valores de *throughput* teóricos e os valores coletados das medições, se considerado o *uplink*. Isso aparentemente corrobora a hipótese discutida anteriormente sobre a diferença entre o *throughput* previsto e o real, onde uma maior utilização de PRBs, que explora mais o potencial de largura de banda, impacta nos resultados encontrados

Com a finalidade de enriquecer o banco de dados e obter visões a partir de ambientes distintos, a análise comparativa considerando o *uplink* foi realizada em mais alguns cenários. A Figura 30 mostra os resultados comparativos do cenário 2, utilizando as medições coletadas da

gNodeB localizada na Avenida Abelardo Bueno. Foram consideradas para análise medições horárias do dia 7 de maio de 2024.

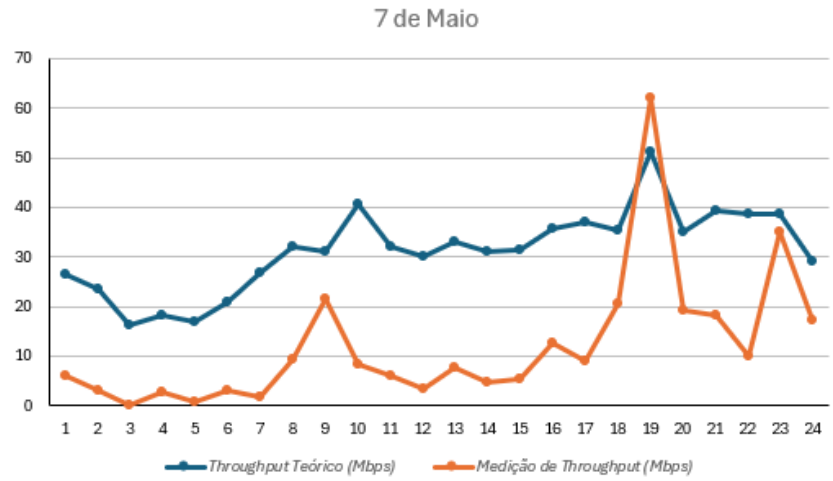


Figura 30 – Variação horária dos valores teóricos e das medições reais de *throughput* do cenário 2 no *uplink* em 7 de maio de 2024

É possível verificar que também não foi necessário o uso de um fator de escala para ajuste nesse caso. Além disso, é importante observar que, durante os horários de pico de trânsito, entre 18:00 e 20:00, o aumento da carga na rede aproxima as curvas de *throughput*.

Por fim, a Figura 31 mostra os resultados comparativos do cenário 4, utilizando as medições coletadas da gNodeB *indoor* localizada no shopping *New York City Center*. Foram consideradas para análise medições horárias do dia 18 de julho de 2024.

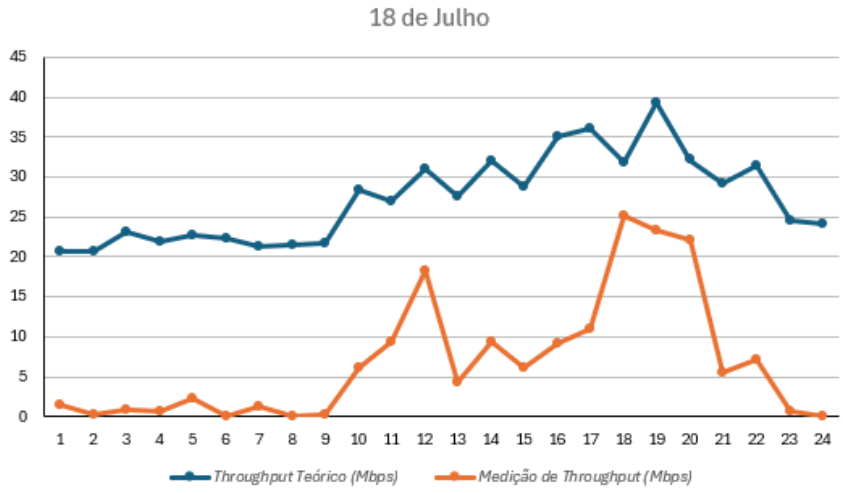


Figura 31 – Variação horária dos valores teóricos e das medições reais de *throughput* do cenário 4 no *uplink* em 18 de julho de 2024

Mais uma vez, não foi necessário o uso de um fator de escala para ajuste. E, assim como no *downlink*, mantém-se o aumento do *throughput* no período de funcionamento do shopping, entre 10:00 e 22:00, corroborando o impacto que o número de usuários conectados possui na análise.

