



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E TECNOLOGIA
CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

PAULO HENRIQUE DE SOUZA RÊGO

**ANÁLISE COMPARATIVA DA OCUPAÇÃO DE RECURSOS DE RÁDIO EM
REDES 5G SA PARA APLICAÇÕES FWA: CPE Indoor versus Outdoor**

PAU DOS FERROS

2026

PAULO HENRIQUE DE SOUZA RÊGO

**ANÁLISE COMPARATIVA DA OCUPAÇÃO DE RECURSOS DE RÁDIO EM
REDES 5G SA PARA APLICAÇÕES FWA: CPE Indoor versus Outdoor**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Computação.

Orientador: Francisco Carlos Gurgel da Silva Segundo, Prof. Dr.

Coorientador: Pedro Thiago Valério de Souza, Prof. Dr.

PAU DOS FERROS

2026

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

R343a Rêgo, Paulo Henrique de Souza.
Análise comparativa da ocupação de recursos
de rádio em redes 5G SA para aplicações FWA: CPE
Indoor versus Outdoor / Paulo Henrique de Souza
Rêgo. - 2026.
40 f. : il.

Orientador: Francisco Carlos Gurgel da Silva
Segundo.

Coorientador: Pedro Thiago Valério de Souza.
Monografia (graduação) - Universidade
Federal Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia de
Computação, 2026.

1. 5G SA. 2. FWA. 3. PRB. 4. Eficiência
Espectral. 5. CPE. I. Segundo, Francisco Carlos
Gurgel da Silva, orient. II. de Souza, Pedro Thiago
Valério, co-orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Pau dos Ferros
Bibliotecária: Erlanda Maria Lopes da Silva
CRB: 15/966

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

PAULO HENRIQUE DE SOUZA RÊGO

**ANÁLISE COMPARATIVA DA OCUPAÇÃO DE RECURSOS DE RÁDIO EM
REDES 5G SA PARA APLICAÇÕES FWA: CPE Indoor versus Outdoor**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Computação.

Defendida em: 06 / 07 / 2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Carlos Gurgel da Silva Segundo (UFERSA)
Presidente

Prof. Dr. Pedro Thiago Valério de Souza (UFERSA)
Membro Examinador

Prof. Dr. Cecílio Martins de Sousa Neto (UFERSA)
Membro Examinador

Prof. Dr. José Garibaldi Duarte Júnior (UFERSA)
Membro Examinador

DEDICATÓRIA

*Dedico esta conquista à memória da minha avó
Maria Francisca de Jesus, que me ensinou que
a sabedoria é o nosso maior tesouro. Obrigado
por tudo. (In Memoriam).*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Maria Aparecida Gomes, por ser minha base, meu porto seguro e por acreditar no meu potencial mesmo nos dias mais difíceis desta jornada acadêmica.

Agradeço aos meus pais, Francisco de Paulo Rêgo e Edriene de Souza Sobrinho Rêgo, que são a minha base, e a razão de todas as minhas conquistas. Obrigado pelo amor incondicional, pelos sacrifícios e por sempre acreditarem nos meus sonhos.

Ao meu orientador, Francisco Carlos Gurgel da Silva Segundo, expresso minha profunda gratidão por sua condução firme, paciência e generosidade em compartilhar seu conhecimento. Seus apontamentos precisos e sua dedicação foram essenciais para o amadurecimento e a realização deste trabalho.

À Banca Examinadora, agradeço pela disponibilidade, pelo tempo dedicado à leitura minuciosa deste estudo e pelas valiosas contribuições que certamente enriquecerão este trabalho.

Aos meus grandes amigos que fizeram parte da Rêgo House, agradeço pelas longas conversas, pelas discussões produtivas, pelos momentos de descontração e por tornarem a rotina acadêmica muito mais leve e significativa.

EPÍGRAFE

“O desenvolvimento do homem depende fundamentalmente da invenção. Ela é o produto mais importante de sua mente criativa.”

Nikola Tesla

RESUMO

O avanço das redes 5G *Standalone* SA ampliou as possibilidades de oferta de banda larga fixa sem fio por meio do *Fixed Wireless Access* FWA, tornando relevante a análise da eficiência no uso dos recursos de rádio. Este trabalho tem como objetivo comparar o desempenho de duas *Customer Premises Equipment* CPEs FWA, uma do tipo *Indoor* e outra do tipo *Outdoor*, quanto à qualidade do sinal e à ocupação de *Physical Resource Blocks* PRBs em uma rede 5G SA. A pesquisa caracteriza-se como um estudo experimental de campo, utilizando dois equipamentos de um mesmo fabricante, ambos baseados no processador MediaTek T750 e no módulo Fibocom FG360-EAU. Para reduzir interferências decorrentes de diferenças de cobertura, os dispositivos foram posicionados no mesmo ponto externo de uma residência, sobre um tripé a 1,20 m de altura, e travados no mesmo rádio por meio do *Physical Cell Identifier* PCI, com medições realizadas nas bandas n40 e n78. Foram coletados parâmetros de Reference Signal Received Power RSRP, Reference Signal Received Quality RSRQ, Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio SINR, velocidade de transmissão, *throughput* MAC e ocupação de PRBs em tarefas de *downlink* e *uplink*. Os resultados obtidos demonstraram que a CPE *Outdoor* apresentou melhor nível de recepção na banda n78, com RSRP de aproximadamente -67 dBm, contra -75 dBm da CPE *Indoor*. Entretanto, no cenário externo controlado, a CPE *Indoor* apresentou maior eficiência de uso dos PRBs, atingindo 2.738,69 Bits/PRB na banda n78 e 2.455,41 Bits/PRB na banda n40, enquanto a CPE *Outdoor* registrou 2.134,67 Bits/PRB e 2.204,64 Bits/PRB, respectivamente. Conclui-se que a eficiência na ocupação de PRBs não depende exclusivamente do nível de potência recebido, mas também de fatores como arranjo de antenas, comportamento MIMO, modulação, qualidade do enlace e condições de escalonamento da rede. Como continuidade do estudo, recomenda-se realizar novos testes com a CPE *Indoor* posicionada no interior da residência, a fim de quantificar o impacto da perda de penetração das paredes sobre a eficiência espectral e o consumo de recursos de rádio.

Palavras-chave: 5G SA; FWA; PRB; eficiência espectral; CPE.

ABSTRACT

The advancement of 5G Standalone (SA) networks has expanded the feasibility of providing fixed broadband services through Fixed Wireless Access (FWA), making the analysis of radio resource utilization increasingly relevant. This study aims to compare the performance of two FWA Customer Premises Equipment (CPE) devices, one indoor and one outdoor, regarding signal quality and Physical Resource Block (PRB) utilization in a 5G SA network. The research was conducted as an experimental field study using two devices from the same manufacturer, both based on the MediaTek T750 processor and the Fibocom FG360-EAU module. To minimize interference caused by differences in network coverage, both devices were positioned at the same outdoor location of a residence on a tripod at a height of 1.20 m and locked to the same serving cell using the Physical Cell Identifier (PCI). Measurements were performed in the n40 and n78 frequency bands. The collected parameters included Reference Signal Received Power (RSRP), Reference Signal Received Quality (RSRQ), Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio (SINR), transmission speed, MAC throughput, and PRB utilization during both downlink and uplink transmissions. The results showed that the outdoor CPE achieved a higher received signal level in the n78 band, with an RSRP of approximately -67 dBm, compared to -75 dBm for the indoor CPE. However, under the controlled outdoor test scenario, the indoor CPE demonstrated higher PRB utilization efficiency, reaching 2,738.69 bits/PRB in the n78 band and 2,455.41 bits/PRB in the n40 band, whereas the outdoor CPE achieved 2,134.67 bits/PRB and 2,204.64 bits/PRB, respectively. The findings indicate that PRB utilization efficiency does not depend solely on the received signal power but is also influenced by factors such as antenna configuration, MIMO behavior, modulation scheme, link quality, and network scheduling conditions. As future work, additional experiments are recommended with the indoor CPE installed inside the residence to quantify the impact of wall penetration loss on spectral efficiency and radio resource utilization.

Keywords: 5G SA; Fixed Wireless Access (FWA); Physical Resource Block (PRB); spectral efficiency; Customer Premises Equipment (CPE).

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
5G	Quinta Geração de Redes Móveis
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CPE	<i>Customer Premises Equipment</i>
DL	<i>Downlink</i>
DNS	<i>Domain Name System</i>
eMBB	<i>Enhanced Mobile Broadband</i>
ERB	<i>Estação Rádio-Base</i>
FWA	<i>Fixed Wireless Access</i>
gNodeB	<i>Next Generation Node B</i> (Estação Rádio-Base 5G)
IBLER	<i>Initial Block Error Rate</i>
ICMP	<i>Internet Control Message Protocol</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MCS	<i>Modulation and Coding Scheme</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
mMTC	<i>Massive Machine Type Communications</i>
NR	<i>New Radio</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiple Access</i>
PCI	<i>Physical Cell Identifier</i>
PRB	<i>Physical Resource Block</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
RB	<i>Resource Block</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	Comparação entre as redes 4G LTE e 5G.....	15
2.2	O ecossistema 5G e o Fixed Wireless Access (FWA)	16
2.3	Modulação OFDM, OFDMA e a estrutura do PRB	16
2.4	Bandas de frequência n40 e n78.....	17
2.5	Principais métricas de qualidade do enlace de rádio.....	18
2.5.1	<i>Reference Signal Received Power (RSRP)</i>	18
2.5.2	<i>Reference Signal Received Quality (RSRQ)</i>	18
2.5.3	<i>Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio (SINR)</i>	19
2.6	Indicadores de desempenho e eficiência.....	19
3	DESCRIÇÃO DO PROJETO.....	21
3.1	Local de realização dos testes.....	22
3.2	Configuração dos equipamentos e procedimento experimental.....	23
3.3	Tratamento dos Dados.....	25
3.4	Estratégia de execução das medições.....	25
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	34
	REFERÊNCIAS	36
	APÊNDICE A – TABELA: RESUMO DE DADOS.....	39
	APÊNDICE B – GRÁFICOS GERADOS A PARTIR DOS DADOS....	40

1 INTRODUÇÃO

A introdução das redes móveis de quinta geração (5G) representou um avanço significativo nas comunicações sem fio ao proporcionar elevadas taxas de transmissão de dados, redução da latência, maior confiabilidade e aumento da capacidade de conexão simultânea de dispositivos (Alam et al., 2023). Essas características ampliaram as possibilidades de aplicação das redes móveis para além da telefonia e da internet móvel, permitindo o desenvolvimento de novos modelos de prestação de serviços, como cidades inteligentes, Internet das Coisas (IoT), indústria 4.0 e, especialmente, o *Fixed Wireless Access (FWA)*. Nesse contexto, o FWA destaca-se como uma solução capaz de fornecer acesso à banda larga fixa utilizando a infraestrutura das redes celulares, reduzindo custos e tempo de implantação quando comparado às redes convencionais de fibra óptica, sobretudo em regiões onde a expansão da infraestrutura cabeada apresenta limitações técnicas ou econômicas (GSA, 2024).