Devido a uma falta de dados consistentes na amostragem coletada no *uplink*, o cenário 3 não foi considerado nesta seção. A média horaria de usuários conectados foi muito baixa, tornando inviável a análise gráfica comparativa entre os *throughputs* teóricos e reais.

4.2 – Tráfego durante dia extraordinário

Visto que o aumento no volume de tráfego de dados impacta diretamente nos resultados dos testes realizados, ter uma visão de cenários em um dia extraordinário, com um número de usuários conectados acima do usual, enriquece o estudo proposto e o embasamento para chegar a conclusões importantes.

4.2.1 – Evento na Praia de Copacabana

No dia 4 de maio de 2024, a Praia de Copacabana sediou um grande evento. O público presente estimado no concerto foi de cerca de 1,6 milhão de pessoas, tornando esse, um dia completamente atípico em relação ao tráfego usual na região. Os resultados dos testes foram analisados focando na evolução horária do tráfego ao decorrer do dia, observando o pico no período em que o show aconteceu.

A Figura 32 compara a variação horária das medições e da previsão híbrida, considerando o *downlink*, utilizando diferentes fatores de escala a cada hora. A Tabela 7 apresenta as previsões teóricas ajustadas com seus respectivos fatores de escala horários e seus redutores. Um fator de escala de 75 foi adotado como fator padrão de referência, com o qual houve uma boa aderência na parte inicial do dia, quando o tráfego na região estava com seu comportamento usual. À medida que as horas passavam e a hora do evento se aproximava, o número de usuários conectados aumentou consideravelmente, bem como o uso real da largura de banda disponível de cada PRB, levando a uma redução progressiva do fator escala, atingindo seu mínimo entre 20:00 e 22:00, horário do show, onde houve o maior número possível de usuários ativos e um pico de tráfego de dados. A análise de tal dia atípico é mais um indício que corrobora a hipótese anteriormente

declarada: uma situação de maior estresse da rede traz melhor convergência entre as previsões calculadas pela equação teórica híbrida proposta e o tráfego real.

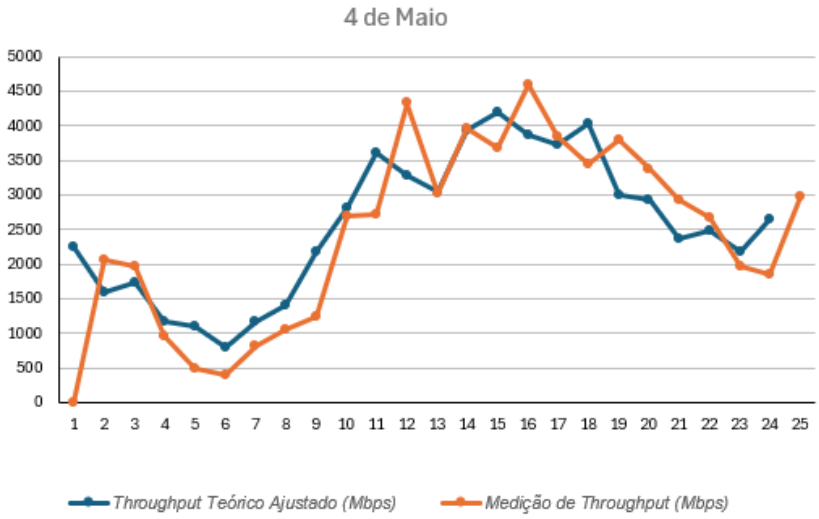


Figura 32 – Variação horária do *throughput* teórico, ajustado com diferentes fatores de escala por hora, e das medições reais de *throughput* do cenário 1 no *downlink* em 4 de maio de 2024

A Figura 33 compara a variação horária das medições e da previsão híbrida, no dia do evento em Copacabana, mas agora considerando o *uplink*. Um comportamento de convergência entre as curvas é observado. Há uma pequena diferença nos valores de *throughput*, porém diferente do *downlink*, com a mesma magnitude, não sendo necessário o ajuste com um fator de escala. Isso se deve ao tipo de utilização do UE em um evento desse tipo, onde fotos e vídeos são postados em grande volume, além de muitas transmissões ao vivo, consumindo uma grande largura de banda no *uplink*.