Com a evolução das arquiteturas *5G Standalone (SA)* e a adoção de implementações *cloud-native* no núcleo da rede, as operadoras passaram a dispor de maior flexibilidade para oferecer serviços de alto desempenho e, ao mesmo tempo, enfrentar o desafio de utilizar os recursos espectrais de forma cada vez mais eficiente (AMD, 2025). Nesse cenário, a capacidade de atender um número crescente de assinantes sem comprometer a qualidade do serviço depende diretamente da eficiência da interface aérea, tornando indispensável o gerenciamento adequado dos recursos físicos de rádio disponíveis em cada *Next Generation Node B (gNB)*.

Entre esses recursos, destacam-se os PRBs, que constituem a unidade básica de alocação de recursos no domínio da frequência e do tempo nas redes 5G. A quantidade de PRBs necessária para transmitir determinado volume de dados está diretamente relacionada às condições do enlace de rádio. Dessa forma, dispositivos que apresentam melhores condições de recepção do sinal, refletidas em métricas como *RSRP*, *RSRQ* e *SINR*, tendem a utilizar esquemas de modulação e codificação mais eficientes, reduzindo a ocupação dos PRBs para um mesmo *throughput*. Consequentemente, a otimização da utilização desses recursos contribui para aumentar a capacidade da célula, melhorar a eficiência espectral e ampliar o número de usuários atendidos simultaneamente (Melo; Jaciuk, 2015).

Apesar dos benefícios proporcionados pelo 5G para aplicações de acesso fixo sem fio, o desempenho dos enlaces FWA permanece fortemente dependente das condições de propagação do sinal e das características de instalação dos equipamentos terminais. Estudos realizados em cenários de acesso fixo sem fio demonstram que a penetração do sinal em edificações pode representar uma das principais fontes de degradação do enlace, especialmente

em frequências mais elevadas. Bas et al. (2017) verificaram que a propagação entre ambientes externos e internos pode ocasionar perdas significativas de potência, afetando diretamente a cobertura e a capacidade dos sistemas FWA.

Complementando esses resultados, Du et al. (2018a) avaliaram as perdas de penetração em residências suburbanas e observaram que a instalação de uma CPE no interior de uma edificação pode introduzir perdas adicionais entre 9 dB e 17 dB, dependendo das características construtivas da fachada e dos materiais empregados. Em outro estudo, Du et al. (2018b) demonstraram que essa atenuação reduz significativamente a taxa de transmissão disponível para usuários situados próximos aos limites de cobertura da célula, evidenciando a influência do posicionamento da CPE sobre o desempenho do enlace de rádio.

Apesar dos avanços apresentados pela literatura, ainda são escassas as pesquisas que avaliam, em cenários reais de operação, o impacto das características físicas das *Customer Premises Equipment* (CPEs) sobre a eficiência da utilização dos recursos de rádio. Em particular, permanece a necessidade de compreender como diferenças entre CPEs *Indoor* e *Outdoor*, mesmo quando equipadas com o mesmo *chipset*, influenciam não apenas a qualidade do enlace de rádio, mas também a ocupação dos *Physical Resource Blocks* (PRBs) em redes 5G *Standalone* (SA). Essa lacuna possui relevância prática para operadoras de telecomunicações, fabricantes de equipamentos e projetistas de redes, pois pode subsidiar decisões relacionadas à seleção de equipamentos, ao dimensionamento de capacidade e à otimização do uso do espectro.

Diante desse contexto, esta pesquisa busca responder à seguinte questão: de que forma a utilização de equipamentos do tipo (CPE) FWA *Indoor*, em comparação com modelos *Outdoor*, afeta a ocupação dos PRBs e o desempenho de uma rede 5G *Standalone*? Para responder a essa questão, o objetivo geral deste trabalho consiste em realizar uma análise comparativa da ocupação dos recursos de rádio e dos níveis de qualidade do sinal de radiofrequência: RSRP, RSRQ e SINR, entre duas CPEs FWA, uma *Indoor* e outra *Outdoor*, ambas equipadas com o mesmo *chipset*. Para isso, são analisados dados provenientes de testes práticos de estresse de *downlink* e *uplink* nas bandas n40 e n78, correlacionando a qualidade do enlace de rádio com a modulação alcançada, o *throughput* obtido e a quantidade de PRBs requerida por cada equipamento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O desenvolvimento das redes móveis de quinta geração (5G) representa uma das maiores transformações da infraestrutura de telecomunicações desde a introdução das redes celulares digitais. Diferentemente das gerações anteriores, concebidas principalmente para ampliar a capacidade de comunicação móvel, o 5G foi projetado para suportar um ecossistema heterogêneo de aplicações, incluindo banda larga móvel aprimorada (*enhanced Mobile Broadband* – eMBB), comunicações ultra confiáveis e de baixa latência (*Ultra-Reliable Low-Latency Communications* – URLLC) e comunicação massiva entre máquinas (*massive Machine Type Communications* – mMTC) (ITU, 2020).

Nesse contexto, a evolução das especificações do *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) permitiu a implementação da arquitetura 5G SA, baseada em um núcleo de rede nativo para o 5G (*5G Core* – 5GC), possibilitando maior flexibilidade na alocação dos recursos de rádio, virtualização das funções de rede, *network slicing* e maior eficiência operacional (3GPP, 2024). Essas características viabilizaram novos modelos de prestação de serviços, entre os quais se destaca o FWA, considerado atualmente uma das principais aplicações comerciais das redes 5G (GSA, 2024).

O crescimento do FWA tem impulsionado pesquisas relacionadas ao desempenho dos equipamentos instalados na residência do usuário, conhecidos como CPE. Diferentes características construtivas, como tipo de antena, posicionamento, ganho, polarização e configuração MIMO, podem alterar significativamente a qualidade do enlace de rádio e, conseqüentemente, a quantidade de recursos espectrais necessária para atender determinada demanda de tráfego (Dahlman; Parkvall; Sköld, 2021).

Sob essa perspectiva, compreender o funcionamento da interface aérea do 5G torna-se fundamental para interpretar os resultados obtidos nesta pesquisa. A eficiência da comunicação depende diretamente da relação entre a qualidade do canal de rádio, os esquemas de modulação empregados, a ocupação dos PRBs e o desempenho dos algoritmos de escalonamento implementados na estação rádio-base - gNodeB. Dessa forma, este capítulo apresenta os fundamentos teóricos necessários para compreender esses mecanismos e subsidiar a análise experimental desenvolvida ao longo deste trabalho.

Inicialmente, são discutidas as principais diferenças entre as redes 4G LTE e 5G NR, enfatizando os avanços introduzidos pela arquitetura do 5G SA. Em seguida, é apresentado o ecossistema do 5G e sua aplicação em serviços FWA, seguido pelos conceitos de multiplexação OFDM/OFDMA e pela estrutura dos PRBs. Posteriormente, são descritas as características das

bandas de frequência n40 e n78, utilizadas durante os experimentos. Por fim, são abordadas as principais métricas de radiofrequência empregadas na avaliação da qualidade do enlace e os indicadores utilizados para analisar a eficiência na utilização dos recursos de rádio.

2.1 Comparação entre as redes 4G LTE e 5G

A tecnologia 5G representa uma evolução das redes 4G *Long Term Evolution* LTE, oferecendo melhorias em capacidade de transmissão, eficiência espectral, latência e densidade de dispositivos conectados. Enquanto o 4G foi desenvolvido principalmente para fornecer banda larga móvel, o 5G foi projetado para atender aplicações mais diversificadas, como Internet das Coisas (IoT), comunicações ultra confiáveis e de baixa latência URLLC, além de soluções de *Fixed Wireless Access* FWA (ITU, 2015).

Embora ambas as tecnologias utilizem a multiplexação por divisão de frequências ortogonais (OFDM), o 5G *New Radio* NR introduz maior flexibilidade por meio da numerologia escalável, permitindo diferentes espaçamentos entre subportadoras, além de incorporar uma arquitetura baseada no 5GC. Esses avanços possibilitam recursos como *network slicing*, virtualização das funções de rede e uma alocação mais dinâmica dos recursos de rádio, aumentando a eficiência e a capacidade da rede em relação ao LTE (3GPP, 2024).

Em termos de desempenho, o 5G pode alcançar velocidades da ordem de gigabits por segundo, apresentar menor latência e suportar uma quantidade significativamente maior de dispositivos conectados por unidade de área. Essas características favorecem aplicações que exigem elevada capacidade de transmissão e tornam a tecnologia adequada para serviços como redes privadas, cidades inteligentes e acesso fixo sem fio (FWA), ampliando as possibilidades de utilização em comparação ao 4G (ITU, 2015).

Apesar das vantagens, a implantação do 5G apresenta desafios adicionais em relação ao LTE. A utilização de frequências mais elevadas reduz o alcance do sinal e aumenta a sensibilidade à atenuação por obstáculos físicos, exigindo maior densificação da infraestrutura. Além disso, técnicas como *beamforming* e *Massive MIMO*, fundamentais para o desempenho do 5G, demandam arranjos de antenas, algoritmos e planejamento de rede mais complexos, tornando sua implementação mais desafiadora quando comparada às redes 4G (Dahlman; Parkvall; Sköld, 2021).

2.2 O ecossistema 5G e o *Fixed Wireless Access* (FWA)

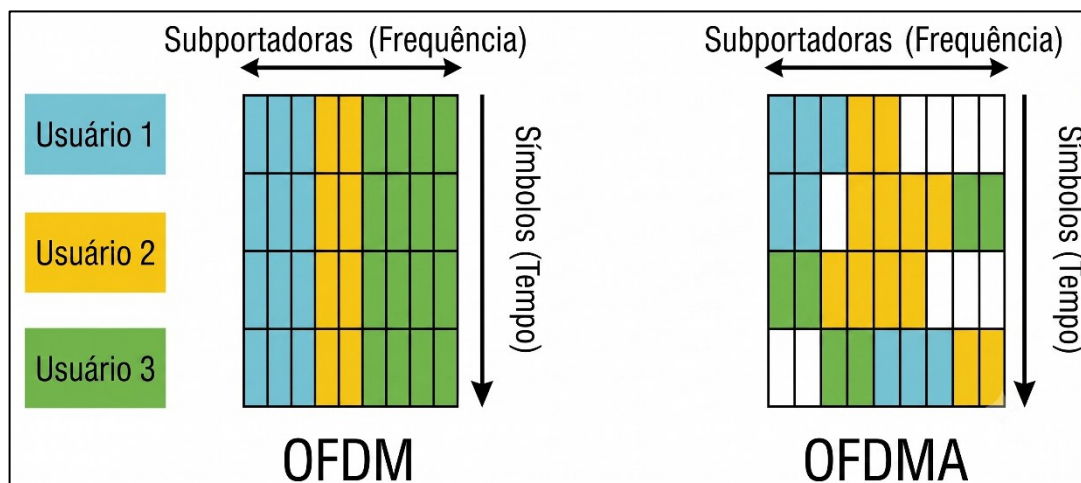
O desenvolvimento das redes 5G, pautado pelas diretrizes do IMT-2020 e das *releases* do 3GPP, introduziu novas capacidades focadas em *enhanced Mobile Broadband* (eMBB), *Ultra-Reliable Low-Latency Communications* (URLLC) e *massive Machine Type Communications* (mMTC) (ANALYSYS MASON, 2014). O FWA baseia-se primordialmente na capacidade da eMBB para prover serviços de conectividade fixa utilizando o espectro móvel, competindo diretamente com provedores de internet via cabo ou fibra (GSA, 2024a).

Com a evolução para o 5G-Advanced (a partir do *Release* 18 do 3GPP), espera-se ainda mais melhorias na arquitetura FWA, garantindo maior estabilidade no *uplink* e confiabilidade de conexão (Alam *et al.*, 2023). A arquitetura 5G *Standalone* (SA) se diferencia por possuir um núcleo de rede (*Core*) totalmente independente das antigas redes 4G LTE, permitindo fatiamento de rede (*network slicing*) e uma alocação de recursos muito mais inteligente e dinâmica pelas operadoras (ITU, 2015).

2.3 Modulação OFDM, OFDMA e a estrutura do PRB

As redes 4G LTE e 5G utilizam a multiplexação por divisão de frequências ortogonais (OFDM) e sua variante de acesso múltiplo (OFDMA) no *downlink* (MELO; JACIUK, 2015). A técnica OFDM divide a banda do canal em múltiplas subportadoras ortogonais, reduzindo a interferência intersimbólica (ISI) e aumentando a eficiência espectral (Baker *et al.*, 2011).

Figura 1 – Diferença de alocação de subportadoras entre OFDM e OFDMA



Fonte: Adaptada de Gonsalves, 2011, p. 97.

A Figura 1 acima ilustra a evolução do uso do espectro. No sistema baseado puramente em OFDM (à esquerda), um único usuário ocupa toda a largura de banda do canal durante um determinado símbolo de tempo. Em contrapartida, no sistema OFDMA utilizado no *downlink* das redes 5G (à direita), os blocos de recursos são fragmentados de maneira bidimensional, permitindo que múltiplos usuários (Usuário 1, 2 e 3) trafeguem dados simultaneamente no mesmo instante de tempo, alocando subconjuntos de subportadoras conforme a necessidade de banda e a qualidade do canal de cada equipamento (Gonçalves; 2011, p.96).

Segundo o 3GPP (2024), no domínio do tempo e da frequência, a unidade básica de alocação de recursos para um usuário é o PRB. No sistema OFDMA, a estação base pode alocar diferentes PRBs para diferentes usuários de maneira simultânea, dependendo da necessidade de tráfego e da qualidade do canal de rádio (3GPP, 2024). Uma conexão com elevada relação sinal-interferência mais ruído SINR permite a utilização de esquemas de modulação de alta ordem, como o 256-QAM, aumentando a eficiência espectral e reduzindo a quantidade de PRBs necessária para atingir determinada taxa de transmissão (Ku *et al.*, 2015; 3GPP, 2024).

2.4 Bandas de frequência n40 e n78

As bandas de frequência utilizadas pelas redes 5G possuem características distintas de cobertura, capacidade e propagação, influenciando diretamente o desempenho dos serviços oferecidos. Entre as bandas mais empregadas para o serviço de FWA destacam-se as bandas n40 e n78, amplamente utilizadas por operadoras em diversos países devido à elevada capacidade de transmissão de dados proporcionada pelo espectro de média frequência (3GPP, 2024).

A banda n40 opera na faixa de aproximadamente 2,3 GHz, apresentando um equilíbrio entre cobertura e capacidade, possui melhor capacidade de propagação, maior alcance e melhor penetração em obstáculos, comparada com a banda n78, sendo adequada para áreas urbanas e suburbanas onde se deseja ampliar a cobertura mantendo taxas elevadas de transmissão (3GPP, 2024).

Por outro lado, a banda n78 opera na faixa de 3,3 GHz a 3,8 GHz e constitui atualmente a principal banda utilizada para implantação comercial do 5G NR. Essa faixa oferece canais com maior largura de banda, normalmente entre 80 MHz e 100 MHz, permitindo elevadas taxas de transmissão, maior capacidade da célula e melhor eficiência espectral. Entretanto, devido à frequência mais elevada, apresenta menor alcance e maior sensibilidade à atenuação causada

por edificações e obstáculos naturais, exigindo maior densidade de estações rádio-base para garantir cobertura adequada (ITU, 2020; 3GPP, 2024).

Neste trabalho, ambas as bandas são utilizadas para avaliar o desempenho de equipamentos CPE destinados ao serviço FWA. A comparação entre elas permite analisar como diferentes condições de propagação e disponibilidade de espectro influenciam métricas como *throughput*, qualidade do sinal, utilização de recursos de rádio e eficiência espectral.

2.5 Principais métricas de qualidade do enlace de rádio

Antes de falar em desempenho dos equipamentos, é necessário compreender os indicadores utilizados pelas redes celulares para caracterizar as condições do canal de propagação. Essas métricas são empregadas tanto pelas estações rádio-base quanto pelos equipamentos de usuário para auxiliar os algoritmos de adaptação de enlace (*Link Adaptation*), seleção do esquema de modulação e codificação (*Modulation and Coding Scheme – MCS*), escalonamento de usuários e controle de mobilidade (*handover*) (3GPP, 2024).

Entre os indicadores mais utilizados destacam-se o RSRP, RSRQ e SINR, considerados parâmetros fundamentais para avaliação da qualidade da interface aérea nas redes LTE e 5G NR (Dahlman; Parkvall; Sköld, 2021).

2.5.1 Reference Signal Received Power (RSRP)

O RSRP representa a potência média dos sinais de referência transmitidos pela estação rádio-base e recebidos pelo equipamento do usuário. Expresso em dBm, esse indicador mede a intensidade do sinal recebido, sendo amplamente utilizado nos processos de seleção de célula, mobilidade e avaliação de cobertura. Valores menos negativos indicam melhor intensidade de sinal e, em geral, maior probabilidade de estabelecimento de enlaces estáveis (3GPP, 2024).

2.5.2 Reference Signal Received Quality (RSRQ)

O RSRQ quantifica a qualidade do sinal recebido considerando simultaneamente o RSRP e a potência total recebida (*Received Signal Strength Indicator – RSSI*). Diferentemente do RSRP, essa métrica incorpora os efeitos da interferência proveniente de células vizinhas e do carregamento da célula, permitindo uma avaliação mais representativa da qualidade do

enlace. É expressa em decibéis (dB), sendo que valores mais próximos de zero indicam melhor qualidade do canal (3GPP, 2024).

2.5.3 *Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio* (SINR)

O SINR corresponde à relação entre a potência do sinal útil e a soma das potências de interferência e ruído presentes no canal de comunicação. Trata-se de um dos principais indicadores utilizados pelos algoritmos de adaptação de enlace, influenciando diretamente a seleção do esquema de modulação e codificação adotado pela rede. Valores elevados de SINR permitem a utilização de modulações de alta ordem, como 256-QAM, aumentando a eficiência espectral e reduzindo a quantidade de PRBs necessária para transmitir determinado volume de dados (Ku et al., 2015).