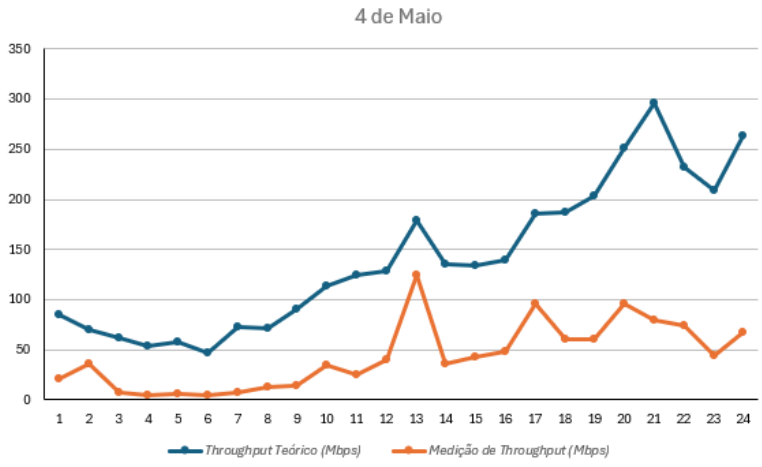


Figura 33 – Variação horária do *throughput* teórico e das medições reais de *throughput* do cenário 1 no *uplink* em 4 de maio de 2024

Tabela 7 – *Throughput* híbrido previsto e fatores de escala observados na gNodeB do cenário 1 no *downlink* em 4 de maio de 2024

Hora	***Throughput* Teórico Ajustado**	**Redutor de Fator de Escala**	**Fator de Escala**
0:00	2239,14	1	75
1:00	1596,74	1	75
2:00	1729,57	1	75
3:00	1169,22	1	75
4:00	1110,32	1	75
5:00	785,94	1	75
6:00	1177,72	1	75
7:00	1411,36	1	75
8:00	2183,94	1	75
9:00	2808,25	1	75
10:00	3599,37	1	75
11:00	3274,10	1,50	50
12:00	3040,13	1,50	50
13:00	3928,63	1,50	50
14:00	4188,44	1,50	50
15:00	3879,56	1,50	50
16:00	3717,54	2	37,50
17:00	4039,73	2	37,50
18:00	2997,80	3	25
19:00	2935,45	4	18,75
20:00	2357,70	5	15
21:00	2472,72	5	15
22:00	2186,94	5	15
23:00	2655,23	3	25

4.2.2 – Evento na Arena da Avenida Abelardo Bueno

No dia 8 de maio de 2024, ocorreu um show com um grande público em uma das arenas do parque olímpico, aumentando o número de usuários conectados à noite se comparado ao tráfego usual da região em um dia de semana. Assim como no cenário 1, a Figura 34 compara a variação horária das medições e da previsão híbrida, considerando o *downlink*, utilizando diferentes fatores de escala a cada hora. A Tabela 8 apresenta as previsões teóricas ajustadas com seus respectivos fatores de escala horários e seus redutores.

Um fator de escala de 150 foi adotado como fator padrão de referência, que apresentou boa aderência no período da manhã. No decorrer do período da tarde e à noite, com o horário de pico do trânsito na avenida somado à grande movimentação para o show, há um aumento no número de usuários conectados e consequentemente uma redução no fator de escala. Em um dia com um tráfego um pouco acima do usual nessa via movimentada, uma situação de maior estresse da rede traz melhor convergência entre as previsões calculadas pela equação teórica e as medições reais.

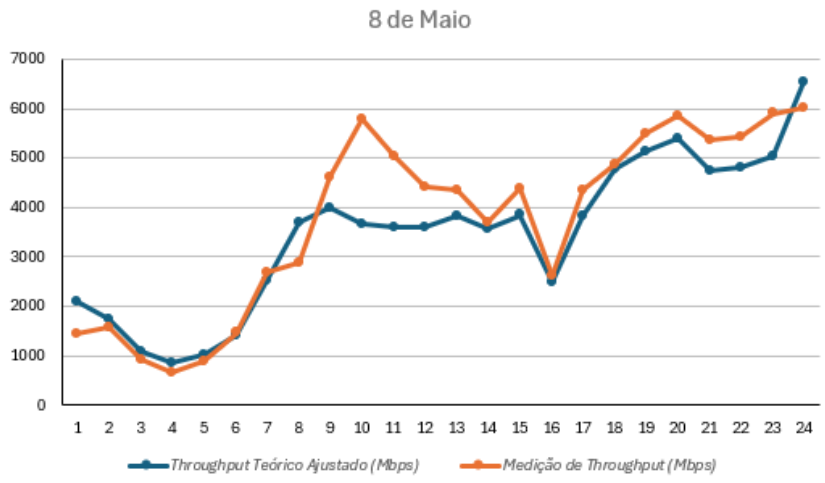


Figura 34 – Variação horária do *throughput* teórico, ajustado com diferentes fatores de escala por hora, e das medições reais de *throughput* do cenário 2 no *downlink* em 8 de maio de 2024