2.6 Indicadores de desempenho e eficiência

A avaliação do desempenho de uma rede 5G depende da análise conjunta de indicadores relacionados ao transporte de dados e à utilização dos recursos de rádio. Essas métricas permitem compreender o comportamento da interface aérea, avaliar a eficiência da comunicação entre o CPE e a gNodeB, como também, identificar fatores que influenciam a capacidade da rede (3GPP, 2024).

Os fluxos de comunicação são classificados em *Downlink* e *Uplink*. O *Downlink* corresponde à transmissão de dados da estação rádio-base para o equipamento do usuário, enquanto o *Uplink* representa o fluxo no sentido oposto, do CPE para a rede da operadora (Melo; Jaciuk, 2015).

Entre os principais indicadores de desempenho destaca-se o *Throughput*, que representa a taxa efetiva de transferência de dados obtida pelo usuário, normalmente expressa em megabits por segundo (Mbps). Neste trabalho, utiliza-se o *MAC Throughput*, métrica referente à camada *Medium Access Control* MAC, que quantifica a quantidade de dados efetivamente transmitidos pela interface aérea, refletindo com maior precisão o desempenho da comunicação (Alam et al., 2023).

A eficiência da transmissão também depende do *Modulation and Coding Scheme* - MCS, mecanismo responsável por definir dinamicamente a combinação entre o esquema de modulação e a taxa de codificação utilizada em cada transmissão. Conforme a qualidade do

enlace melhora, a rede pode empregar modulações de maior ordem, como QPSK, 16QAM, 64QAM e 256QAM, aumentando a quantidade de bits transmitidos por símbolo e, conseqüentemente, a eficiência espectral. Em contrapartida, condições desfavoráveis do canal exigem modulações mais robustas, porém menos eficientes em termos de capacidade de transmissão (Ku et al., 2015).

Os PRBs constituem a menor unidade de alocação de recursos na interface aérea das redes LTE e 5G NR. Cada PRB é formado por um conjunto de 12 subportadoras no domínio da frequência, sendo distribuído dinamicamente pelo escalonador da estação rádio-base conforme a demanda de tráfego e as condições do canal de rádio (3GPP, 2024). Dessa forma, quanto maior a quantidade de PRBs atribuída a um usuário, maior será a parcela dos recursos espectrais ocupada durante a transmissão.

A eficiência espectral expressa a capacidade da rede de transmitir informações utilizando a menor quantidade possível de recursos de rádio. Embora seja frequentemente representada na literatura em bits/s/Hz, neste trabalho adota-se um indicador de eficiência baseado na quantidade de bits transmitidos por PRB utilizado, permitindo comparar diretamente o desempenho das CPEs analisadas. Esse indicador é obtido pela relação entre o *MAC Throughput* e o número de PRBs efetivamente utilizados no instante da medição, conforme a Equação (1).

$$\eta_{PRB} = \frac{T_{DL} \times 10^6}{N_{PRB}} \quad (1)$$

Onde:

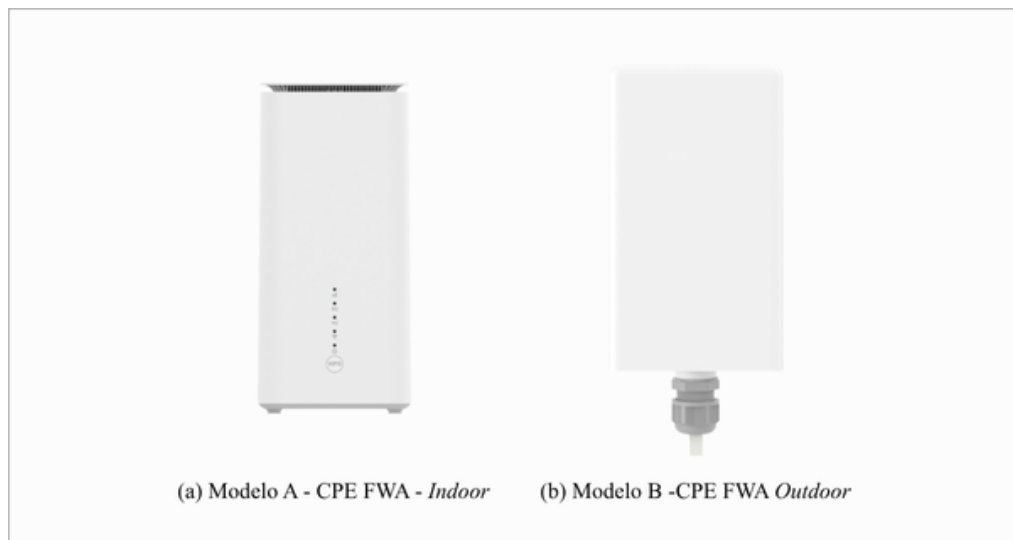
- η_{PRB} = Eficiência de throughput por PRB (bits/s/PRB);
- T_{DL} = Downlink MAC Throughput (Mbps);
- N_{PRB} = Número de PRBs utilizados (*Code0 DL Used RB Num*).

Quanto maior o valor de η_{PRB} , maior é a quantidade de informação transmitida por bloco de recurso alocado, indicando uma utilização mais eficiente do espectro disponível pelo dispositivo. Conseqüentemente, equipamentos capazes de manter elevada eficiência espectral tendem a consumir menos PRBs para alcançar um mesmo *throughput*, contribuindo para aumentar a capacidade da célula e permitir o atendimento simultâneo de um maior número de usuários (Alam et al., 2023; Ku et al., 2015).

3 DESCRIÇÃO DO PROJETO

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo de caso com abordagem quantitativa e experimental, desenvolvido por meio de testes de campo em uma rede comercial 5G SA. O objetivo consistiu em comparar o desempenho de duas CPE destinadas ao serviço FWA, uma do tipo *Indoor* e outra *Outdoor*, ambas do mesmo fabricante e baseadas na mesma plataforma de *hardware*, composta pelo *chipset* MediaTek T750 e pelo módulo Fibocom FG360-EAU. Dessa forma, buscou-se minimizar a influência do *hardware* na comparação, permitindo que as diferenças observadas fossem atribuídas predominantemente às características físicas e construtivas dos equipamentos. A Figura 2 apresenta os dispositivos utilizados neste estudo.

Figura 2 – Dispositivos de estudo



Fonte: Autoria própria (2026).

O modelo *Indoor* consiste em uma CPE destinada à instalação em ambientes internos, equipada com *Wi-Fi 6 dual-band* (AX3000), suporte a canais de até 160 MHz e duas interfaces *Ethernet* de 2,5 Gbit/s. Já o modelo *Outdoor* foi desenvolvido para instalação em ambientes externos, possuindo interface *Ethernet* de 2,5 Gbit/s e conjunto de antenas direcionais projetado para maximizar o desempenho do enlace de rádio. A Tabela 1 apresenta as principais características técnicas e o ganho das antenas informado pelo fabricante.

Tabela 1 - Detalhe/ Especificações dos dispositivos utilizados

Dispositivo	Antena Ominidirecional - n40 (dBi)	Antena Direcional- n78 (dBi)	Aplicação
Modelo A	4.5	9	Indoor
Modelo B	4.5	10.4	Outdoor

Fonte: Manual do fabricante (2025).

3.1 Local de realização dos testes

Os ensaios foram realizados em um ponto previamente selecionado localizado a aproximadamente 100 metros gNodeB. A escolha desse local foi baseada em dois critérios principais: a reduzida distância em relação à torre, minimizando perdas de propagação em espaço livre, e o alinhamento direto com o setor de cobertura da estação rádio-base, garantindo que ambos os equipamentos permanecessem sob as mesmas condições de irradiação do feixe principal da antena.

As medições foram executadas em uma área externa de uma residência, denominada Ponto A, cujas coordenadas geográficas são (-6.21089929389, -38.498624767650). A estação rádio-base encontra-se localizada nas coordenadas (-6.211724430670, -38.49895180933). A Figura 3 ilustra a posição relativa entre o ponto de medição e a estação rádio-base.

Figura 3 – Localização do Ponto A

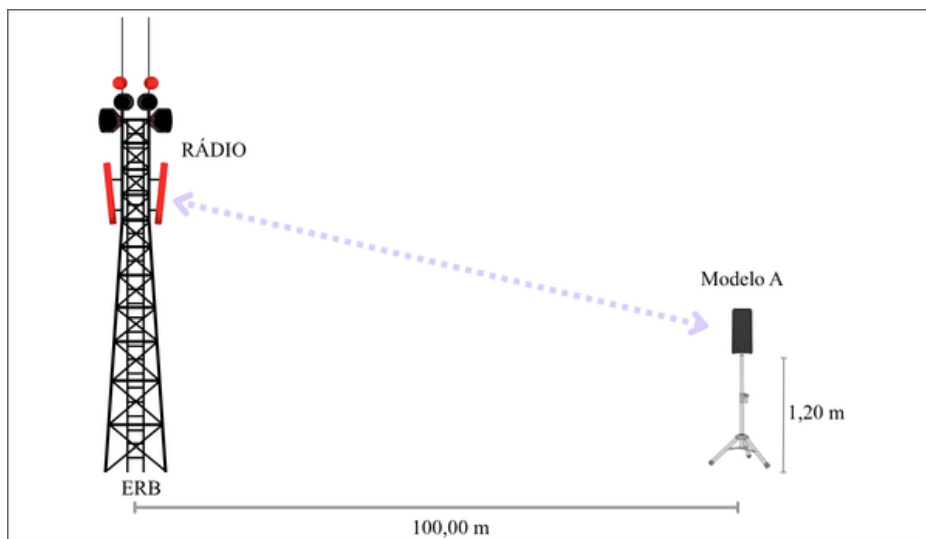


Fonte: Adaptada do Google Earth (2026).

Os ensaios foram realizados durante o período da manhã, em um dia de céu aberto e ensolarado, sem ocorrência de precipitação ou condições meteorológicas adversas que pudessem influenciar significativamente a propagação do sinal de radiofrequência.

Para garantir condições equivalentes de propagação, ambas as CPEs foram posicionadas sequencialmente exatamente no mesmo local físico, fixadas sobre um tripé com altura de 1,20 m em relação ao solo, conforme ilustrado na Figura 4. Essa configuração teve como objetivo eliminar variações decorrentes da posição dos equipamentos, possibilitando que ambos fossem avaliados sob condições praticamente idênticas de propagação.

Figura 4 – Representação do cenário dos testes



Fonte: Autoria própria (2026).

3.2 Configuração dos equipamentos e procedimento experimental

Antes do início das medições, ambos os equipamentos foram configurados por meio da interface Web de gerenciamento (WebGUI). Inicialmente foi realizado o travamento do PCI (*PCI Lock*) e da banda de operação (*Lock Band*), garantindo que as duas CPEs permanecessem conectadas à mesma célula durante todos os ensaios, evitando alterações decorrentes de procedimentos automáticos de seleção de célula (*cell reselection*) ou *handover*.

Na banda n40, os equipamentos permaneceram travados no PCI 131, enquanto na banda n78 foi utilizado o PCI 9. Os ensaios foram executados inicialmente na banda n40 e, posteriormente, repetidos integralmente na banda n78.

O procedimento metodológico adotado está resumido na Figura 5, que apresenta o fluxograma completo da aquisição e processamento dos dados. O protocolo experimental foi composto pelas seguintes etapas:

Figura 5 – Etapas do procedimento metodológico



Fonte: Autoria própria (2026).

1. O Travamento do PCI e da banda(*PCI Lock e Band Lock*);
2. Execução da tarefa (*task*) da ferramenta proprietária da estação rádio-base para geração contínua de tráfego e coleta dos registros (*logs*) da camada física em *Downlink*;
3. Repetição do procedimento para geração de tráfego em *Uplink*;
4. Coleta das métricas de radiofrequência (*RSRP, RSRQ e SINR*) por meio da interface Web da CPE, realização de três medições utilizando a ferramenta *Ookla Speedtest* e execução de teste de latência por meio de requisições *ICMP*; (*ping*) durante 20 segundos para o servidor DNS público do Google;
5. Organização dos dados em planilhas eletrônicas, cálculo das médias e elaboração dos gráficos utilizados na análise dos resultados.

Cada ensaio de *Downlink* e *Uplink* teve duração de quatro minutos, período durante o qual a ferramenta proprietária da estação rádio-base direcionou praticamente toda a capacidade disponível do setor para o equipamento em teste, permitindo avaliar o desempenho máximo da interface aérea.

3.3 Tratamento dos Dados

Os registros provenientes da ferramenta proprietária da estação rádio-base foram exportados automaticamente em formato CSV, contendo todas as métricas da camada física organizadas em colunas, incluindo ocupação de PRBs, níveis de modulação, *throughput* MAC, potência recebida e demais indicadores utilizados neste trabalho.

As informações obtidas por meio da interface Web das CPEs, dos testes de velocidade e das medições de latência foram registradas por captura de tela imediatamente após cada ensaio. Posteriormente, esses dados foram tabulados manualmente em planilhas eletrônicas, permitindo o cálculo das médias, a organização das informações e a geração dos gráficos apresentados no Capítulo 4.

3.4 Estratégia de execução das medições

As medições foram realizadas sequencialmente, iniciando-se pela banda n40, na qual foram testados inicialmente o modelo *Indoor* e, logo em seguida, o modelo *Outdoor*. Após a conclusão dessa etapa, o mesmo procedimento foi repetido para a banda n78.

A realização dos ensaios em sequência teve como objetivo reduzir a influência de variações temporais da rede, como alterações na carga da célula, mudanças nas condições de propagação e variações ambientais, assegurando que ambos os equipamentos fossem avaliados sob condições operacionais equivalentes.

Optou-se por realizar apenas uma campanha de medições, sem repetições adicionais, devido às características do procedimento experimental. Durante a execução da *task* de teste da camada física, a estação rádio-base destina praticamente toda a capacidade disponível do setor ao equipamento avaliado. Dessa forma, a repetição sucessiva dos ensaios poderia degradar a experiência dos demais usuários conectados à célula comercial utilizada na pesquisa. Considerando essa limitação operacional, adotou-se um protocolo experimental cuidadosamente controlado, no qual ambos os equipamentos foram testados em sequência imediata, preservando a comparabilidade entre os resultados obtidos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

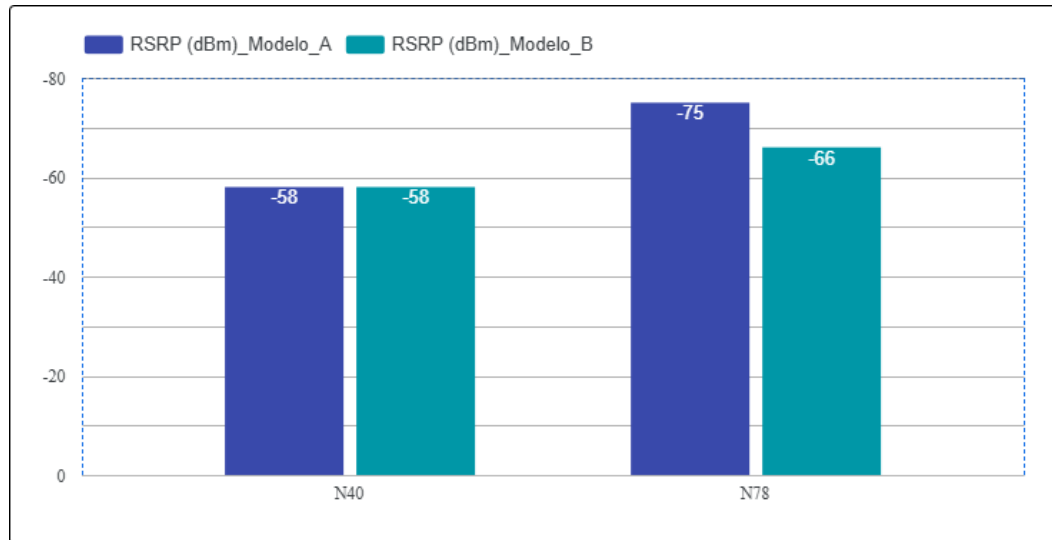
Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos durante os ensaios experimentais realizados com as CPEs FWA 5G avaliadas neste estudo. As análises contemplam o comportamento dos equipamentos nas bandas n40 e n78, considerando indicadores de qualidade do enlace de rádio, como RSRP, RSRQ e SINR, além dos níveis de modulação QAM, desempenho de *throughput* e utilização dos PRBs. Os resultados são apresentados por meio de gráficos, tabelas e registros coletados durante os testes, permitindo avaliar a influência das características de cada equipamento na qualidade da comunicação e na eficiência de utilização dos recursos da rede 5G. Os dados obtidos confirmam a relevância das características físicas das antenas dos equipamentos na qualidade do sinal recebido e, consequentemente, na alocação de recursos da rede 5G.

Na Banda n40: Avaliando as informações de rádio coletadas, os resultados da banda n40 mostraram uma equivalência técnica na área externa. Tanto a CPE *Indoor* quanto a CPE *Outdoor* apresentaram um RSRP estável de -58 dBm, Gráfico 1, e RSRQ de -11 dB, Gráfico 2.

Na Banda n78: A banda n78, por operar em frequências mais altas (acima de 3 GHz), sofre maior degradação de sinal no espaço livre e exige antenas com maior ganho para manter a estabilidade da conexão. Neste cenário, a superioridade do arranjo de antenas diretivas do equipamento *Outdoor* ficou evidente. A CPE *Indoor* registrou um RSRP de -75 dBm e SINR em torno de 31 dB. Já a CPE *Outdoor* obteve um RSRP consideravelmente melhor, na faixa de -67 dBm, mantendo a SINR em 32 dB.

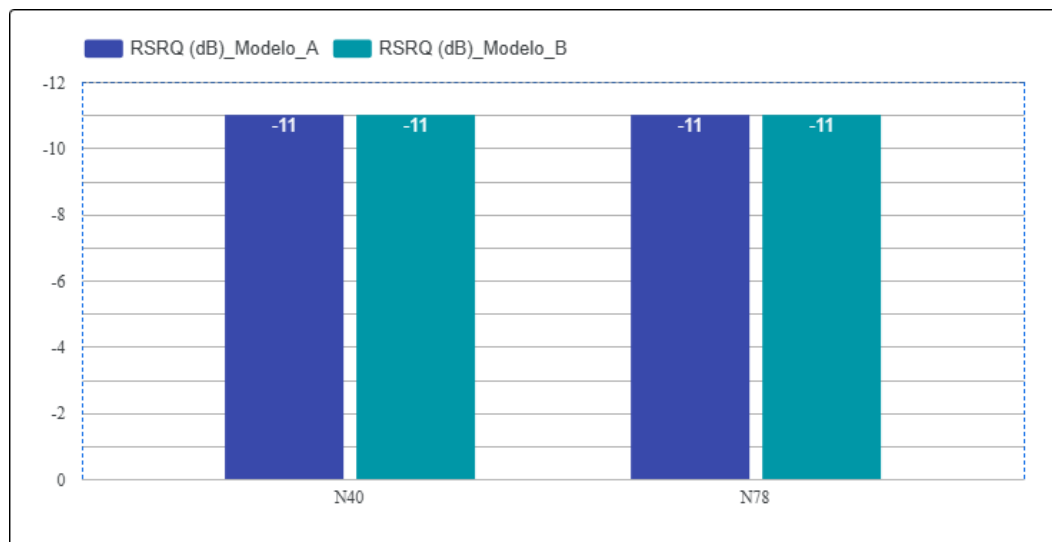
De acordo com o 3GPP (2024), quanto menos negativo for o valor de RSRP, melhor é a potência do sinal recebido. Assim, um RSRP de -67 dBm representa uma condição de recepção superior a um RSRP de -75 dBm ou -100 dBm, por exemplo. De forma análoga, o SINR é uma métrica em que valores positivos e mais elevados indicam melhor qualidade do enlace de rádio, refletindo menores níveis de interferência e ruído e favorecendo a utilização de esquemas de modulação de maior ordem.