Tabela 8 – *Throughput* híbrido previsto e fatores de escala observados na gNodeB do cenário 2 no *downlink* em 8 de maio de 2024

Hora	***Throughput* Teórico Ajustado**	**Redutor de Fator de Escala**	**Fator de Escala**
0:00	2110,60	1	150
1:00	1725,76	1	150
2:00	1079,59	1	150
3:00	864,29	1	150
4:00	1013,59	1	150
5:00	1427,48	1	150
6:00	2530,18	1	150
7:00	3712,14	1	150
8:00	4005,77	1	150
9:00	3671,19	1	150
10:00	3598,80	1	150
11:00	3596,92	1	150
12:00	3822,19	1,25	120
13:00	3580,48	1,25	120
14:00	3847,04	1	150
15:00	2482,76	2	75
16:00	3818,05	1,5	100
17:00	4772,34	2	75
18:00	5148,46	1,5	100
19:00	5386,94	1	150
20:00	4739,75	1,25	120
21:00	4809,57	1,25	120
22:00	5024,05	1,25	120
23:00	6556,09	1	150

A Figura 35 compara a variação horária entre a previsão híbrida e as medições reais na Avenida Abelardo Bueno em 8 de maio, dessa vez considerando o *uplink*. Há novamente uma semelhança no comportamento das curvas, com valores na mesma escala de grandeza, sem a necessidade de um fator de escala para ajuste. É possível observar uma diferença maior durante as primeiras horas do dia, quando o número de usuários conectados é zero ou muito baixo. As curvas convergem durante o horário de pico no trânsito da via e a partir das 23:00, horário do término do evento, quando havia uma grande concentração de pessoas caminhando pela avenida.

Logo, novamente no *uplink*, foi observada uma boa convergência sem a necessidade de um fator de escala, devida às suas características de uso. É importante notar um aumento no *throughput* nos horários de pico de tráfego, devido ao aumento na plenitude de utilização dos PRBs, o que impacta diretamente a equação de capacidade.

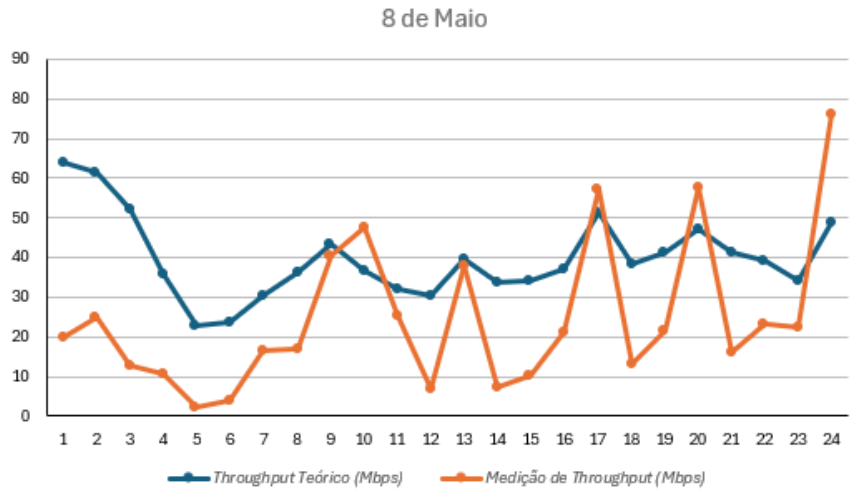


Figura 35 – Variação horária do *throughput* teórico e das medições reais de *throughput* do cenário 2 no *uplink* em 8 de maio de 2024

4.2.3 – Evento no Morro da Urca

No dia 20 de abril de 2024, além do grande número de turistas que visita o Pão de Açúcar regularmente, ocorreu um evento com show no Morro da Urca que também impactou o tráfego no bondinho no período da noite. Assim como nos cenários anteriores, a Figura 36 compara a variação horária das medições e da previsão híbrida, considerando o *downlink*, utilizando diferentes fatores de escala a cada hora.

Por se tratar de um cenário com características e comportamento um pouco diferentes, onde a gNodeB de referência é uma *small cell* em ambiente fechado, com melhores níveis de CQI, e utilizando a tecnologia 5G DSS, para melhor aderência, não foi adotado um fator de escala de

referência, e sim um fator distinto para cada hora, que atendeu à demanda de comportamento nesse dia atípico. A Tabela 9 apresenta as previsões teóricas ajustadas com seus respectivos fatores de escala horários.

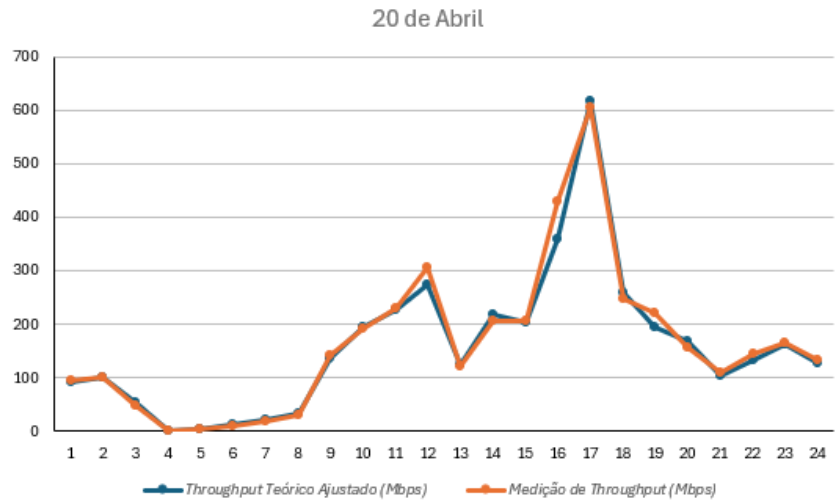


Figura 36 – Variação horária do *throughput* teórico, ajustado com diferentes fatores de escala por hora, e das medições reais de *throughput* do cenário 3 no *downlink* em 20 de abril de 2024

Novamente devido a uma falta de dados consistentes na amostragem coletada, não foi considerado o *uplink* na análise do dia extraordinário do cenário 3. A média horária de usuários conectados foi muito baixa, tornando inviável a análise gráfica comparativa entre os *throughputs* teóricos e reais.

Tabela 9 – *Throughput* híbrido previsto e fatores de escala observados na gNodeB do cenário 3 no *downlink* em 20 de abril de 2024

Hora	***Throughput* Teórico Ajustado**	**Fator de Escala**
0:00	91,02	12,96
1:00	100,41	14,14
2:00	53,71	7,77
3:00	1,11	0,19
4:00	3,77	0,64
5:00	11,84	2,16
6:00	21,49	4,86
7:00	32,82	6,48
8:00	136,90	22,22
9:00	193,85	31,11
10:00	226,86	17,28
11:00	275,43	38,89
12:00	125,38	17,28
13:00	217,89	31,11
14:00	202,79	22,22
15:00	359,20	38,89
16:00	617,59	38,89
17:00	260,49	31,11
18:00	194,50	25,92
19:00	168,68	25,92
20:00	104,50	19,44
21:00	132,14	19,44
22:00	161,43	19,44
23:00	128,00	19,44

4.3 – Conclusões parciais

Após analisar os diversos resultados obtidos nos testes realizados, algumas conclusões parciais são importantes de se pontuar. Considerando o *downlink* foi observada uma correlação entre os comportamentos das medições reais e os resultados teóricos da equação ajustada, porém com uma diferença considerável entre as escalas de magnitude dos valores de *throughput*. Concluiu-se que essa diferença está atrelada ao tipo de uso de um aparelho celular por um usuário regular atualmente, onde a alocação de PRB não explora todo o potencial de largura de banda, levando a uma previsão de *throughput* subestimada.

Essa hipótese foi corroborada com a análise dos testes no *uplink*, com um consumo maior da banda, devido ao tipo de utilização. Além da correlação, foi obtida também a convergência entre as curvas sem a necessidade de ajuste com fator de escala.

Realizar os testes em cenários distintos e considerando dias com tráfego extraordinário, também proporcionou algumas observações: ambientes *indoor* apresentam níveis melhores de CQI, impactando diretamente nos resultados da equação teórica e nas medições coletadas. O horário de funcionamento restrito dos cenários 3 e 4 também possui influência direta nos resultados observados, graças ao aumento do tráfego no período em que estão abertos. Essa influência fica clara quando observado o comportamento das curvas diárias. Além disso, pôde-se notar a diferença no desempenho de *throughput* se considerado o 5G DSS em comparação ao 5G *StandAlone*.