Gráfico 1 – Comparativo de Nível de Sinal RSRP (dBm) nas bandas n40 e n78



Fonte: Autoria própria (2026).

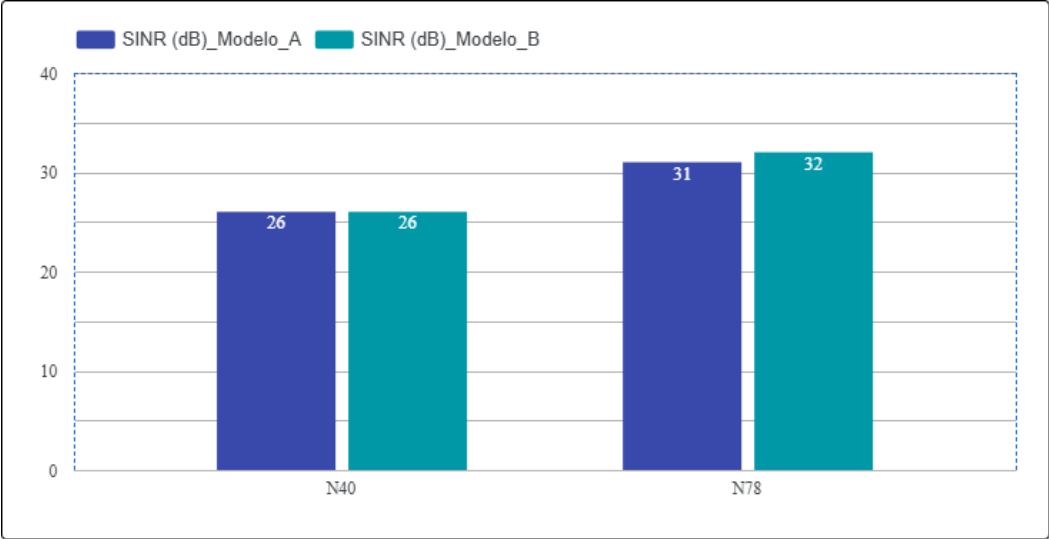
Gráfico 2 – Comparativo de Nível de Sinal RSRQ (dB) nas bandas n40 e n78



Fonte: Autoria própria (2026).

O nível de SINR flutuou marginalmente (próximo a 26~29 dB), vide Gráfico 3. Essa semelhança era esperada, uma vez que a frequência da banda n40 possui maior facilidade de propagação e as antenas de ambos os dispositivos conseguiram operar com folga neste espectro na ausência de barreiras físicas (paredes).

Gráfico 3 – Comparativo de Nível de SINR nas bandas n40 e n78



Fonte: Autoria própria (2026).

A Figura 6 apresenta os principais parâmetros de rádio da CPE durante a operação na banda n78. O equipamento encontrava-se conectado à banda de 3,5 GHz, registrando Rank 3, indicando a utilização de três camadas espaciais de transmissão MIMO, o que contribui para o aumento da capacidade do enlace. A Taxa de Erro de Bits (BER) foi igual a 0, evidenciando a ausência de erros de transmissão durante a medição. No enlace de subida (*Uplink*), a rede utilizou modulação 256-QAM, demonstrando excelentes condições do canal para transmissão de dados.

Figura 6 – Dados de RF coletados na página web do dispositivo *Outdoor*

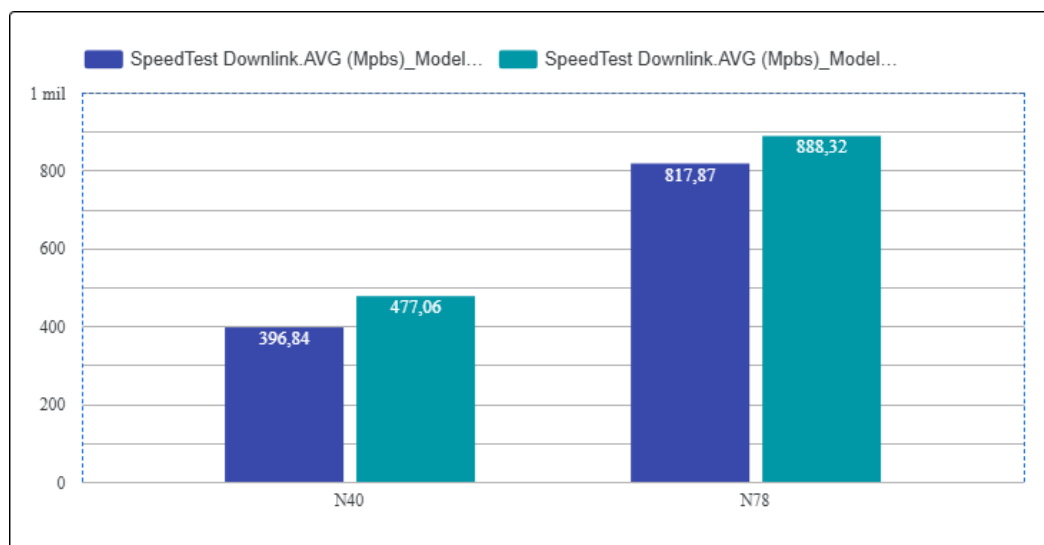
Banda atual	-/78
Tipo de classificação	-/3
Taxa de erro de bits de downlink	-/0
QAM upstream atual	-/256QAM
QAM de downlink atual	-/QPSK
RSRP	-/-67
RSRQ	-/-11
SINR	-/32
RSSI	-/-55

Fonte: Autoria própria (2026).

Ainda conforme a Figura 6, o equipamento apresentou um RSRP de -67 dBm, caracterizando excelente intensidade de sinal, RSRQ de -11 dB, indicando boa qualidade do enlace, SINR de 32 dB, revelando baixa interferência e elevada relação sinal-ruído, e RSSI de -55 dBm, correspondente ao alto nível de potência total recebido. Em conjunto, esses indicadores demonstram que a CPE operava em condições favoráveis de propagação, possibilitando elevada eficiência espectral e alto desempenho na comunicação 5G.

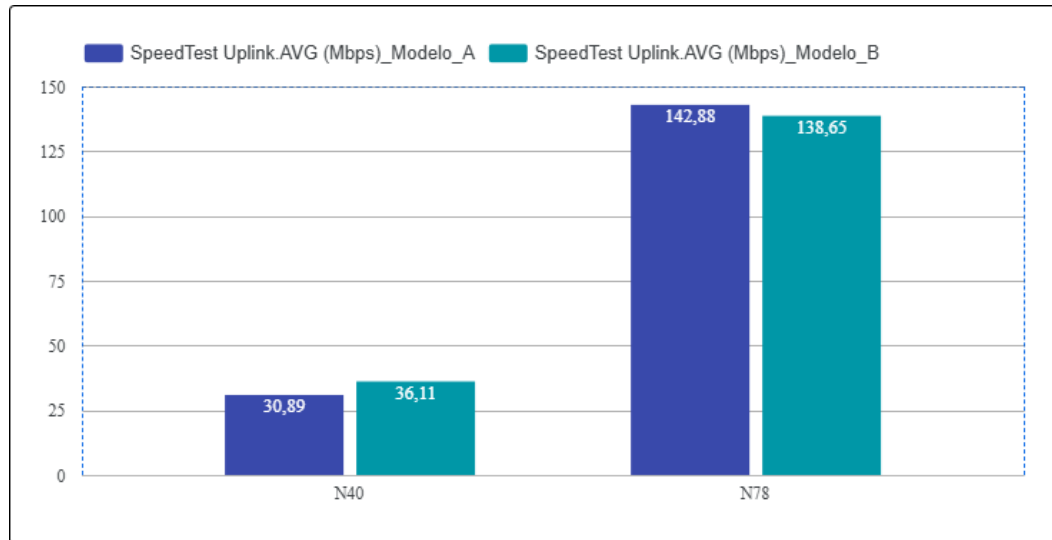
1. **Modulação (QAM):** Com um sinal mais puro, o algoritmo do rádio-base pode negociar o uso de modulações de ordem mais elevada (ex: sustentação de 256QAM) com muito menos erros de decodificação.
2. **Velocidades:** Os Gráficos 4 e 5 ilustram a capacidade massiva de transferência de ambas as CPEs. Na banda n40, a CPE *Outdoor* teve um desempenho superior em *SpeedTest*. Na banda n78, ambas alcançaram o teto prático da rede no momento do teste (acima de 800 Mbps), comprovando a capacidade da tecnologia FWA de competir com as redes de fibra óptica. Esse desempenho torna-se ainda mais relevante ao considerar que, segundo a Teleco (2026), a velocidade média dos acessos de banda larga fixa no Brasil, em setembro de 2025, foi de 501 Mbps.

Gráfico 4 – Resultados de Teste de Velocidade nas bandas N40 e N78 - *Downlink*



Fonte: Autoria própria (2026).