Os dias com realização de eventos também comprovaram o impacto direto que o aumento extraordinário do número de usuários conectados e consequentemente do tráfego de dados possui nos estudos de capacidade. Com a variação das medições nos KPIs práticos coletados, observou-se uma diferença interessante nas curvas comparativas e nos ajustes a serem realizados se comparados aos dias de tráfego usual. Esse ponto foi bem ilustrado a partir das tabelas de *throughput* híbrido previsto e variação horária dos fatores de escala.

É importante pontuar que, para realizar uma análise adequada, é fundamental uma amostragem de dados consistente que permita uma visualização gráfica completa das curvas de *throughput*. Amostras com falhas de medição ou com médias de usuários conectados extremamente baixas, impossibilitam uma visualização ideal dos comportamentos necessários para gerar conclusões pertinentes.

5. Considerações Finais

Esta dissertação apresentou uma proposta de otimização do estudo teórico e preditivo de capacidade no planejamento de uma rede móvel 5G, por meio da utilização de KPIs práticos obtidos a partir de medições reais coletadas das gNodeBs. Com o objetivo de enriquecer esta análise, foi realizada uma revisão sistemática da literatura, apresentada no capítulo 1. Esta pesquisa bibliográfica proporcionou uma série de visões e observações importantes sobre o tema. Inicialmente, verificou-se a importância do estudo de capacidade na gestão de alto nível em empresas de telecomunicações. Outro aspecto importante foi a relação do CQI com a eficiência espectral, que é o produto de dois parâmetros fundamentais no estudo (o índice de modulação e o *code rate*). O último aspecto foi o impacto do volume de dados e da alocação dinâmica de PRBs nos resultados de *throughput* observados. Todos esses pontos contribuíram para a construção do modelo híbrido proposto, baseado na equação padrão do 3GPP, utilizada para calcular o máximo *throughput* teórico.

No capítulo 2, foram apresentados, primeiramente, alguns aspectos do 5G importantes para o embasamento teórico desta dissertação e que impactam diretamente na análise. Para tal, fez-se uma breve apresentação sobre *link budget* e algumas variáveis que compõem o balanço de enlace, tópico fundamental em um estudo de capacidade. Em seguida, realizou-se uma introdução teórica resumida sobre forma de onda, esquemas de modulação e outros parâmetros relevantes para este trabalho (*Physical resource block, numerology* e *sub-carrier spacing*). Depois, fez-se uma introdução sobre o estudo de capacidade e a apresentou-se a equação de cálculo do *throughput* máximo 5G, com a descrição detalhada de cada parâmetro que compõe a fórmula. Os KPIs práticos nos quais foram coletadas as medições, são a base para a proposta de adequação da equação teórica e foram descritos na sequência, incluindo uma revisão bibliográfica sobre o CQI, que é o KPI chave no estudo. Por fim, apresentou-se um aprofundamento sobre a relação entre o CQI e a eficiência espectral, trazendo um ponto fundamental desta pesquisa que é a relação entre o CQI e dois parâmetros da fórmula.

O capítulo 3, por sua vez, foi reservado para a metodologia de trabalho adotada na realização dos testes e na análise subsequente. Inicialmente foi apresentada a forma de abordagem do problema em questão, com a descrição do método de análise e a estratégia utilizada para obtenção da base de dados para os testes. Em seguida, foram apresentados os cenários de referência do trabalho, com a descrição das principais características e peculiaridades. Adicionalmente, há a ilustração dos pontos de localização das gNodeBs nas quais foram coletadas as medições do KPIs

práticos. Além disso, os parâmetros de configuração utilizados em cada cenário foram descritos em tabelas. Por fim, a descrição da metodologia traz os ajustes e as ações realizadas para se alcançar os resultados pretendidos na dissertação, caracterizando assim a equação híbrida proposta.

O capítulo 4 apresentou os dados advindos das medições coletadas de cada cenário descrito no capítulo 3 e então foram feitas as análises e discutidos os resultados dos testes. Inicialmente foram consideradas as medições nos dias de comportamento usual de tráfego, com número de usuários conectados dentro do padrão para os locais de referência. Em seguida, foram consideradas medições nos dias marcados por eventos extraordinários. Nesse caso, com uma concentração de usuários conectados bem acima do usual, foi possível observar o impacto que esse aumento no tráfego de dados causa no estudo de capacidade e nos resultados da análise proposta.