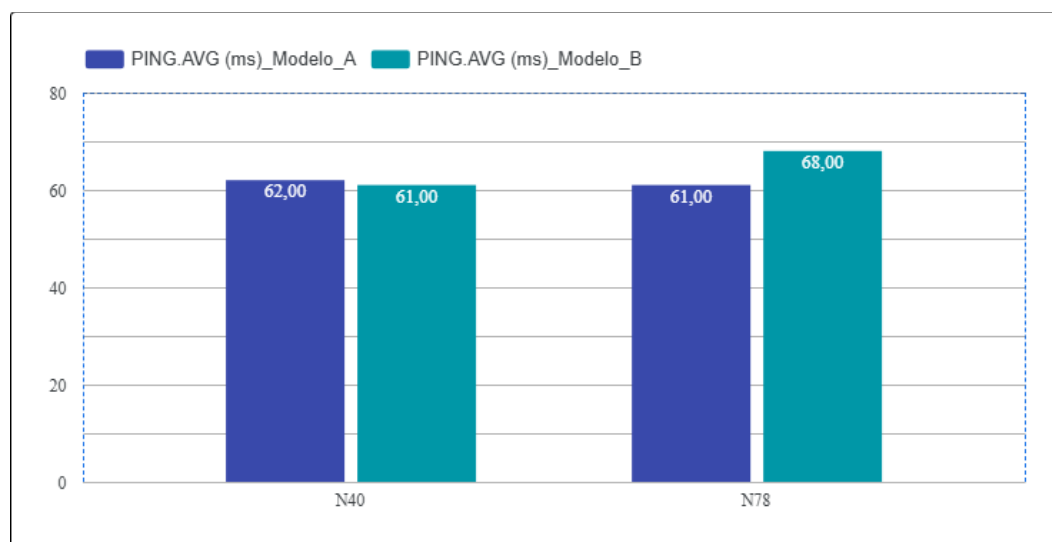
Gráfico 5 – Resultados de Teste de Velocidade nas bandas N40 e N78 - *Uplink*



Fonte: Autoria própria (2026).

3. **Latência Média:** Obtida por meio de testes ICMP (*ping*) para o servidor DNS público do Google, utilizada como métrica complementar para avaliação do desempenho fim a fim da comunicação. Na banda n40, os resultados foram praticamente equivalentes, registrando 62 ms para a CPE *Indoor* e 61 ms para a CPE *Outdoor*. Na banda n78, a CPE *Indoor* apresentou latência média de 61 ms, enquanto a CPE *Outdoor* registrou 68 ms, correspondendo a uma diferença de 7 ms, conforme mostra o Gráfico 6.

Gráfico 6 – Resultados de Teste de Latência



Fonte: Autoria própria (2026).

Considerando que a latência em redes móveis é influenciada por diversos fatores, como o escalonamento de recursos na estação rádio-base, a carga instantânea da célula e o roteamento da rede, os valores observados indicam que ambos os equipamentos apresentaram desempenho semelhante quanto ao tempo de resposta durante a campanha de medição, não sendo identificadas diferenças expressivas que permitam atribuir variações de latência exclusivamente às características construtivas das CPEs.

4. **Ocupação de PRB:** Ao analisar os registros de extração dos LOGs do sistema, a taxa de sucesso no *Downlink* reflete diretamente no consumo de blocos. Para transmitir a mesma quantidade de Megabits solicitada pelas tarefas de rede, a CPE *Indoor* (com modulação mais densa) demandou menos PRBs escalonados pela ERB do que a CPE *Outdoor*.

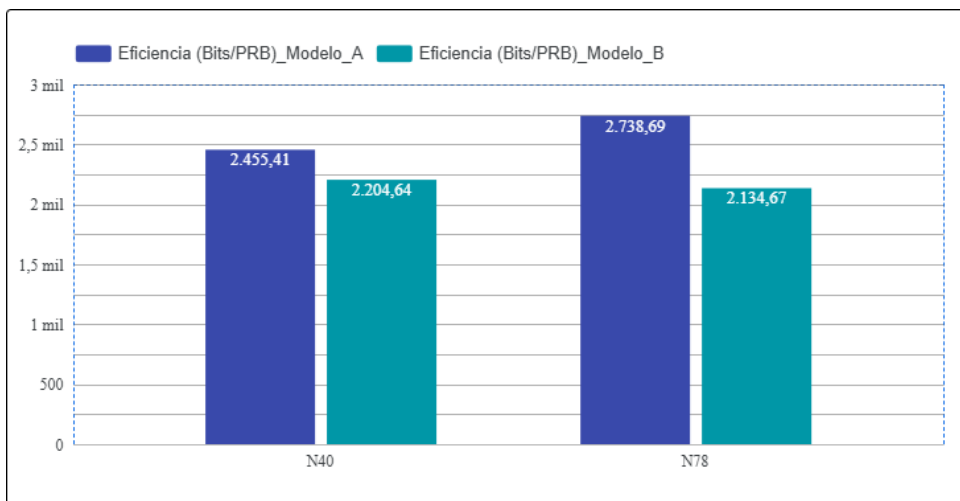
Essa métrica é vital sob a perspectiva do Core e do rádio da operadora: uma CPE FWA que utiliza o espectro de forma eficiente consome menos "tempo e espaço" da antena da estação base. Para esta análise foi necessário cruzar o *Throughput* em bits pelos PRBs e analisar qual está sendo mais eficiente, ou seja, qual está trazendo mais bits por PRB, para isso, o Índice de Eficiência de Utilização dos PRBs (IE-PRB) foi definido como a razão entre o *Throughput* MAC de *Downlink* e a quantidade de *Physical Resource Blocks* utilizados durante a mesma janela de medição, vide, Equação (1). Como ambas as grandezas se referem ao mesmo intervalo temporal, o fator tempo é cancelado, resultando em uma métrica expressa em bits por PRB (bits/PRB).

Tabela 2 - Média de *Throughput* transportado por Bloco de Recurso (bits/PRB)

Banda	Modelo A - Eficiência (bits/PRB)	Modelo B - Eficiência (bits/PRB)
N40	2.455,41	2.204,64
N78	2.738,69	2.134,67

Fonte: Autoria própria (2026).

O Gráfico 7 abaixo, ilustra o cerne da alocação de recursos físicos na camada de rádio 5G SA. Para mensurar a eficiência com a qual cada dispositivo utiliza o espectro da operadora, foi calculada a relação entre o *Throughput* de *Downlink* obtido e a quantidade de blocos alocados (*Code0 DL Used RB Num*) durante os testes de estresse.

Gráfico 7 – Média de *Throughput* transportado por Bloco de Recurso (Bits/PRB)

Fonte: Autoria própria (2026).

Ao contrário da expectativa inicial de que o equipamento *Outdoor* apresentasse desempenho superior em todos os cenários, os resultados obtidos evidenciaram um comportamento distinto nas condições experimentais adotadas. Como o protocolo de testes isolou a variável de atenuação, posicionando ambas as CPEs no mesmo tripé em ambiente externo, a CPE *Indoor* apresentou maior Índice de Eficiência de utilização dos PRBs. Na banda n78, a CPE *Indoor* alcançou, em média, 2.738,69 bits/PRB, enquanto a CPE *Outdoor* obteve 2.134,67 bits/PRB. Comportamento semelhante foi observado na banda n40, com valores de 2.455,41 e 2.204,64 bits/PRB, respectivamente.

Os resultados sugerem que, em condições ideais de linha de visada e na ausência de obstáculos físicos, o projeto de antenas do Modelo *Indoor*, desenvolvido para explorar a propagação por multipercursos e as técnicas MIMO características de ambientes internos, favoreceu uma melhor correlação espacial com a Estação Rádio-Base. Esse comportamento tende a possibilitar a utilização de esquemas de modulação e codificação (MCS) de maior eficiência, contribuindo para uma utilização mais eficiente dos recursos de rádio.

Entretanto, sob a perspectiva do planejamento de capacidade das operadoras, os resultados também indicam que a utilização de equipamentos como CPE FWA *Outdoor* permanece tecnicamente adequada para cenários de instalação residencial. A elevada eficiência observada para o dispositivo *Indoor* foi obtida em uma condição experimental específica, na qual o equipamento foi instalado em ambiente externo, eliminando os efeitos da atenuação provocada por paredes e outros obstáculos. Em condições típicas de uso residencial, espera-se que a CPE *Indoor* esteja sujeita à perda de penetração dos materiais construtivos, especialmente na frequência de 3,5 GHz da banda n78, o que tende a reduzir a relação sinal-interferência mais

ruído (SINR), limitar os níveis de modulação empregados e aumentar a demanda por recursos de rádio.

Dessa forma, os resultados obtidos sugerem que a utilização de equipamentos projetados para instalação externa, como o Modelo *Outdoor*, tende a proporcionar condições mais favoráveis para a manutenção de elevados níveis de eficiência na utilização dos PRBs em cenários reais de operação. Consequentemente, a redução da atenuação do enlace pode contribuir para diminuir a quantidade de blocos de recursos necessários para transmitir uma mesma quantidade de dados, favorecendo o uso mais eficiente do espectro disponível e ampliando, potencialmente, a capacidade de atendimento de assinantes FWA por célula.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa atingiu seus objetivos ao investigar e analisar o consumo de recursos de rádio PRB e o desempenho de recepção de sinal entre equipamentos FWA do tipo *Indoor* e *Outdoor* em uma rede 5G *Standalone* (SA). Ao submeter as duas CPEs (ambas baseadas no chipset Mediatek T750) às mesmas condições físicas e de visada na área externa, foi possível isolar a variável de penetração de barreiras (paredes) e avaliar o comportamento puro do hardware de RF de cada modelo.