Nesta dissertação, a partir da definição da equação teórica padrão do 3GPP para cálculo do *throughput* máximo, alguns KPIs práticos coletados de medições de campo foram apresentados, impactando diretamente no estudo de capacidade, e juntamente com alguns parâmetros "fixos" originais, formaram uma equação híbrida que forneceu uma previsão teórica com granularidade horária. Vários testes foram realizados em diferentes cenários reais de utilização, e concluiu-se que, embora exista uma limitação no estudo quando considera-se a análise no *downlink*, devida a uma diferença nas escalas de magnitude dos valores finais, as previsões teóricas e comportamentos reais de *throughput* possuem clara correlação.

Aplicando um fator de escala multiplicativo, boa correlação foi convertida para boa convergência. A hipótese foi que com maior intensidade de uso da rede e consequentemente maior utilização de PRBs as previsões híbridas teóricas e as medições reais se aproximam, eventualmente atingindo um fator de escala multiplicativo com valor unitário ideal. Isso foi corroborado por testes considerando tráfego no *uplink* e no *downlink* em dias atípicos com alta demanda de usuários.

Portanto, este trabalho indica um caminho interessante para utilizar o modelo teórico do 3GPP para análise de capacidade, que combinado com KPIs de dados reais, pode ser útil para propor modelos semiempíricos de previsão de capacidade, que podem servir como suporte para planejamento de redes 5G ou estudos baseados em simulações realistas.

Logo, esta análise pode se tornar uma ferramenta interessante em estudos de capacidade para diversos casos de uso e cenários diferentes. A partir de um histórico de dados coletados, seria possível propor modelos de predição baseados no modelo híbrido para quaisquer localidades que necessitem de atendimento móvel.

Como sugestão para contribuições futuras, aplicar o teste de estresse da célula em tempo real na equação híbrida de predição, o que ainda não foi possível neste trabalho devido a uma

limitação na ferramenta de coleta de medições. Para tal, será necessário buscar ferramentas com uma granularidade de medições na casa dos minutos, para gerar os KPIs práticos necessários. Desta forma, seria possível aprofundar a análise do impacto que a maior utilização do potencial de largura de banda possui na convergência dos resultados no *downlink*.

Referências Bibliográficas

3GPP – 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT. **Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Layer Procedures,** TS 36.213 v14.2.0 Release 14, Valbonne, 2017a.

3GPP – 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT. **NR; Physical Channels and Modulation,** TS 38.211 v17.2.0 Release 17, Valbonne, 2022.

3GPP – 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT. **NR; User Equipment (UE) Radio Access Capabilities**, TS 38.306 v15.7.0 Release 15, Valbonne, 2019.

3GPP – 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT. **Study on New Radio Access Technology Physical Layer Aspects**, TR 38.802 v14.2.0 Release 14, Valbonne, 2017b.

ALAM, M. *et al*. Smart Cameras Are Making Our Beaches Safer: A 5G-Envisioned Distributed Architecture for Safe, Connected Coastal Areas. **IEEE Vehicular Technology Magazine,** v. 12, n. 4, p. 50 – 59, 2017.

BURITICA, A. From Waveforms to MIMO: 5 Things for 5G New Radio. **Microwave Journal**, v. 62, n. 5, p. 142, 2019.

CHEVALIER, C. *et al*. **WCDMA (UMTS) Deployment Handbook: Planning and Optimization Aspects, 1st Ed.** New Jersey: Wiley, 2006.

DAHLMAN, E.; PARKVALL, S.; SKOLD, J. **4G LTE-Advanced Pro and The Road to 5G, 3rd Ed**. Massachusetts: Academic Press, 2016.

DAHLMAN, E.; PARKVALL, S.; SKOLD, J. **5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology, 2nd Ed**. Massachusetts: Academic Press, 2020.

DE JAVEL, A. **5G RAN: Physical Layer Implementation and Network Slicing. Networking and Internet Architecture**. 2022. Tese (Doutorado em Rede, Informação e Comunicações) – École doctorale de l'Institut Polytechnique de Paris (EDIPP), Paris.

ESPIÑEIRA, P.; FONTÁN, F. **Modeling the Wireless Propagation Channel: A Simulation Approach with MATLAB.** New Jersey: Wiley, 2008.

EYCEYURT, E.; ZEC, J. Uplink Throughput Prediction in Cellular Mobile Networks. **International Journal of Electronics and Communication Engineering**, v. 14, n. 6, p. 149 – 153, 2020.

FAN, J. *et al*. Adaptive Block-Level Resource Allocation in OFDMA Networks. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 10, n. 11, p. 3966 – 3972, 2011.

HAMIDOVIC, D. *et al*. 5G Campus Network Factory Floor Measurements with Varying Channel and QoS Flow Priorities. *In*: ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY (IECON), 49., 2023, Singapore. Singapore: IEEE, 2023. p. 1 – 6.

KIM, H. Coding and Modulation Techniques for High Spectral Efficiency Transmission in 5G and Satcom. *In*: EUROPEAN SIGNAL PROCESSING CONFERENCE (EUSIPCO), 23., 2015, Nice. Nice: IEEE, 2015. p. 2746 – 2750.

KORRAI, P *et al*. Joint Power and Resource Block Allocation for Mixed-Numerology-Based 5G Downlink Under Imperfect CSI. **IEEE Open Journal of the Communications Society**, v. 1, p. 1583 – 1601, 2020.

LOUNG, V.; NGAH, R.; HAN, C. Capacity Estimation for 5G Cellular Networks. **Turkish Journal of Computer and Mathematics Education**, v. 12, n. 3, p. 5876 – 5883, 2021.

MARTÍNEZ, J. *et al*. Radio Access Evaluation of Commercial 5G Service. **Electronics**, v. 10, n. 22, p. 1 – 11, 2021.

MU, Q. CQI Table Design to Support 256 QAM in Small Cell Environment. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIRELESS COMMUNICATIONS AND SIGNAL PROCESSING (WCSP), 5., 2013, Hangzhou. Hangzhou: IEEE, 2013. p. 1 – 5.

NASRI, M.; HAMDI, M. WCDMA Mean User Throughput Prediction Using Linear Regression Algorithm. *In*: CONFERENCE ON INNOVATION IN CLOUDS, INTERNET AND NETWORKS AND WORKSHOPS (ICIN), 22., 2019, Paris. Paris: IEEE, 2019. p. 139 – 144.

RAJ, D. *et al*. Enabling Technologies to realise Smart Mall Concept in 5G Era. *In*: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL INTELLIGENCE AND COMPUTING RESEARCH (ICCIC), 2018, Madurai. Madurai: IEEE, 2019. p. 1 – 6.

SAHA, R.; CIOFFI, J. Dynamic Spectrum Sharing for 5G NR and 4G LTE Coexistence - A Comprehensive Review. **IEEE Open Journal of the Communications Society**, v. 5, p. 795 – 835, 2024.

SHARIATMADARI, H. *et al*. Fifth-Generation Control Channel Design: Achieving Ultrareliable Low-Latency Communications. **IEEE Vehicular Technology Magazine**, v. 13, n. 2, p. 84 – 93, 2018.

TAKEDA, K. *et al*. Understanding the Heart of the 5G Air Interface: An Overview of Physical

Downlink Control Channel for 5G New Radio. **IEEE Communications Standards Magazine**, v. 4, n. 3, p. 22 – 29, 2020.

TIM BRASIL. **5G SA e NSA - Guidelines e Orientações Gerais para Design e Rollout**. Rio de Janeiro, 2021.

VIHRIÄLÄ, J. *et al*. Numerology and Frame Structure for 5G Radio Access. *In*: IEEE ANNUAL INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PERSONAL, INDOOR, AND MOBILE RADIO COMMUNICATIONS (PIMRC), 27., 2016, Valencia. Valencia: IEEE, 2016. p. 1 – 5.

WANG, W. *et al*. Realizing the Potential of the Internet of Things for Smart Tourism with 5G and AI. **IEEE Network**, v. 34, n. 6, p. 295 – 301, 2020.

WANG, Y.; LIU, W.; FANG, L. Adaptive Modulation and Coding Technology in 5G System. *In*: INTERNATIONAL WIRELESS COMMUNICATIONS AND MOBILE COMPUTING (IWCMC), 16., 2020, Limassol. Limassol: IEEE, 2020. p. 159 – 164.

YANG, Y.; HUA, K. Emerging Technologies for 5G-Enabled Vehicular Networks. **IEEE Access**, v. 7, p. 181117 – 181141, 2019.

YUAN, Y.; WANG, X. 5G New Radio: Physical Layer Overview. **ZTE Communications**, v. 15, n. 1, p. 3 – 10, 2017.