A análise dos dados coletados revelou um resultado tecnicamente singular que contrapõe a hipótese inicial. Embora a CPE *Outdoor* tenha apresentado uma notável superioridade na captação de potência do sinal de referência nas frequências mais altas da banda n78 (RSRP de -67 dBm contra -75 dBm do modelo *Indoor*), a extração dos *logs* de sistema demonstrou que a CPE *Indoor* obteve um Índice de Eficiência superior no transporte de dados. Na banda n78, o modelo *Indoor* atingiu uma média de 2.738,69 Bits/PRB, enquanto o modelo *Outdoor* registrou 2.134,67 Bits/PRB.

Esse comportamento evidencia que o arranjo de antenas do modelo *Indoor*, projetado especificamente para tirar o máximo proveito da dispersão de sinais e multipercursos (MIMO) característicos de ambientes confinados, possui uma excelente capacidade de correlação espacial e negociação de modulação quando posicionado, artificialmente, em condições ideais de visada.

Sob a ótica da engenharia de tráfego de redes e do planejamento de capacidade das operadoras de telecomunicações, a premissa de que a arquitetura FWA baseada em CPEs externas apresenta maior eficiência espectral e operacional permanece empiricamente validada. A alta eficiência em Bits/PRB alcançada pelo dispositivo *Indoor* neste estudo ocorreu exclusivamente porque o equipamento foi retirado do seu local de uso natural (o interior da residência). Em uma implantação real, o sinal da banda n78 (frequência de 3.5 GHz) sofreria uma degradação drástica ao penetrar as paredes da casa, o que derrubaria a Relação Sinal-Ruído (SINR) e forçaria a Estação Rádio-Base a despencar os Índices de Modulação (MCS). Consequentemente, a CPE *Indoor* passaria a consumir uma quantidade massiva e ineficiente de PRBs da célula para conseguir entregar a mesma velocidade ao usuário.

Conclui-se, portanto, que a adoção de soluções como CPE *Outdoor* é fundamental para o modelo de negócios do 5G FWA. O modelo *Outdoor* garante a melhor recepção de sinal possível (mitigando a perda de penetração) e assegura que a Estação Rádio-Base não precise desperdiçar o seu recurso mais valioso e escasso — o espectro (PRB) — para compensar o sinal

atenuado de clientes *Indoor*. Otimizando o consumo de blocos, a operadora consegue adensar a rede, multiplicando o número de domicílios atendidos por célula e maximizando o retorno sobre o investimento (ROI) da infraestrutura 5G.

Como continuidade desta linha de investigação, recomenda-se a realização de novos experimentos utilizando a mesma metodologia, porém posicionando a CPE *Indoor* em ambientes internos e em diferentes cômodos da residência. Essa abordagem permitirá quantificar o impacto da perda de penetração sobre o Índice de Eficiência de Utilização dos PRBs, estabelecendo uma comparação mais representativa entre os cenários experimental e operacional e ampliando a compreensão dos efeitos da instalação das CPEs sobre a utilização dos recursos de rádio em redes 5G FWA.

REFERÊNCIAS

- 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT (3GPP). TS 36.211: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA): **Physical Channels and Modulation**. Release 17. Sophia Antipolis: 3GPP, 2024. Disponível em: <https://www.3gpp.org/DynaReport/36211.htm>. Acesso em: 28 jun. 2026.
- AHOKANGAS, Petri; AAGAARD, Annabeth (org.). **The changing world of mobile communications: 5G, 6G and the future of digital services**. Cham: Palgrave Macmillan, 2024. DOI: 10.1007/978-3-031-33191-6.
- ALAM, Mohammed Jaber *et al.* **An overview of LTE/LTE-A heterogeneous networks for 5G and beyond**. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, v. 34, n. 8, e4806, 2023. DOI: 10.1002/ett.4806. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ett.4806>. Acesso em: 28 jun. 2026.
- ALAM, Mohammed Jaber *et al.* **An overview of LTE/LTE-A heterogeneous networks for 5G and beyond**. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, v. 34, n. 11, e4806, 2023. DOI: 10.1002/ett.4806.
- AMD. **5G Core Operator Survey (2025 Edition)**. Santa Clara: AMD, 2025. Disponível em: <https://www.amd.com/content/dam/amd/en/documents/solutions/telco/5g-core-operator-survey.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2026.
- ANALYSYS MASON. **Wireless network traffic worldwide: forecasts and analysis 2014–2019**. Cambridge, out. 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6022: informação e documentação: artigo em publicação periódica técnica e/ou científica: apresentação. Rio de Janeiro, 2025.
- BAKER, Matthew; SESIA, Stefania; TOUFIK, Issam;. **LTE The UMTS Long Term Evolution From Theory To Practice**. 2nd ed, John Wiley & Sons, 2011.
- BAS, C. U. et al. **Outdoor to indoor penetration loss at 28 GHz for fixed wireless access**. arXiv, Ithaca, NY, 2017. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1711.00168>. Acesso em: 9 jul. 2026.
- DAHLMAN, Erik; PARKVALL, Stefan; SKÖLD, Johan. **5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology**. 2. ed. London: Academic Press, 2021.
- DALELA, Chhaya; PRASAD, M. V. S. N.; DALELA, Pankaj Kumar. **Tuning of COST-231 Hata model for radio wave propagation predictions**. In: WYLD, David C. et al. (org.). CCSEA, SEA, CLOUD, DKMP, CS & IT 05. 2012. p. 255-267. DOI: 10.5121/csit.2012.2227.
- DU, J. et al. **Suburban residential building penetration loss at 28 GHz for fixed wireless access**. *IEEE Wireless Communications Letters*, v. 7, n. 6, p. 890–893, 2018a. DOI: 10.1109/LWC.2018.2843597.

DU, J. et al. **Suburban Fixed Wireless Access Channel Measurements and Models at 28 GHz for 90% Outdoor Coverage**. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, v. 67, n. 3, p. 1474–1488, 2019. DOI: 10.1109/TAP.2018.2882565.

FIBOCOM. **FG360-EAU Datasheet**. Versão 1.7. [S.l.]: Fibocom, [202-?].

GLOBAL MOBILE SUPPLIERS ASSOCIATION (GSA). **How the Fusion of AI and 5G Fixed Wireless Access Will Deliver a New Era of Intelligent Connectivity**. Industry Insights, 2025. Disponível em: <<https://gsacom.com/industry-insights/how-the-fusion-of-ai-and-5g-fixed-wireless-access-will-deliver-a-new-era-of-intelligent-connectivity/>>. Acesso em: 28 jun. 2026.

GLOBAL MOBILE SUPPLIERS ASSOCIATION (GSA). **Powering the Future of Fixed Wireless Access with 5G-Advanced**. Industry Insights, 2024a. Disponível em: <<https://gsacom.com/industry-insights/powering-fwa-with-5g-advanced/>>. Acesso em: 28 jun. 2026.

GONÇALVES, João F. E. A. C. **Análise de Desempenho dos Sistemas LTE e LTE-Advanced com base em Simuladores**. 2011. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2011. Disponível em: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395143052365/Disserta%E7%E3o%20-%20Set2011%20-%20Jo%E3o%20Gon%E7alves%20-%2057940.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2026.

HUAWEI. **Huawei and DOCOMO Collaboration Succeeds with World's First Large-Scale Field Trial of 5G New Radio Access Technology**. [S.l.]: Huawei, [202-?].

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU). **IMT Vision: Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond**. Geneva: ITU, 2015. Disponível em: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/oth/0A/06/R0A0600005F0001PDFE.pdf. Acesso em: 28 jun. 2026.

KU, Gwanmo et al. **Resource Allocation and Link Adaptation in LTE and LTE-Advanced: A Tutorial**. IEEE Communications Surveys & Tutorials, v. 17, n. 3, p. 1605-1633, 2015. DOI: 10.1109/COMST.2014.2383691.

MELO, Adailton Turczen de; JACIUK, Ivan. **Estudo da tecnologia Long Term Evolution (LTE) e LTE-Advanced (4G)**. 2015. 89 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Sistemas de Telecomunicações) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/9734/1/CT_COTEL_2015_2_04.pdf. Acesso em: 28 jun. 2026.

NIKOPOUR, Hosein et al. **SCMA for Downlink Multiple Access of 5G Wireless Networks**. arXiv, 2014. DOI: 10.48550/arXiv.1404.5605. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1404.5605>. Acesso em: 28 jun. 2026.

NOGUEIRA, Lídio Cesar; LOPES, Estevan Marcelo. **Esquemas candidatos para camada física de sistemas 5G**. In: SEMINÁRIO DE REDES E SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES, 5., 2016, Santa Rita do Sapucaí. **Anais[...]** Santa Rita do Sapucaí: INATEL, 2016.

TELECO. **Redes 5G I: a nova geração de rede celular**. Tutoriais Teleco, 2015. Disponível em: <http://www.teleco.com.br>. Acesso em: 28 jun. 2026.

APÊNDICES

APÊNDICE A – TABELA: RESUMO DE DADOS

Modelo	Banda	RSRP (dBm)	RSSI (dBm)	RSRQ (dB)	SINR (dB)	CQI	BW (Mhz)	Rank	PING (ms)	SpeedTest Downlink (Mbps)	SpeedTest Uplink (Mbps)	Downlink MAC Throughput (Mbps)	Uplink MAC Throughput (Mbps)	Eficiencia (bits/PRB)
Modelo A	N40	-58	-47	-11	26	12	50	3	62	396,8366667	30,89333333	495.827	46.672	2.455,41
Modelo A	N78	-75	-64	-11	31	14	100	3	61	817,8666667	142,8833333	1.077.548	164.864	2.738,69
Modelo B	N40	-58	-47	-11	26	12	50	3	61	477,0600000	36,10666667	446.854	39.552	2.204,64
Modelo B	N78	-66	-55	-11	32	15	100	3	68	888,3166667	138,6500000	874.933	159.959	2.134,67

APÊNDICE B – GRÁFICOS GERADOS A PARTIR DOS DADOS

GRÁFICOS GERADOS LOOKER STUDIO

